HAL
open science

Etude par le tritium de la dynamique des eaux du Lac Léman. Apport du tritium à la limnologie physique

Pierre Hubert

To cite this version:

Pierre Hubert. Etude par le tritium de la dynamique des eaux du Lac Léman. Apport du tritium à la limnologie physique. Hydrologie. Université de Paris, 1971. Français. NNT : . tel-00822925

HAL Id: tel-00822925

https://theses.hal.science/tel-00822925v1

Submitted on 15 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.

GEOLOGIE GRENOBLE UJF
D 050 032345 1

HUBERT (P.) = A

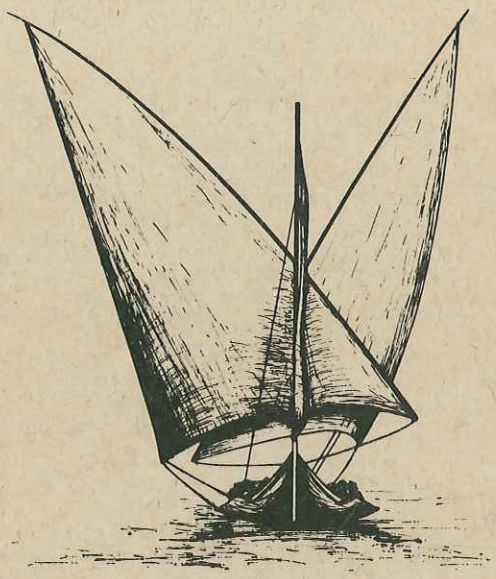
UNIVERSITE DE PARIS

19 5 DEC. 1977

ETUDE PAR LE TRITIUM DE LA DYNAMIQUE DES EAUX DU LAC LEMAN

APPORT DU TRITIUM A LA LIMNOLOGIE PHYSIQUE

par Pierre Hubert



UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE
et MÉDICALE de GRENOBLE
INSTITUT DOLOMIEU
Rue Maurice-Gignoux
38 - GRENOBLE

18 AOUT 2003

CENTRE DE RECHERCHES GEODYNAMIQUES

THONON - LES - BAINS 74 FRANCE

1971

N° d'enregistrement
au C.N.R.S.

THESE DE DOCTEUR INGENIEUR

présentée

A LA FACULTE DES SCIENCES
de PARIS

par

M. Pierre HUBERT

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
18 AOUT 2003

pour obtenir

le grade de Docteur Ingénieur

Sujet de la Thèse :

ETUDE PAR LE TRITIUM DE LA DYNAMIQUE DES EAUX DU LAC LEMAN

APPORT DU TRITIUM A LA LIMNOLOGIE PHYSIQUE

Soutenue le 22 MAI 1971 devant la Commission d'Examen

MM.	L. GLANGEAUD	Président
	H. FAURE	Examinateur
	Ph. OLIVE	Rapporteur
	Y. EMSELLEM	Invité

10148572

A V A N T - P R O P O S

Au moment de soumettre mon travail à l'appréciation du jury, c'est un agréable devoir d'adresser mes plus sincères remerciements à ceux qui m'ont guidé ou aidé dans sa réalisation.

A Monsieur le Professeur Louis Glangeaud, Membre de l'Institut qui, à ma sortie de l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures de Paris, m'a accepté dans son laboratoire de Thonon où j'ai trouvé tout ce qui était nécessaire à l'accomplissement de mon travail, et pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury.

A Monsieur le Professeur Hugues Faure qui a bien voulu examiner et juger ce travail.

A Monsieur Yves Emsellem, Directeur du Laboratoire d'Hydrogéologie Mathématique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris où je travaille actuellement, qui m'a permis de compléter cette étude grâce aux moyens de calcul qu'il a mis à ma disposition et qui a bien voulu accepter de faire partie du jury.

Philippe Olive et Michel Meybeck ont été pendant trois ans à Thonon mes collègues dans l'équipe qui s'est penchée sur l'étude du Léman. Philippe Olive a installé un ensemble de mesure du tritium dans les eaux et entrepris des études dans les divers domaines où l'usage de cet isotope semblait devoir être fructueux. Il a en particulier commencé l'échantillonnage du Léman en 1964. Michel Meybeck a étudié la sédimentologie et la chimie du Léman. Nos travaux sur le lac ont toujours été mené de concert et je voudrais qu'ils trouvent ici le témoignage de mon amitié.

Mon séjour au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon m'a permis d'aborder d'autres aspects du cycle de l'eau et je tiens à exprimer mes remerciements à tous ceux avec qui j'ai travaillé, en particulier Michel Bakalowicz, Edith Crouzet, Adrien Marcé, Jean-Marie Martin et Erik Siwertz.

Ce travail doit beaucoup à Gilbert Olivier qui a effectué l'ensemble des prélèvements et à toujours tenu de main de maître la barre du "Moïse", Suzanne Chessel qui a réalisé au laboratoire les analyses de tritium. Qu'ils acceptent mes plus sincères remerciements.

La réalisation technique de ce travail a été assurée par Robert Carrier, Anne-Marie Chiara, Martine Lecraz et Jeanne Tessier. Je les remercie bien sincèrement de leur soin et de leur diligence.

Enfin, que toute l'équipe du Centre de Recherches Géodynamiques, ainsi que tous mes amis de Thonon sachent ici combien leur amitié m'a été précieuse pendant les trois années que j'ai eu le plaisir de passer à Thonon.

INTRODUCTION

Depuis que l'usage des isotopes s'est développé dans toutes les études concernant l'eau, on a vu apparaître dans la littérature limnologique d'abord des mesures isolées de teneurs en tritium dans certains lacs, souvent difficilement interprétables, puis de véritables études limnologiques utilisant le tritium comme moyen d'investigation.

Parmi les études réalisées en France nous citerons, bien entendu, l'étude de BLAVOUX et OLIVE (1966) sur le Léman, dont cette thèse est le prolongement, et le travail d'ALVINERIE et al (1966) qui ont mis en évidence par le tritium la stagnation des eaux de la couche profonde (monimolimnion) du lac Pavin.

Certains travaux comme ceux de PAYNE (1970) sur le lac Chala (Kenya) pour une étude de bilan, ou de BARRY et al (1970) sur le lac Perch (Canada) pour l'étude de l'évaporation ont été réalisés sur des eaux dont les teneurs sont artificiellement augmentées. Si elles permettent des études spécifiques, ces méthodes présentent l'inconvénient de masquer, du moins dans un certain périmètre, le cycle du tritium issu de la haute atmosphère et donc d'en interdire l'usage.

L'étude qui éveille le plus de curiosité est sans doute celle que SOIFER et al (1966) ont entreprise sur le lac Baïkal. En effet, le lac Baïkal, avec sa profondeur maximale de plus de 1 600 mètres et ses 22 000 kilomètres cubes de volume est le plus grand lac du monde. Les premiers résultats, portant sur les teneurs de 3 verticales au cours de deux étés consécutifs (1964 et 1965) sont extrêmement intéressants, mais malheureusement aucune mesure des teneurs des affluents n'a été faite et aucune nouvelle publication n'a à notre connaissance complété cette première étude.

La note que BLAVOUX et OLIVE (1966) ont publiée sur le Léman se fondait sur une cinquantaine d'analyses de teneurs en tritium d'eaux prélevées dans le lac en 1964 et 1965. A leur suite, nous avons pu disposer dans le présent travail de plus de cinq cents mesures de teneurs en tritium dans le lac et de plus de cent mesures de teneurs en tritium dans ses affluents et son effluent, les prélèvements ayant été étagés de 1964 à 1970. C'est sur ce matériel considérable que nous avons abordé, sous un jour nouveau, un certain nombre d'études sur le Léman en essayant de nous rattacher aux études classiques chaque fois que cela s'est révélé possible.

Nous nous sommes rattachés aux problèmes fondamentaux de la cinématique des eaux lacustres sur lesquels planaient un certain nombre d'inconnues. C'est ainsi que nous avons tenté d'éclaircir d'une part *les mouvements verticaux* de l'eau, liés à la thermique lacustre, d'autre part *les grandes circulations horizontales*, liées au renouvellement du lac (le mélange des eaux lacustres et fluviales en étant un aspect). Enfin nous avons cherché à préciser la notion de *temps de renouvellement* d'un lac en déterminant la répartition des temps de séjour des molécules d'eau dans un lac.

Nous n'avons par contre pas pu aborder d'études concernant les courants superficiels ou locaux, pour lesquels les échelles de temps et d'espace de notre échantillonnage n'étaient pas adaptées, et nous avons volontairement laissé de côté l'étude de l'évaporation qui, sur le Léman, ne représente annuellement que moins de 1 % du volume du lac, alors que les rivières apportent et évacuent chaque année environ 10 % du volume du lac.

Enfin il est impossible de présenter ce travail sans dire tout ce que nous devons à FOREL dont la monographie limnologique du Léman publiée au début du siècle a toujours constitué un incomparable point de référence.

PREMIER CHAPITRE

LE TRITIUM EN LIMNOLOGIE

Le mouvement des eaux dans les lacs est un phénomène essentiel qui conditionne largement leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques. De très intéressantes études sur les courants ont bien entendu été effectuées sur le Léman, mais elles n'ont porté que sur les couches superficielles et sur des courants suffisamment rapides pour être détectés par les appareils de mesure. Ce type d'étude ne rend donc pas compte du comportement global des masses d'eau, de ce que FOREL définissait comme les courants d'écoulement des lacs, échappant à la détection des appareils de mesures ou résultant du jeu contradictoire de courants élémentaires.

En fait, l'étude cinématique globale d'un lac s'appuie sur les méthodes suivantes :

- *La datation d'eaux repérées dans l'échelle spatiale.*
- *Le repérage d'eaux tracées à des instants donnés de l'échelle temps.*

La première méthode suppose des datations relatives ou absolues qui ont jusqu'ici fait défaut à l'hydrologie. La seconde suppose un traçage des eaux pour lequel plusieurs paramètres physico-chimiques de l'eau ont déjà été utilisés classiquement : température, résistivité, concentration en tel ou tel élément dissous. L'usage de ces paramètres de traçage est cependant rapidement limité par l'homogénéité thermique ou chimique rencontrée à certaines époques ou dans certains lacs. Il faut enfin signaler que l'interprétation d'une grandeur intégrative comme la résistivité devient délicate si la concentration de

plusieurs éléments dissous varie simultanément.

Depuis quelques années les méthodes isotopiques ont fait leur apparition en hydrologie et elles commencent à être appliquées en limnologie. Les méthodes isotopiques complètent les méthodes classiques en permettant de dater les eaux et de les tracer plus efficacement. C'est ainsi que sont utilisés des éléments rencontrés dans l'ensemble du cycle naturel de l'eau, isotopes stables comme le deutérium ou l'oxygène 18, ou radioactifs comme le tritium, le carbone 14 ou le silicium 32. Certaines études spécifiques reposent sur l'injection, souvent assez massive, de radioéléments.

Les isotopes radioactifs comme le *tritium*, le *carbone 14* ou le *silicium 32* sont naturellement produits dans la haute atmosphère sous l'effet du rayonnement cosmique. Mais, à l'origine naturelle s'ajoute, particulièrement pour le tritium, une origine artificielle.

Le *tritium* (symbole T), isotope radioactif de l'hydrogène de masse atomique 3 et de période proche de 12 ans, a en effet été produit massivement dans les explosions thermonucléaires effectuées depuis 1952. Les quantités de tritium naturel sont maintenant négligeables devant celles produites depuis les premières explosions thermonucléaires. Mais le tritium artificiel, comme le naturel, est rapidement intégré dans les molécules d'eau atmosphérique (sous forme de molécules HTO) et participe donc à tout le cycle naturel de l'eau (OLIVE 1970). Chaque groupe important d'explosions thermonucléaires a déterminé un maximum de teneur dans les précipitations. (Les teneurs en tritium se mesurent en unité tritium : une unité tritium correspond à 1 atome de tritium pour 10^{18} atomes d'hydrogène). On a observé de tels maximums en 1954, 1959 et 1963. Autour de ces grandes variations on observe des variations secondaires dans le temps (maximum estival, valeur particulière de chaque épisode pluvieux) et dans l'espace (effet de latitude et de continentalité). Il a été possible, en corrélant les

mesures effectuées dans diverses stations à travers le monde, de reconstituer partout les teneurs en tritium dans les précipitations depuis 1952. On dispose alors d'une *échelle de temps* allant de *quelques jours à plusieurs années* (le tritium étant radioactif des corrections de décroissance seront nécessaires). Le tritium, sous cet aspect, apparaît comme un *dateur relatif* des eaux puisque, pour dater une eau nous devrons nous repérer sur une échelle de datation, à la différence du carbone 14 ou du silicium 32 qui permettent le plus souvent des datations absolues. Le tritium n'est cependant pas seulement un élément dateur, il est intégré à la molécule d'eau elle-même et sera donc un *traceur* idéal par son adaptation aux problèmes hydrologiques.

Le tritium, en tant que *traceur* et *dateur relatif* permettra donc des études en *échelle espace* et en *échelle temps*. Il sera d'un emploi privilégié tant dans les études dynamiques générales comme les bilans que dans les études particulières comme la pénétration des rivières dans les lacs ou l'influence des sources sous-lacustres.

Nous utiliserons dans ce travail plus de six cents résultats d'analyses de teneur en tritium d'eau du Léman et de ses affluents. Toutes ces mesures ont été réalisées au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon. La méthode de mesure utilisée a été le comptage en scintillation liquide (Compteur Nuclear Chicago) après enrichissement électrolyque qui permet d'atteindre une meilleure précision de comptage.

L'électrolyse partielle de l'eau à étudier permet un enrichissement en tritium car la réduction de l'hydrogène ordinaire à la cathode est plus rapide que celle du tritium, si bien que celui-ci se concentre dans l'électrolyte au fur et à mesure que se poursuit l'électrolyse. (Ceci est tout à fait analogue à la préparation de l'eau lourde, contenant du deutérium, par électrolyse fractionnée). L'eau ainsi enrichie est ensuite mélangée à raison de 20 % avec du dioxanne à raison de 80 %. Du naphtalène et des corps scintillants en quantités minimes sont ajoutés à ce mélange.

Le rayonnement β^- du tritium excite par le truchement du dioxanne les corps scintillants qui restituent, sous forme d'éclairs lumineux l'énergie qu'ils ont reçue. Ces éclairs sont collectés par un système optique, convertis et amplifiés dans un photomultiplicateur, puis finalement comptés. Du taux de comptage on remonte à la concentration initiale, connaissant la loi de désintégration et le rendement des diverses opérations grâce à des étalons traités avec chaque série d'échantillon.

La *précision* d'une mesure de teneur en tritium dépend de nombreux facteurs mais le principal, qui détermine une limite inférieure à la précision possible est la fluctuation statistique du comptage liée à la nature même du phénomène de désintégration radioactive. En toute rigueur ces fluctuations suivent la loi de POISSON, c'est-à-dire que si $\bar{n}$ est le taux de comptage moyen déduit d'un grand nombre de comptages et n le taux de comptage d'un comptage particulier la possibilité P_n d'obtenir le taux de comptage n est :

$$P_n = (\bar{n})^n \exp(-\bar{n})/n\,!$$

La distribution des n suivant la loi de POISSON, son écart-type est égal à la racine carrée de sa moyenne.

$$\sigma_n = (\bar{n})^{1/2}$$

On écrira le résultat du comptage sous la forme :

$$n = \bar{n} \pm \sigma_n$$

En fait, la distribution n'est pas très éloignée d'une loi de GAUSS, ce qui signifie que la probabilité pour qu'un taux de comptage particulier soit compris entre $\bar{n} - \sigma_n$ et $\bar{n} + \sigma_n$ est voisine de 0,7. Nous admettrons qu'il en sera de même en concentration et nous écrirons le résultat d'une analyse sous la forme :

$$\chi = \bar{\chi} \pm \sigma_\chi$$

puisque les fluctuations statistiques constituent la principale source d'erreur. Nous définirons alors la *précision relative* de la mesure en % par le rapport $\sigma_\chi/\bar{\chi}$. Cette précision n'est autre que le *coefficient de variation* de la concentration qui mesure la dispersion relative des concentrations déduites de divers comptages d'un même échantillon.

En fait, d'autres causes d'erreurs existent, notamment celles dues à l'incertitude sur le rendement du comptage et à l'incertitude sur l'enrichissement électrolytique. En définitive la précision relative des mesures réalisées en routine au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon se situe entre 5 et 10 % suivant la valeur des concentrations mesurées. Nous admettrons une erreur relative moyenne de l'ordre de 7 % et c'est pourquoi, bien que nous attachions beaucoup d'importance à ces incertitudes, nous n'avons pas reporté les barres d'erreurs sur les tableaux de mesures pour ne pas les alourdir.

En effet, il est capital de toujours avoir en tête les erreurs de mesures, particulièrement dans une étude de ce type car le plus souvent le tritium tirera sa valeur en limnologie du fait qu'il permettra de *différencier* des eaux alors même que leur caractéristiques physico-chimiques seront identiques. Il faudra donc apprécier, en tenant compte des erreurs de mesure, si la dispersion des concentrations de 2 ou plusieurs eaux est significative. Soient par exemple n concentrations $C_1, C_2, \ldots, C_i, \ldots C_n$. Pour faciliter le raisonnement supposons, ce

qui est pratiquement vérifié dans cette étude, que toutes les teneurs en tritium sont déterminées avec la même précision relative $p = pi = \Delta Ci/Ci$.

On pourra calculer la moyenne $\bar{C}$ et l'écart type σ_c de ces n concentrations, et le coefficient de variation $V = \sigma_C/\bar{C}$. La dispersion sera significative si le coefficient de variation est supérieur à la précision p des mesures, car dans le cas contraire les n concentrations C_i pourraient être les résultats de n comptages d'une même eau. Si nous n'avons que deux concentrations à comparer, l'application de cette méthode nous conduit à dire que la différence est significative si les barres d'erreurs des deux concentrations sont disjointes. De cette manière nous déterminons une sorte de "*limite de résolution*" au-delà de laquelle il devient illusoire de vouloir différencier des eaux par leur teneur en tritium.

La notion de coefficient de variation revêt une autre importance qui nous conduira à l'utiliser souvent dans cette étude. Il ne permet pas seulement la comparaison à un "étalon" constitué par l'erreur relative des mesures qui est étranger aux phénomènes que nous entendons étudier. Il permettra surtout de *comparer entre elles des distributions de teneurs*. En effet l'*écart-type* d'une distribution mesure sa *dispersion*. La division de l'écart-type d'une distribution par la moyenne de cette distribution nous donne le coefficient de variation qui apparaît donc comme une sorte d'*écart-type unitaire* permettant *la comparaison des dispersions* de plusieurs distributions.

Nous avons dans ce travail utilisé les coefficients de variation de deux façons.

En les calculant à des *instants donnés* dans un *domaine*, le plus souvent une verticale, ce qui nous permet d'étudier l'*évolution* au cours du temps de l'*homogénéité* de ce domaine.

En les calculant en des *points donnés* pour une *période de temps*. Nous avons alors là un *indicateur de renouvellement*, car des variations de teneur en tritium ne peuvent provenir que d'un mouvement des eaux (au sens le plus général, y compris la diffusion), la réciproque n'étant pas nécessairement vraie mais très improbable à l'époque où se situe l'étude, les teneurs en tritium des apports ayant continuellement varié dans un rapport de 1 à 5 environ.

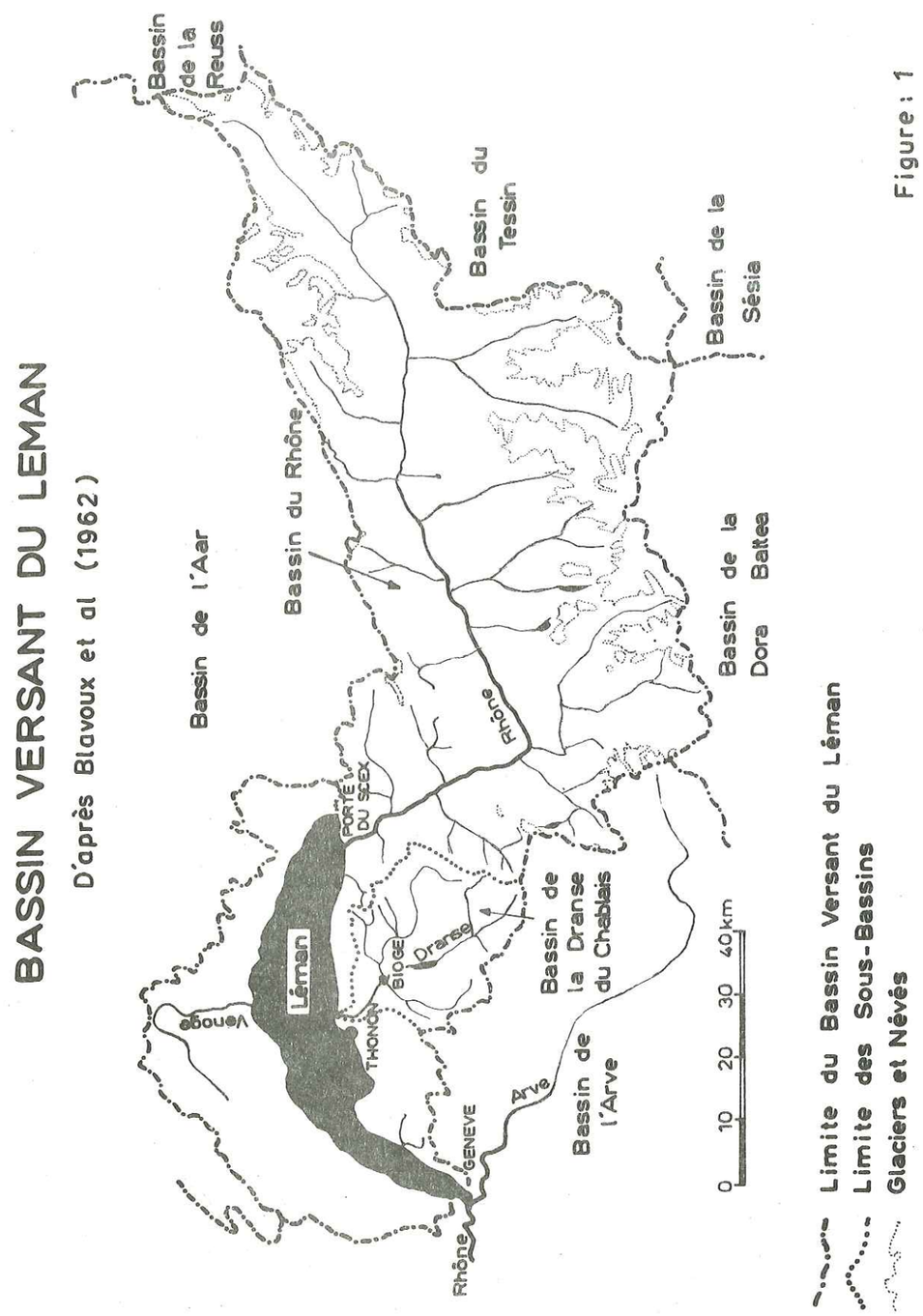


Figure : 1

DEUXIEME CHAPITRE

LE BASSIN VERSANT DU LEMAN

Il est impossible de séparer un lac de son bassin versant. C'est pourquoi on introduit souvent le concept de *système limnologique* constitué des deux entilés : lac et bassin versant, opposées et complémentaires. Le bassin versant du Léman est représenté sur la figure 1. Sa superficie est de près de 8 000 km^2. Nous étudierons d'abord ici les affluents sous l'angle qui nous intéresse particulièrement : leurs apports de tritium au Léman.

Les deux principaux affluents du Léman sont le *Rhône du Valais* (bassin de 5 221 km^2 soit 71 % du bassin d'alimentation du Léman) et la *Dranse du Chablais* (bassin de 536 km^2 soit 7 % du bassin d'alimentation du Léman. Les débits moyens du Rhône du Valais (mesuré à la porte du Scex) et de la Dranse (mesuré au pont de Bioge) sont respectivement de 181 m^3/s et de 21 m^3/s. Ces deux rivières apportent donc en moyenne près de 90 % de l'alimentation du lac par les rivières et ruisseaux, les petits affluents apportant en moyenne 1, 6 fois le débit de la Dranse (BLAVOUX et al 1962). C'est pourquoi, pour ne pas multiplier les analyses de teneurs en tritium des affluents, nous nous sommes contentés de prélever des échantillons dans ces deux rivières, aussi régulièrement que possible et en tenant compte des phénomènes exceptionnels tels que les crues.

L'ensemble des résultats des analyses sur le Rhône et la Dranse sont reportés en annexe mais nous avons calculé les teneurs moyennes pondérées de ces deux rivières pour chaque année où nous disposions de suffisamment de mesures. Les étapes de ce calcul sont reportées sur les tableaux 1 et 2 où nous avons également calculé les

TABLEAU 1

APPORTS DE TRITIUM DU RHONE (Porte de Scex)

(en UT x km^3)

Mois	1965			1966			1967			1968		
	$\bar{Q}$	$\bar{T}$	k	$\bar{Q}$	$\bar{T}$	k	$\bar{Q}$	$\bar{T}$	k	$\bar{Q}$	$\bar{T}$	k
Janvier	79,5	625	133	97,9	590	155	96	400	103	103	250	67
Février	81,8	595	118	134	560	182	109	400	106	108	270	76
Mars	93,6	575	144	123	515	170	118	365	115	111	260	75
Avril	100	610	159	158	445	183	139	365	132	158	250	103
Mai	173	685	318	284	410	312	208	340	189	195	230	117
Juin	304	740	585	417	445	482	320	275	229	265	220	152
Juillet	327	730	640	317	425	361	385	280	289	285	190	141
Août	267	710	508	277	380	282	319	290	248	223	270	157
Septembre	175	665	303	187	395	182	173	295	133	191	270	134
Octobre	120	635	204	140	420	158	136	305	111	115	250	75
Novembre	99,8	610	158	101	400	105	115	290	86	132	240	82
Décembre	106	595	169	97,7	385	106	105	255	72	103	230	62
		K = 3 440			K = 2 680			K = 1 810			K = 1 240	

TABLEAU 2

APPORTS DE TRITIUM DE LA DRANSE

(en UT x km^3)

Mois	1965			1966			1967			1968		
	$\bar{Q}$	$\bar{T}$	k	$\bar{Q}$	$\bar{T}$	k	$\bar{Q}$	$\bar{T}$	k	$\bar{Q}$	$\bar{T}$	k
Janvier	8,5	900	20,4	19,7	510	26,9	11,2	340	10,2	11,5	250	7,5
Février	8,4	775	15,7	34,5	570	47,6	15,9	335	12,9	15,0	300	11,7
Mars	22,4	620	37,2	22,1	530	31,4	31,2	320	26,8	17,8	275	12,7
Avril	23,9	600	37,3	51,7	440	59,1	23,2	340	20,5	46,3	230	27,7
Mai	39,8	640	68,3	69,8	420	78,6	39,7	390	41,5	39,1	205	20,8
Juin	28,4	645	47,6	37,2	425	41,1	29,6	360	27,7	20,2	240	12,6
Juillet	26,8	665	47,8	22,6	420	25,4	14,0	250	9,4	15,6	240	9,7
Août	16,7	750	33,6	19,7	410	21,6	6,1	275	4,4	38,0	250	24,7
Septembre	25,9	840	56,6	9,2	400	9,6	6,7	250	4,5	42,1	250	27,4
Octobre	10	775	20,7	7,4	400	7,9	7,2	225	4,2	18,0	210	9,8
Novembre	18,2	600	28,4	9	380	8,8	19,7	205	10,2	12,1	230	7,2
Décembre	32,5	530	46,2	18,8	355	17,9	11,2	210	6,3	9,1	280	6,6
		K = 460			K = 380			K = 180			K = 180	

TENEURS MOYENNES PONDEREES EN UT

Année	Rhône du Valais	Dranse du Chablais
1965	680	670
1966	430	450
1967	310	320
1968	250	240
1969	200	—

Tableau : 3

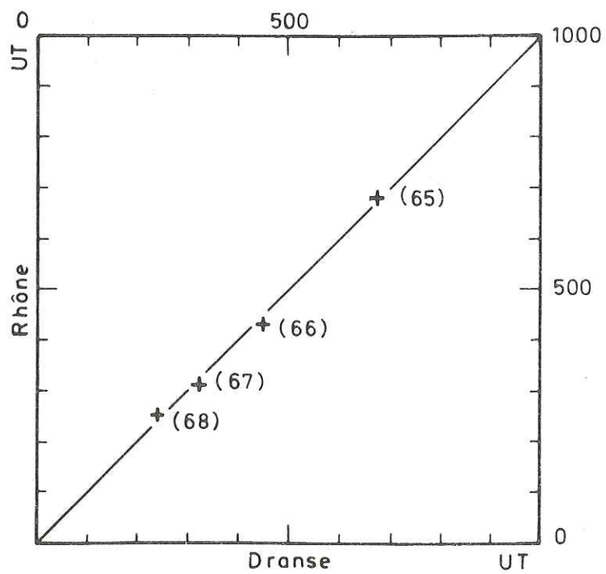


Figure : 2

quantités de tritium apportées chaque année par le Rhône et la Dranse. Sur ces tableaux, pour chaque année nous portons successivement pour chaque mois le débit moyen mensuel $\bar{Q}$ (fourni par l'Office Fédéral de l'Economie Hydraulique à BERNE pour le Rhône, par l'électricité de France pour la Dranse), la teneur moyenne mensuelle $\bar{T}$ en tritium (calculée à partir de données ponctuelles) et la quantité de tritium apportée par le fleuve pendant ce mois, soit k exprimée en UT x km^3 (en effet, l'unité tritium est une unité de concentration. Une unité de quantité de tritium sera donc le produit d'une unité de concentration en tritium par une unité de volume. L'unité UT x km^3 est commode pour les quantités que nous avons à traiter dans le Léman et ses affluents). En bas de chaque tableau nous avons porté sous la troisième colonne $K = \Sigma k$, quantité totale de tritium apportée dans l'année (arrondie à la dizaine la plus proche). Les valeurs des teneurs pondérées annuelles du Rhône Valaisan et de la Dranse sont par ailleurs reportées sur le tableau 3 et sur la figure 2. Nous avons fait figurer les teneurs moyennes pondérées annuelles du Rhône en fonction de celles de la Dranse. Cette représentation nous est suggérée par la grande similitude des valeurs de la Dranse et du Rhône observées sur le tableau. On constate que l'écart entre la relation réelle (les croix de la figure 2) et la relation d'identité représentée par la droite en trait fin est extrêmement faible, bien inférieure aux erreurs de mesure. Pratiquement nous pourrons donc confondre les teneurs pondérées annuelles du Rhône, de la Dranse et, par extension des autres affluents du lac. Cette quasi identité des teneurs en tritium des eaux du Rhône et de la Dranse est quelque peu étonnante vu les différences existant entre les deux bassins. En particulier près du quart du bassin versant du Rhône est constitué par des glaciers totalement absents sur le bassin de la Dranse. Il est donc probable qu'il ne s'agit que d'une coïncidence (HUBERT et al 1970).

Nous possèdons donc les caractéristiques isotopiques des apports au Léman pour 5 années. Mais ces eaux ne constituent qu'une partie des eaux du Léman où les eaux séjournent en moyenne 11 années.

Il serait donc très utile de connaître la teneur des apports antérieurs à 1965. Nous avons donc tenté une sorte d'extrapolation ou plus exactement tenté d'établir un mode de calcul de ces teneurs.

En effet, il est possible (BOSCH et al 1970) de reconstituer dans nos régions les teneurs des précipitations depuis le début de la période thermonucléaire à partir des mesures locales mais limitées dans le temps d'une part, de l'ensemble des mesures faites sur la surface du globe sur des périodes plus vastes d'autre part. Ce sont ces précipitations qui alimentent, selon un processus complexe, les rivières par infiltration et ruissellement. Ce sont donc les teneurs des précipitations qui en fonction des données météorologiques et hydrogéologiques détermineront les teneurs des rivières.

Nous avons pu (HUBERT et al 1970), précisément sur les Bassins de la Dranse du Chablais et du Rhône Valaisan mettre en évidence une expression simple de cette fonction de transfert entre caractéristiques isotopiques des précipitations et des eaux fluviales. La validité du modèle proposé s'exprime par la concordance observée entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées pour les cinq années où des mesures ont été effectuées (1965-1969). Cette concordance n'a bien entendu de sens qu'à l'ordre de grandeur des erreurs de mesure de la teneur pondérée annuelle d'une rivière qui cumule les erreurs de détermination des teneurs en tritium et l'incertitude sur les débits soit environ 10 à 15 % en valeur relative.

L'expression mathématique des teneurs moyennes annuelles à l'exutoire des bassins est la suivante :

$$S_n = \sum_{i=0}^{i=\infty} \alpha (1 - \alpha)^i E_{n-i}$$

où α est un coefficient compris entre 0 et 1, caractéristique du

bassin, et E_{n-i} est la teneur de la recharge des eaux souterraines pour l'année n-i, teneur qui se déduit de celles des précipitations.

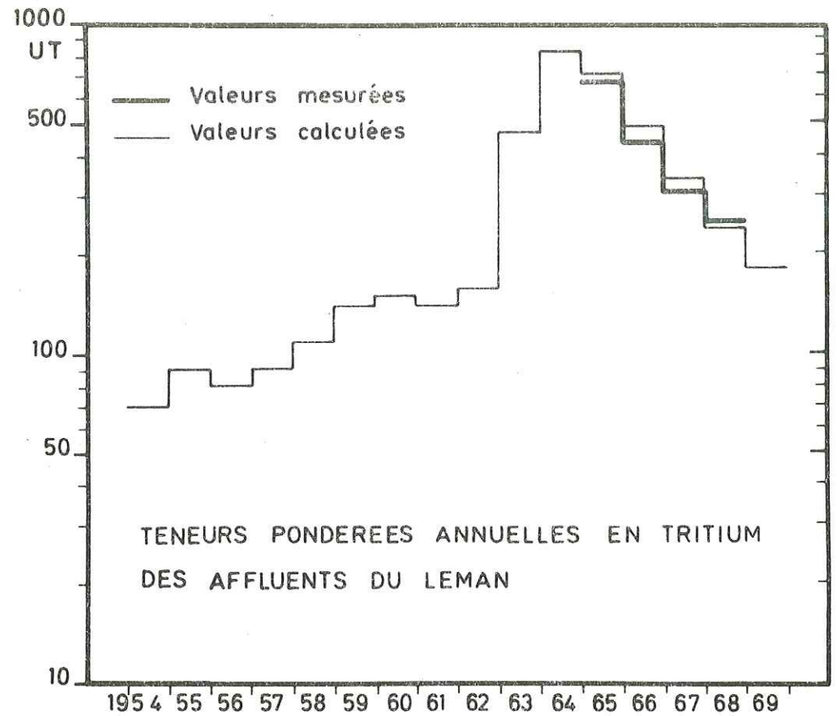


Figure : 3

Nous avons porté sur la figure 3 les teneurs moyennes mesurées des apports au Léman de 65 à 69 (en trait fort), ainsi que les valeurs calculées, sur la base de notre modèle, des teneurs moyennes des apports au Léman. Ces dernières valeurs que nous avons appelées S_n (n rappelant l'année à laquelle la teneur est relative) sont reportées sur le tableau 4. Mais comme ces teneurs évoluent dans le temps par suite de la décroissance radioactive du tritium, nous avons reporté les valeurs S_{on} qui sont les valeurs de S_n ramenées à 1968. En effet, c'est en 1968, qu'ont eu lieu les principales campagnes sur lesquelles s'appuie notre travail.

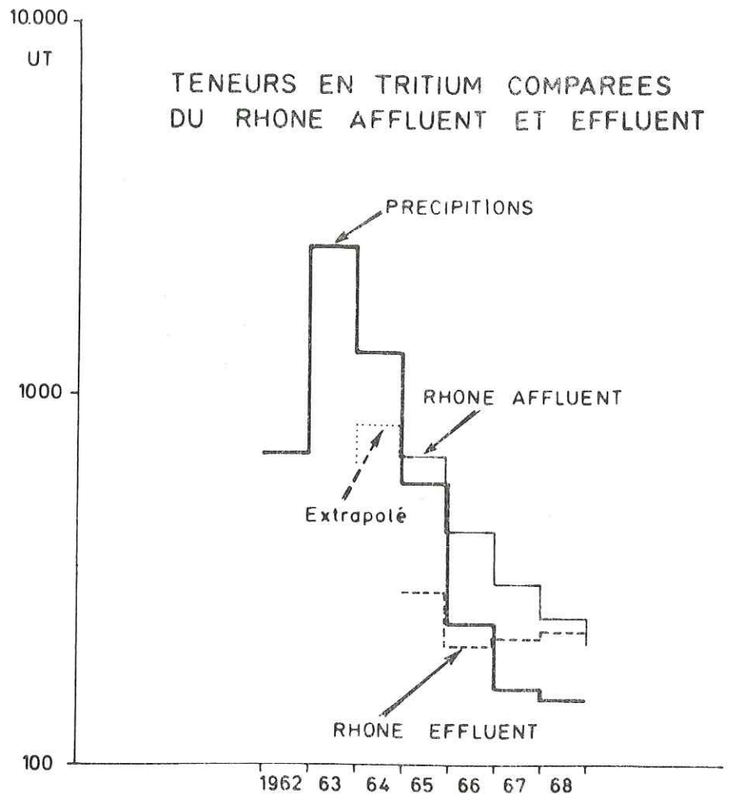


Figure : 4

TABLEAU 4

n	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969
S_n	70	90	80	90	110	140	150	140	160	470	830	710	490	340	240	180
S_{on}	30	40	40	50	60	85	95	95	115	350	660	600	440	320	240	/

Nous avons également régulièrement prélevé à Genève, extrémité du lac, à proximité de l'émissaire. Les valeurs proprement dites sont reportées en annexe, les calculs de teneurs pondérées le sont sur le tableau 5, construit sur le même modèle que les tableaux 1 et 2. Ces valeurs nous serviront essentiellement dans le calcul du bilan tritium, mais nous pouvons d'ores et déjà remarquer que les variations de teneur sont beaucoup plus faibles à Genève qu'à l'entrée du lac. Nous avons porté les teneurs moyennes annuelles dans les précipitations, les teneurs pondérées annuelles du Rhône à l'entrée du lac et à Genève sur la figure 4. On remarque un retard des maxima : 1963 dans les précipitations, 1964 à l'entrée et à la sortie du lac, mais surtout un aplatissement des courbes de variations dans le temps. Comme les eaux souterraines, le lac tamponne les teneurs en tritium. Il a une inertie notion que nous tenterons de préciser plus bas.

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
18 AOUT 2003

TABLEAU 5

TRITIUM DANS LE RHONE (Genève)

Mois	1965			1966			1967			1968		
	$\bar{Q}$	$\bar{T}$	k	$\bar{Q}$	$\bar{T}$	k	$\bar{Q}$	$\bar{T}$	k	$\bar{Q}$	$\bar{T}$	k
Janvier	135	150	54,3	265	195	139	190	220	112	232	205	124
Février	129	175	54,6	273	165	109	196	205	97	251	210	137
Mars	157	200	81,6	209	145	81,2	279	210	157	178	210	97
Avril	199	160	85,3	247	140	89,9	208	205	111	181	212	100
Mai	210	170	92,8	382	155	159	246	200	132	248	216	139
Juin	324	225	195,4	423	215	236	321	210	175	261	220	149
Juillet	447	300	348,7	376	260	262	423	225	255	309	225	181
Août	343	375	344,7	314	285	240	364	250	244	327	230	196
Septembre	294	425	324,9	223	265	154	214	260	145	334	240	209
Octobre	199	420	224,0	172	275	127	174	245	114	195	250	127
Novembre	172	375	167,7	152	260	103	211	220	121	187	290	141
Décembre	322	270	233	155	235	98	147	205	81	159	290	120
		K = 2 200			K = 1 800			K = 1 700			K = 1 700	
Teneurs moyennes pondérées annuelles en UT		290			210			220			230	

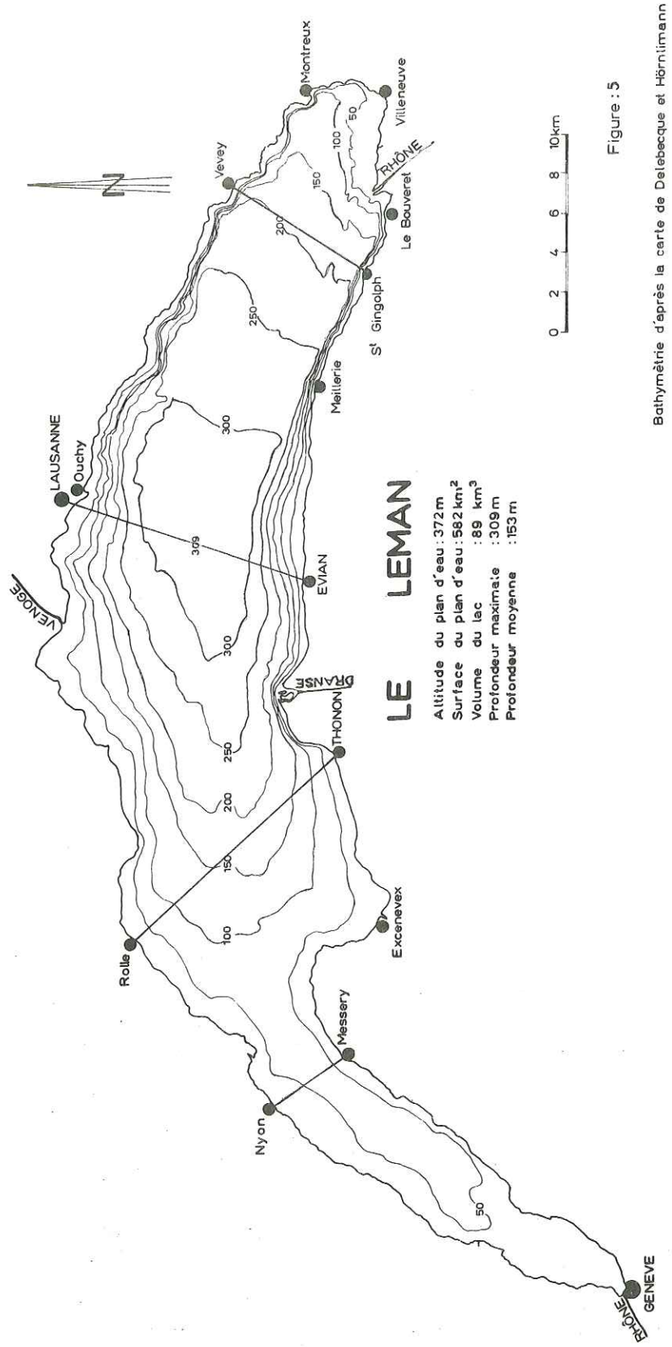


Figure : 5

Bathymétrie d'après la carte de Delebecque et Hörnlimann

TROISIEME CHAPITRE

LE TRITIUM DANS LE LEMAN

Le Léman est un des plus grand lac d'Europe avec un volume de 89 km^3, une surface de 582 km^2 et un périmètre de 167 km. On le sépare généralement en *Petit Lac* ou lac de Genève peu profond (40 m) à l'Ouest du détroit de Promenthoux et en *Grand Lac* d'une profondeur moyenne de 172 m. Le *Haut Lac* est la partie du lac situé près de l'embouchure du Rhône, à l'Est d'une ligne Saint-Gingolph-Vevey. Le fond du Grand Lac est constitué par une *plaine centrale* de 12 km sur 6, à 309 mètres de profondeur, soit seulement 63 mètres au-dessus du niveau de la mer. La carte bathymétrique a été levée pour la première fois de 1886 à 1889 par HORNLIMAN pour la partie Suisse et DELEBECQUE pour la partie Française. Nous en reproduirons sur la figure 5, une version "abrégée". Nous avons reporté sur le tableau 6 les principaux paramètres géométriques du Léman dans son ensemble ainsi que du Grand et du Petit Lac. La répartition des volumes par tranche de profondeur calculée par HUBAULT (1947), est reportée sur le tableau 7.

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les deux principaux affluents du Léman sont le Rhône du Valais et la Dranse du Chablais, le débit de l'émissaire, le Rhône, étant régulé à Genève suivant les apports des affluents. La pénétration du Rhône dans le Léman a provoqué la formation d'une *vallée sous-lacustre* de 15 kilomètres de long et 30 m de profondeur, analogue aux canyons sous-marins. Elle se termine dans la plaine centrale où l'épaisseur des sédiments atteint 250 m (MEYBECK et al 1969). Le lac se comble d'ailleurs peu à peu, surtout à l'occasion de crues exceptionnelles (HUBERT et al 1970), qui à elles seules peuvent lui amener autant de

TABLEAU 6

	Profondeur maximale m	Profondeur moyenne m	Volume km^3	Volume %	Surface km^2	Surface %	Périmètre km
Léman	309	155	89	100	582	100	167
Petit Lac	76	41	3	3,4	79	14	
Grand Lac	309	172	86	96,6	503	86	

TABLEAU 7

LAC LEMAN. VOLUME PAR TRANCHES DE PROFONDEUR

D'après Hubault (1947)

Tranche de profondeur m	Pourcentage du volume total	Volume de la tranche (km^3)
0 - 20	12,6	11,2
20 - 40	11,5	10,2
40 - 60	10,4	9,6
60 - 80	9,1	8,1
80 - 100	8,3	7,4
100 - 120	7,6	6,8
120 - 140	6,9	6,1
140 - 160	6,3	5,6
160 - 180	5,8	5,2
180 - 200	5,2	4,6
200 - 220	4,6	4,1
220 - 240	3,9	3,5
240 - 260	3,2	2,8
260 - 280	2,5	2,2
280 - 300	1,9	1,7
300 - 310	0,2	8,2

matériaux que toute une année normale.

L'origine du Léman est certainement ancienne. Un premier lac devait exister avant le quaternaire dans une dépression d'origine tectonique. L'érosion des glaciers et des rivières a ensuite modelé le relief sous-lacustre tel que nous le connaissons.

Du point de vue thermique, le Léman a été successivement qualifié de lac *tropical* (FOREL), de lac *subtropical* (YOSHIMURA, RUTTNER), de lac *chaud* (VIVIER). Au-delà du jargon des limnologues, c'est simplement un lac qui ne gèle jamais et dont la température ne descendra pas, dans son ensemble, en-dessous de 4°C, ce qui lui confère toujours, s'il y en a, une stratification thermique directe.

Les eaux du Léman sont peu minéralisées (0,210 g/l contre 35 g/l à l'eau de mer). Les ions dissous, qui sont essentiellement des *bicarbonates* et des *sulfates de calcium et de magnésium*, proviennent du lessivage de son grand bassin versant (MEYBECK 1970).

Depuis que la colonisation des rives et du bassin du Léman est devenue importante, la pollution d'origine humaine, industrielle ou agricole a augmenté et malgré des efforts entrepris pour épurer les eaux usées on observe des traces de pollution proprement dite mais surtout un vieillissement accéléré du lac (*Eutrophisation*). Cela se traduit par une diminution de l'oxygène dissous, surtout en profondeur, une baisse de la transparence des eaux ainsi que par la perturbation du cycle de la transparence. On a pu noter l'apparition de microbes fécaux dans tout le lac et des changements dans le peuplement animal et végétal du lac.

Les points de prélèvements d'eau dans le Léman ont été reportés sur la carte de la figure 6. Ces prélèvements ont souvent été effectués conjointement à ceux de la *commission internationale pour*

la protection des eaux du Léman et du Rhône contre la pollution, commission à laquelle participe le *Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon*. Les premiers prélèvements ont été effectués au point CRG 10, au centre du lac dont la profondeur est de 310 m, pendant l'année 1964

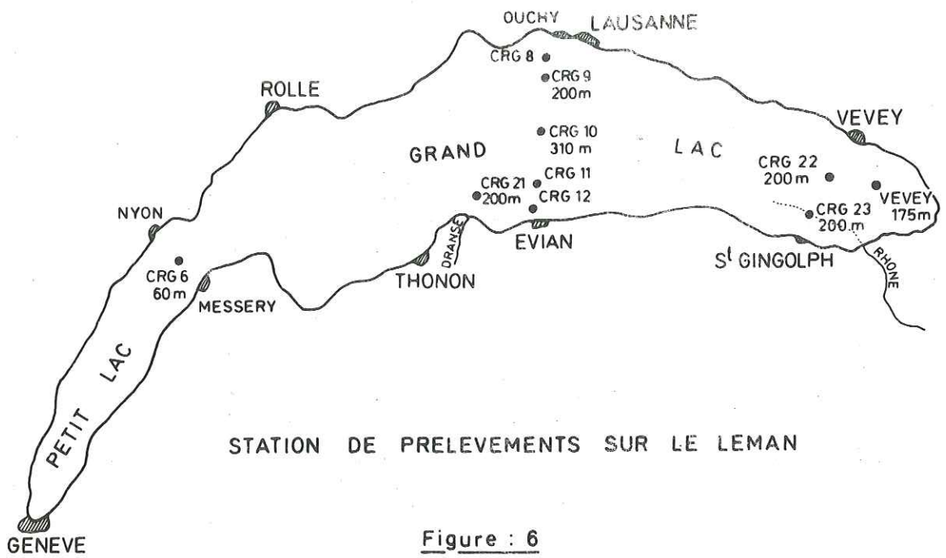


Figure : 6

et ont été poursuivis régulièrement jusqu'en 1969. Ce point est, on le verra, représentatif de près de 70 % des eaux du lac et l'étude de son comportement est le pivot de ce travail. Les points CRG 6 (profondeur 60 m) à l'entrée du Petit Lac et Vevey (profondeur 200 m) dans le Haut Lac ont été échantillonnés principalement en 1966 et 1967. Ils nous ont permis de confirmer et de compléter les résultats obtenus sur le point CRG 10. Les deux couples de points de prélèvements CRG 22 - CRG 23 (profondeur 200 m) dans le Haut Lac, CRG 21 - CRG 9 (profondeur 200 m) dans le Grand Lac, introduits en 1968, ont respectivement permis l'étude de la pénétration et du mélange, à proximité de leur embouchure, des eaux du Rhône et de la Dranse dans le Léman.

Nous avons prélevé dans la zone du delta de la Dranse et dans le Haut Lac en des points où aucun prélèvement régulier n'était effectué à l'occasion de campagnes particulières (figures 11 et 16). Enfin, nous avons utilisé épisodiquement des points tels que CRG 8, CRG 11 ou CRG 12 sur la transversale EVIAN-OUCHY.

Les profondeurs de prélèvement en chaque point étudié ont été standardisées dans la plupart des cas. Les échantillons ont donc en principe été prélevés à 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200, 250 mètres et de toutes façons à 1 m au-dessus du fond. Nous avons serré les prélèvements dans les cinquante premiers mètres car c'est dans cette zone que se développent les plus fortes amplitudes thermométriques dont nous voulions étudier l'importance dans le mouvement des eaux.

L'ensemble de tous les résultats d'analyses de teneur en tritium des eaux du Léman est reporté en annexe. Les mesures sont répertoriées par point. Pour chaque point un tableau à double entrée, date et profondeur, permet de trouver la mesure désirée. C'est à ce catalogue que nous ferons, souvent implicitement, appel dans cette étude.

Notre premier travail a été de nous rendre compte de la *représentativité* de notre échantillonnage. Nous pensons qu'il est possible de l'apprécier sur trois exemples que nous développerons ici.

C'est au point CRG 10 que le problème de la représentativité de l'échantillonnage se trouve être le plus aigu. En effet, ce point est comme nous l'avons déjà signalé le pivot de notre étude. Nous avons donc effectué (figure 7), trois coupes transversales du lac entre Evian et Ouchy à des périodes différentes de l'année, Juin 1964, Novembre 1967, Septembre 1968 et nous y avons tracé, en nous permettant d'ajouter un mot à la langue française, les courbes *isotrotites* 100 et 200 UT, c'est-à-dire les lignes joignant les points d'égale

TENEURS EN TRITIUM DES TRANSVERSALES A OUCHY

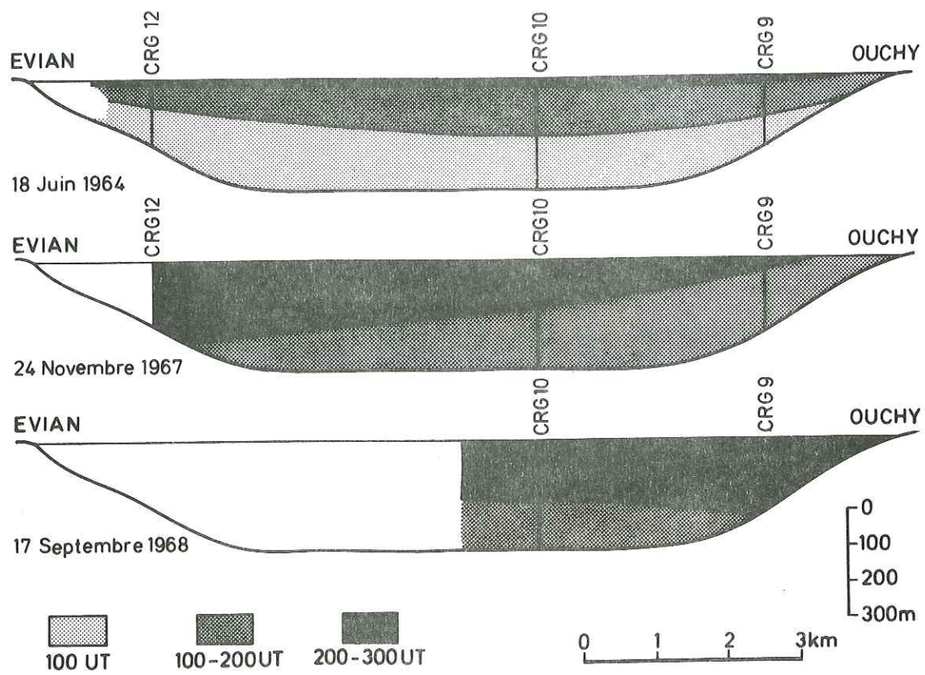


Figure : 7

teneur 100 ou 200 UT. On observe une stratification des eaux, au point de vue du tritium, très nette en Juin 1964 et en Septembre 1968, acceptable en Novembre 1967. Nous pensons donc être autorisés à affirmer la représentativité du point CRG 10, non seulement pour son voisinage mais pour toute la partie transversale du Grand Lac. Cela est extrêmement important car le volume d'eau intéressé représente environ 70 % du volume total des eaux du lac.

Les points CRG 22 et CRG 23, dans le Haut Lac, sont proches l'un de l'autre, tous les deux ont la même profondeur. On peut donc penser que leur comportement sera similaire, mais l'un d'eux (CRG 23) se trouve au-dessus du canyon sous-lacustre du Rhône, alors que l'autre (CRG 22) se trouve à l'extérieur de celui-ci. Nous avons groupé les prélèvements par couples dont le premier élément est un prélèvement à CRG 23 à une certaine profondeur et à une certaine date et dont le second élément est le prélèvement à CRG 22 à la même profondeur et à la même date. Nous avons ainsi obtenu 19 couples de prélèvements et, par conséquent 19 couples de teneurs en tritium. Ces 19 couples de valeurs ont été reportés sur le tableau 8 et sur la figure 8. Le coefficient de corrélation linéaire des 19 couples de valeurs est égal à 0,66 ce qui signifie une liaison fonctionnelle médiocre, mais si nous supprimons parmi ces 19 couples les 5 couples qui correspondent à des prélèvements de fond, le coefficient de corrélation linéaire devient égal à 0,82 ce qui correspond donc à une liaison fonctionnelle beaucoup plus forte. Cela prouve que le fond mis à part, les deux points CRG 22 et CRG 23 ont un comportement assez comparable. Mais le fond de CRG 23, dans le canyon, et le fond de CRG 22, à l'extérieur du canyon ont eux, des comportements très dissemblables. Ce dernier fait, a été confirmé par la mise en évidence de courants de turbidité.

Nous avons comparé de façon analogue le point CRG 21 et le point CRG 9. CRG 21 est situé face à l'embouchure de la Dranse. CRG 9 est situé face à Lausanne. Ces deux points, de même profondeur 200 m

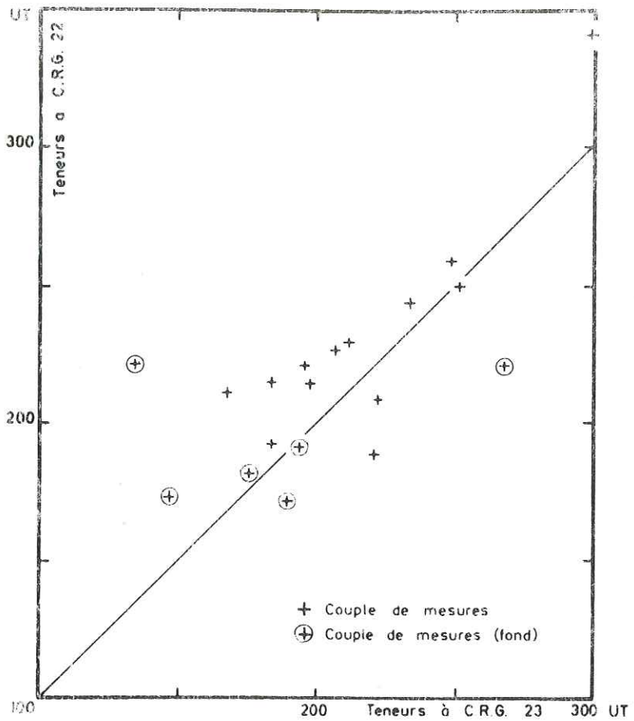


Figure : 8

	r = 0.66																	
C.R.G. 22	221	173	221	182	192	172	193	244	340	215	227	189	230	260	250	206	211	208	221
C.R.G. 23	136	147	268	175	194	187	184	234	300	184	207	221	211	259	252	221	167	201	196
	fond						r = 0.82											

Tableau : 8

COMPARAISON DES TENEURS A C.R.G. 22 - 23

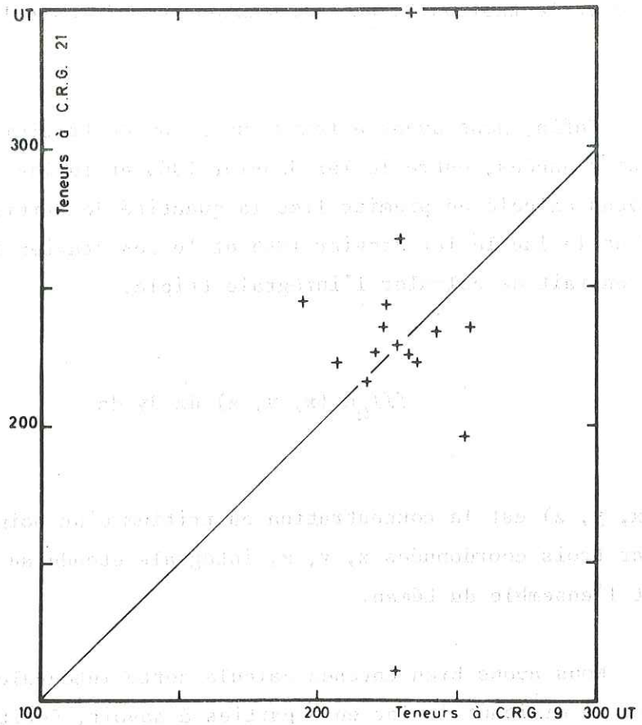


Figure 9

C.R.G. 9	234	221	230	224	256	236	218	226	233	243	195	208	229	253	228
C.R.G. 21	349	227	268	236	236	223	216	244	226	234	245	223	226	196	111

Tableau : 9

COMPARAISON DES TENEURS A C.R.G. 21 - 9

étant situés symétriquement par rapport à l'axe du lac devrait, en raison de l'homogénéité transversale du lac se comporter de façon analogue. Mais la Dranse est cause de perturbations au point CRG 21, car les 15 couples de valeurs que nous possèdons, reportés sur la figure 9 et le tableau 9, ne représentent pas de corrélation sensible.

Enfin, nous avons effectué un bilan du tritium dans le lac sur quatre années, entre le 1er Janvier 1965 et le 1er Janvier 1969. Nous avons calculé en premier lieu la quantité de tritium se trouvant dans le lac le 1er Janvier 1965 et le 1er Janvier 1969. Il s'agit en fait de calculer l'intégrale triple.

$$\iiint_{\Omega} c\ (x, y, z)\ dx\ dy\ dz$$

où c (x, y, z) est la concentration en tritium d'un point du lac repéré par trois coordonnées x, y, z, intégrale étendu au domaine Ω qui est l'ensemble du Léman.

Nous avons bien entendu calculé cette intégrale de façon approchée, en divisant le lac en 6 parties à savoir, Petit Lac, partie centrale du lac divisée en 3 couches (0-50 m, 50-200 m, 200 fond), Haut Lac divisé en deux couches (0-50 m, 50 fond). Nous avons attribué à ces 6 parties la moyenne des valeurs observées dans ce domaine à des dates très rapprochées des bornes du bilan (lorsque de telles valeurs faisaient défaut, nous avons utilisé les moyennes de valeurs observées de part et d'autre des bornes du bilan).

En utilisant, comme au deuxième chapitre, l'unité tritium multipliée par un kilomètre cube (UT x km^3) comme unité de quantité de tritium nous obtenons au 1er Janvier 1965 et au 1er Janvier 1969, les quantités de tritium suivantes dans le lac (tableau 10).

TABLEAU 10

QUANTITES DE TRITIUM DANS LE LEMAN

(en UT x km^3)

	1 Janvier 1965	1 Janvier 1969
Petit Lac	500	700
Centre Lac	11.400	13.900
Haut Lac	5.200	4.600
TOTAL LEMAN	17.100	19.200

Nous avons calculé au deuxième chapitre les quantités de tritium apportées par le Rhône et la Dranse et apprécié à 1,6 fois les apports de la Dranse, l'ensemble des apports des petits affluents. Mais, il nous reste à calculer les apports en tritium des précipitations (tableau 11). Pour chaque année nous avons placé, pour chaque mois, dans la première colonne la hauteur des précipitations en mm, dans la seconde la teneur moyenne pondérée de ces précipitations en UT et dans la troisième l'apport mensuel de tritium en UT x km^3. Le total annuel est porté sous la troisième colonne.

Nous avons reporté sur le tableau 12, l'ensemble des valeurs des différents apports, et calculé leur somme, arrondie à la centaine, dans la dernière colonne.

TABLEAU 11

APPORT DE TRITIUM DES PRECIPITATIONS DU LEMAN

(en UT x km^3)

Mois	1965 Hauteur en mm	1965 Teneur en UT	1965 k UT km^3	1966 Hauteur en mm	1966 Teneur en UT	1966 k UT km^3	1967 Hauteur en mm	1967 Teneur en UT	1967 k UT km^3	1968 Hauteur en mm	1968 Teneur en UT	1968 k UT km^3
Janvier	102,2	660	39	74,4	255	10,8	47,4	120	3,3	72	68	2,8
Février				119,6	150	10,3	51,3	165	4,8	107	190	11,8
Mars	116,0	640	43	57,1	90	3,0	84,4	200	9,8	36	267	5,6
Avril	58,0	590	20	120,4	115	7,7	20,0	385	4,5	88	382	19,5
Mai	108,7	633	40	93,4	340	19,5	140,5	320	26,2	101	282	16,6
Juin	44,9	1 300	34	33,3	580	11,0	90,1	440	23,6	99	350	20,2
Juillet	177,8	1 200	124	73,1	660	27,6	51,4	410	12,2	97	295	16,7
Août	112,1	868	57	71,6	340	14,1	94,1	200	10,9	245	248	35,4
Septembre	162,1	416	39	83,3	205	10,1	68,1	185	7,1	147	123	10,5
Octobre	39,5	318	7,4	106,0	190	11,8	59,1	85	3,1	59	95	3,3
Novembre	142,8	170	14	59,8	130	4,4	204,3	90	10,7	204	73	8,7
Décembre	111,9	114	7,4	101,3	110	6,5	53,6	65	2,1	55	125	4,0
		K = 430			K = 140			K = 120			K = 160	

TABLEAU 12

APPORTS DE TRITIUM AU LEMAN

(en UT x km^3)

	Dranse	1,6 Dranse	Rhône	Précipitations	Total
1965	460	740	3 440	430	5 100
1966	380	610	2 680	140	3 800
1967	180	290	1 810	120	2 400
1968	180	290	1 240	160	1 900

En ce qui concerne les sorties de tritium du lac, nous connaissons les quantités évacuées par le Rhône à Genève (chapitre 2) ; il nous reste à calculer les quantités évacuées par évaporation. Nous connaissons la hauteur d'eau évaporée chaque année et donc, le volume d'eau ainsi soustrait au lac. Comme ce sont bien entendu les eaux de surface qui s'évaporent, nous leur attribuerons pour chaque année une teneur égale à la moyenne des teneurs de surface observées au cours de l'année (tableau 13). Il n'y a pas de fractionnement notable au cours de cette évaporation.

TABLEAU 13

TRITIUM EVAPORE

(en UT x km^3)

Année	Période	Teneur (UT)	Quantité évaporée par période (UT x km^3)	Quantité évaporée totale (UT x km^3)
1965	1	180	9,9	70
	2	220	44,8	
	3	400	14	
1966	1	260	15,1	80
	2	263	53,5	
	3	270	9,3	
1967	1	226	13,2	70
	2	242	49,5	
	3	201	7,0	
1968	1			70
	2	224		
	3			

Compte tenu de la médiocre précision sur la mesure de l'évaporation nous l'avons considérée comme constante chaque année en divisant l'année en trois périodes : période 1 (Janvier, Février, Mars, Avril, évaporation 100 mm), période 2 (Mai, Juin, Juillet, Août, évaporation 350 mm), période 3 (Septembre, Octobre, Novembre, Décembre, évaporation 50 mm).

Nous avons donc tous les éléments pour le calcul des sorties de tritium du Léman (tableau 14).

TABLEAU 14

SORTIES DE TRITIUM DU LEMAN

(en UT x km^3)

Année	Rhône Genève	Evaporation	Total
1965	2 200	70	2 300
1966	1 800	80	1 900
1967	1 750	70	1 800
1968	1 670	70	1 700

Pour calculer le bilan nous ajouterons à la quantité initiale de tritium dans le Léman (au 1er Janvier 1965) les apports des rivières et des précipitations pendant les quatre années du bilan, et nous retrancherons les quantités de tritium sorties du lac pendant ces quatre années (à Genève et par évaporation) ainsi qu'un terme relatif à la décroissance radioactive, sur quatre ans pour la quantité initiale, sur trois ans et demi pour les apports de 1965 etc...

En faisant ce calcul nous surestimons les pertes de tritium par décroissance. En effet une partie des apports ont déjà été évacués par le Rhône à Genève et la décroissance de cette fraction ne serait donc pas à prendre en compte. Cependant l'erreur aussi commise est faible (quelques % en valeur relative) et nous connaissons son sens. Nous pouvons donc écrire les termes du bilan (tableau 15).

Note :

La fonction δ (t), qui exprime la décroissance radioactive du tritium a pour expression :

$$\delta (t) = \exp (- \lambda t)$$

λ est la constante de désintégration liée à la période T du tritium par la relation :

$$\lambda = (\text{Log } 2)/T$$

La fonction δ' (t), liée à la fonction δ (t) par la relation

$$\delta'(t) = 1-\delta(t)$$

représente la fraction de tritium qui a disparu au bout du temps t.

TABLEAU 15

BILAN DU TRITIUM DANS LE LEMAN DU 1/1/65 AU 1/1/69

QUANTITE INITIALE ESTIMEE			17.100
APPORTS	5100 + 3800 + 2400 + 1900	=	+ 13.200
SORTIES	+ 2300 + 1900 + 1800 + 1700	=	- 7.700
DECROISSANCE	17.100 δ' (4) = 3500 + 5.100 δ' (3,5) = 900 + 3.800 δ' (2,5) = 500 + 2.400 δ' (1,5) = 200 + 1.900 δ' (0,5) = 100 =		- 5.200
QUANTITE FINALE CALCULEE			17.400
QUANTITE FINALE ESTIMEE			19.200

Le bilan est donc négatif. Il faut à ce sujet remarquer deux choses. Tout d'abord, l'approximation que nous avons faite pour simplifier le calcul du bilan joue dans le sens d'un bilan négatif, mais reste peu importante. En second lieu, le déficit enregistré est du même sens que celui mis en évidence par BLAVOUX et al (1962) dans leur bilan purement hydrologique du Léman. Mais il faut à notre avis surtout considérer le problème des erreurs de mesures. Le déficit enregistré sur quatre années est de l'ordre de 10 % des valeurs à

comparer. Or, nous nous sommes basés sur des mesures de teneurs en tritium dont la précision relative est voisine de 7 %, sur des mesures de débits dont la précision relative est de l'ordre de 5 %. C'est donc à plus de 10 % d'erreurs relatives que nous devons nous attendre dans ce bilan, d'autant plus que les pondérations, les calculs de valeurs moyennes etc... entrainent eux aussi, des erreurs qu'il est difficile de chiffrer. Nous concluerons donc en disant que, à la précision de nos mesures, le bilan est bouclé, mais surtout que *l'ensemble des valeurs de teneurs en tritium que nous avons utilisées est cohérent.*

QUATRIEME CHAPITRE

DYNAMIQUE LACUSTRE

Le mouvement des eaux du Léman a déjà fait l'objet de nombreuses études. FOREL a étudié de façon exhaustive les *seiches* et les *vagues* du lac et a abordé l'étude des *courants* parmi lesquels il distingue les courants d'écoulement du lac, les courants de convection thermique, les courants causés par les vents ou par la pression atmosphérique et les courants de seiches. Depuis, d'autres Auteurs ont entrepris avec diverses méthodes (courantométrie, dérive de flotteurs) des études sur ces mouvements. Ainsi, BETANT et PERRENOUD (1932) ont étudié les courants du Petit Lac, MERCANTON (1932) les courants de la partie suisse du Grand Lac et KREITMANN (1931) ceux de la partie française du Grand Lac. DIENERT (1948) fit des études analogues. Plus récemment, CHESSELET, NORDEMAN et DUSSART (1963) ont utilisé l'iode 131 pour l'étude de la diffusion près de Thonon-les-Bains. Il ressort de tous ces travaux que la vitesse des courants est en général de l'ordre du *centimètre par seconde*, les plus forts (ladières ou lardières) qui peuvent atteindre 20 à 30 cm/s étant essentiellement dus à des circonstances météorologiques très particulières. On doit aussi noter la mise en évidence de courants de retour, pressentis par FOREL, à quelques dizaines de mètres de profondeur, de direction opposée aux courants de surface (MERCANTON, BETANT et PERRENOUD).

Malgré tout leur intérêt, ces études restent locales dans le temps et dans l'espace puisqu'elles ne portent en définitive que sur les premières dizaines de mètres du lac.

DUSSART (1948) a effectué sur toute l'étendue du lac une campagne de mesures de résistivité des eaux, liée à l'étude de la péné-

tration du Rhône et de la Dranse dans le Léman, mais cette campagne a également été limitée aux 30 premiers mètres et il n'est donc pas possible d'en déduire des conclusions quant aux grandes circulations du lac qui se développent, nous le verrons, plus profondément et dont les vitesses sont trop faibles pour pouvoir être mesurées par courantométrie.

Nous avons vu que le tritium était un dateur relatif. Mais, intégré à la molécule d'eau elle-même, le tritium est aussi un traceur particulièrement bien adapté aux problèmes hydrologiques. Nous nous sommes efforcés d'exploiter ces capacités d'étude en tant que traceur de la molécule d'eau, dans des études tant particulières (pénétration du Rhône et de la Dranse dans le Léman) que générales (circulation horizontales et verticales dans le lac), dans le cadre de la méthodologie que nous avons définie au premier chapitre.

1) PENETRATION DU RHONE DANS LE LEMAN.

FOREL rapporte que des Auteurs anciens comme STRABON, POMPONIUS ou AMMIEN MARCELLIN, affirmaient que le *Rhône traversait le Léman sans se mêler aucunement aux eaux du lac.* Cette croyance, qui demeure très vivace chez de nombreux riverains du lac, trouve sans doute sa source dans le phénomène connu sous le nom de *Batallière,* où les eaux du Rhône chargées d'alluvions se heurtent aux eaux bleues du Léman.

FOREL pense que les eaux du Rhône suivent pendant la plus grande partie de l'année le ravin sous-lacustre du Rhône (*canyon*) jusqu'aux grands fonds où elles s'étaleraient en nappe horizontale, ceci en s'appuyant sur des considérations théoriques de densité et sur des arguments sédimentologiques. DELEBECQUE au contraire pense que l'action des affluents ne s'exerce qu'à une distance très faible de l'embouchure.

En ce qui nous concerne, la pénétration du Rhône dans le Léman a fait l'objet de deux campagnes dans le Haut Lac en Mars 1968 lors de l'étiage (110 m^3/s) et en Août 1968 à la fin de la crue annuelle (220 m^3/s). Cette région du Léman correspond au delta sous-lacustre du Rhône échancré par un canyon dont la tête est située à l'embouchure du fleuve et qui aboutit 15 km plus loin dans la plaine centrale.

CAMPAGNE D'HIVER. Au début de 1968, les eaux apportées par le Rhône ont une teneur de l'ordre de 260 UT, plus faible qu'au cours de l'année précédente où elles avaient une teneur de l'ordre de 320 UT. Cette différence, bien significative, nous permet d'interprêter les deux coupes réalisées en Mars 1968 (figure 10). Les points de prélèvements sont localisés sur la figure 11.

L'élément le plus remarquable est la nette stratification des eaux. On distingue à proximité de l'embouchure : une couche superficielle de 0 à 40 m environ, de teneur inférieure à 225 UT (ce qui correspond à des eaux assez anciennes) et une couche profonde, au-delà de 40 m jusqu'au fond, dont les teneurs sont de l'ordre de grandeur de celles du Rhône dans les mois précédents (de 225 à 275 UT). Nous pensons donc que ces eaux ont été amenées récemment par le Rhône. Cela est d'ailleurs en accord avec les résultats de DUSSART (1948) qui se basait sur les résistivités. La coupe CRG 22 - CRG 23 est plus complexe, mais on retrouve cependant les deux couches décrites dans la coupe précédente de 100 m de profondeur au fond. Les eaux du Rhône continuent donc à se répandre au fond du lac.

Au-dessus de ces deux couches de 0 à 100 m de profondeur on observe des eaux de teneur supérieure à 225 UT, mais nous ne pensons pas qu'il soit possible de les mettre en relation avec les eaux de

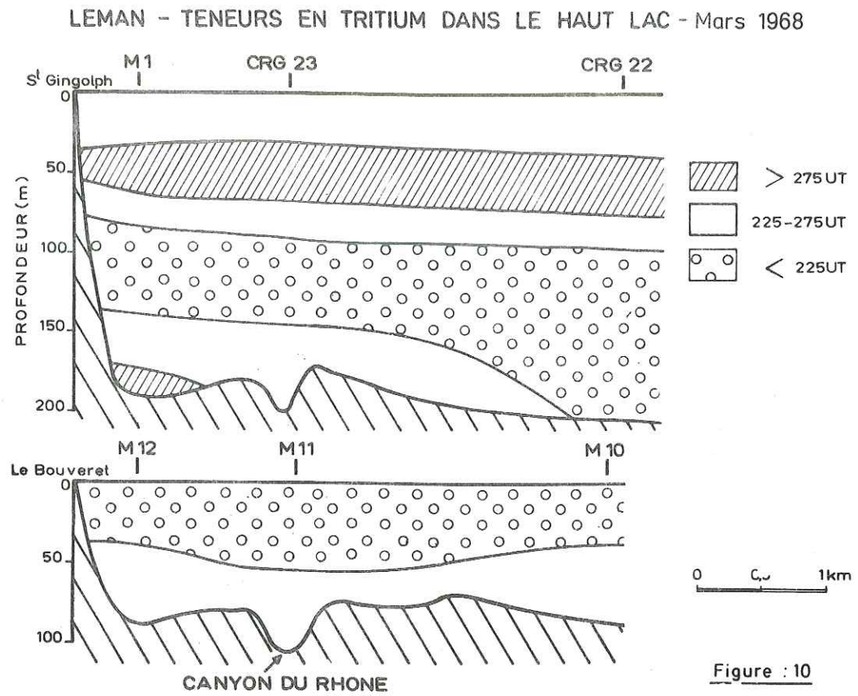


Figure : 10

fond, c'est-à-dire des eaux issues récemment du Rhône quoique leurs teneurs soient semblables. En effet, la couche de teneur inférieure à 225 UT, observée de 0 à 50 m sur la première coupe de 100 à 150 m sur la seconde isole l'une de l'autre ces deux masses d'eaux. C'est pourquoi, nous dirons que les eaux observées de 0 à 100 m sur la coupe CRG 22 - CRG 23 sont plus anciennes que les eaux de fond, une année pour le noyau de teneur supérieure à 275 UT, plusieurs années pour les eaux dont la teneur est comprise entre 225 et 275 UT (antérieures au maximum de 1964).

On doit donc conclure que pendant l'étiage hivernal les eaux du Rhône pénètrent dans le lac en profondeur et s'écoulent le long et de part et d'autre du canyon.

Il faut enfin remarquer que vers la fin de l'hiver l'hétérogénéïté verticale des teneurs en tritium des eaux est encore considérable. Ce fait est en contradiction avec l'homogénéïsation hivernale généralement admise et sur laquelle nous reviendrons plus loin.

CAMPAGNE D'ETE. La seconde campagne a été effectuée le 20 Août 1968 sur huit verticales du Haut Lac (figure 11). Nous avons figuré sur les échelles un parallélépipède dont le volume est égal à 0,2 km^3. C'est le volume d'eau apporté par le Rhône en 10 jours pour un débit de 250 m^3/s. Cela donne une idée de l'importance relative du volume des eaux au Haut Lac et des eaux apportées par le Rhône en crue.

La crue du Rhône, de Mai à Août, a amené des eaux d'une teneur moyenne de 230 UT. Dans tout le Haut Lac on n'observe pas d'eaux de concentration supérieure à 250 UT. C'est donc que les eaux de fortes teneurs (> 275 UT) observées pendant la campagne d'hiver ont disparu, entraînées par le courant d'écoulement du lac. On pourra donc raisonnablement admettre que les eaux du Haut Lac dont la teneur est supérieure à 230 UT, valeur moyenne de la crue, sont récentes, de l'année pour la majorité. Ces eaux se répartissent suivant deux niveaux : Les vingt premiers mètres environ d'une part, une zone comprise entre 70 et 120 mètres d'autre part. Ces deux niveaux sont axés suivant le canyon du Rhône et sont séparés par une couche de faible teneur déjà observée en Mars qui s'étale largement dans tout le Haut Lac, atteignant parfois la surface. Au point M_2, les eaux de fond ont une teneur encore plus faible correspondant à un âge d'au moins 5 ou 6 ans. Dans son étude fondée sur la résistivité des eaux, DUSSART (1948) signale à cette saison une perturbation des résistivités des eaux du Grand Lac et du Haut Lac en surface et attribue aux eaux du Rhône une position d'équilibre à une profondeur d'environ 15 ou 20 mètres. Nous pensons que le niveau superficiel de pénétration du Rhône remarqué dans notre campagne d'Août 1968 recouvre ces deux faits. DUSSART ayant limité son étude aux trente premiers mètres, il est malheureusement impossible de

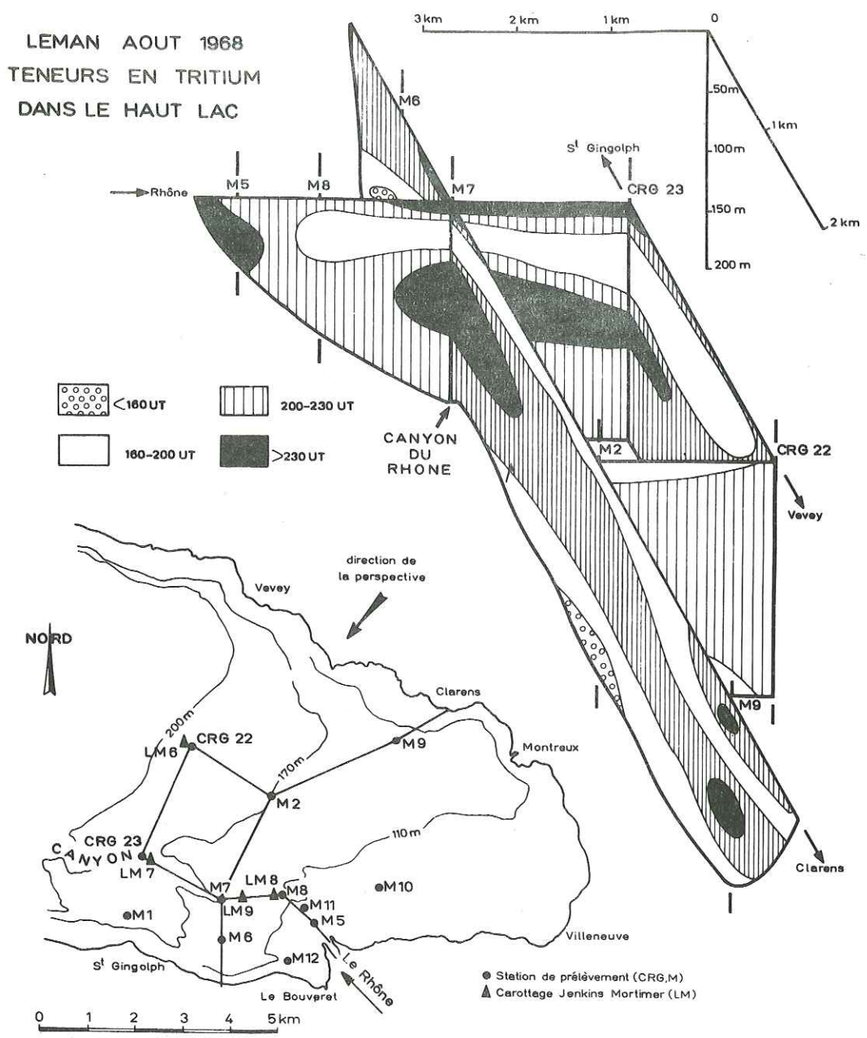


figure 11

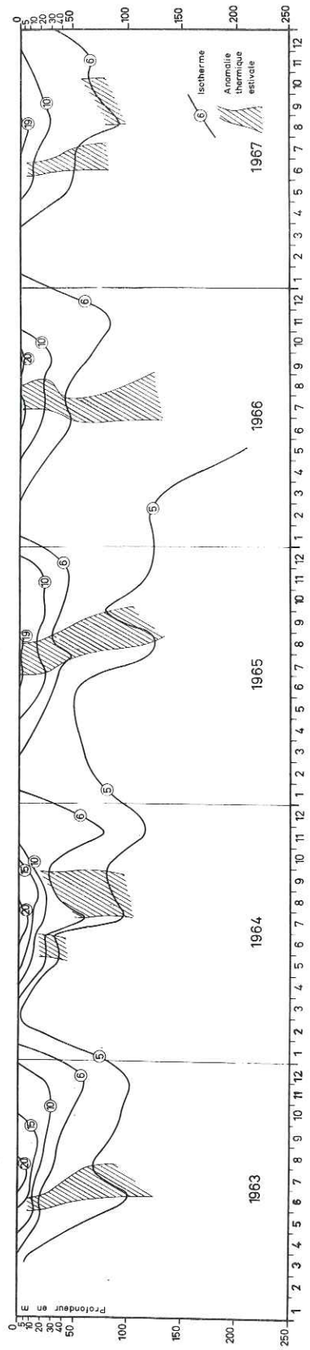
trouver chez lui un point de comparaison en ce qui concerne la zone comprise entre 70 et 120 mètres que nous avons mise en évidence.

Les deux niveaux de fortes teneurs signalés au-dessus du canyon sont également repérables à des profondeurs analogues, au point M_9. Cela, compte tenu de la grande inertie du point M_2, confirme l'existence d'un mouvement cyclonique (DUSSART 1948) des eaux dans la partie nord-est du Haut Lac.

Ainsi au cours de la crue annuelle du Rhône les eaux s'écoulent principalement suivant l'axe du canyon, à la fois en surface et autour d'une profondeur de cent mètres environ, en se frayant une voie dans les eaux plus anciennes.

ETUDE DES COURANTS TURBIDES. Nous venons de voir que le canyon du Rhône joue un rôle dans la pénétration des eaux du Rhône dans le Léman, puisqu'il en constitue l'axe en toutes saisons. Le rôle du canyon est également important car il canalise les apports détritiques du Rhône (MEYBECK 1970) par un processus analogue aux courants de turbidité bien connus dans les océans. Ces courants ont pu être mis en évidence en Juin 1968 par le tritium en effectuant conjointement des prélèvements hydrologiques classiques à quelques mètres du fond et des carottages avec l'appareil JENKINS-MORTIMER qui ramène une carotte mixte de l'eau du fond et de sédiments superficiels.

A trois reprises les eaux carottées dans le canyon (points LM_7 = CRG 23 et LM_8 le 19 Juin 1968, point LM_9 le 26 Juin 1968) se sont révèlées anormalement turbides, alors que des prélèvements effectués à 3 mètres au-dessus de ces points étaient limpides tout comme les eaux de fond prélevées aux mêmes dates hors du canyon ou sur ses flancs. Cela met en évidence un courant turbide bien localisé au fond du canyon sous-lacustre. Le 19 Juin 1968 les eaux à 3 m du fond ont une teneur en tritium de 140 UT alors que les eaux turbides ont pour teneur respectivement 207 UT pour LM_8 le plus rapproché du Rhône, et



ISOTHERMES DU POINT C.R.G. 10

Figure 12

189 pour LM_7 le plus éloigné, valeurs très proches de celles du Rhône à ce moment (220 UT) et qui mettent en évidence une légère dilution à mesure que l'on s'éloigne de l'embouchure du Rhône.

Les courants turbides ne jouent qu'un rôle accessoire dans la circulation générale du lac, mais ils constituent un aspect de la pénétration du Rhône dans le lac, précisément dans la couche profonde que nous mettrons en évidence plus tard. Ils sont rapides, localisés au fond du canyon et ont lieu lors des montées de crue du Rhône.

2) *PROPAGATION DE LA PERTURBATION SUPERFICIELLE PROVOQUEE PAR LE RHONE.*

Nous venons de voir que l'on peut *lire* le cheminement des eaux du Rhône dans le lac au voisinage de son embouchure. Mais les eaux du Rhône ne perdent pas pour autant complètement leurs caractéristiques en sortant du Haut Lac. Nous le verrons ici pour un aspect particulier et plus loin pour le processus fondamental de la dynamique du Léman.

Nous avons reporté sur la figure 12 les isothermes du point CRG 10 de 1963 à 1967. (Valeur d'après des rapports de la C.F.S.). L'aspect principal de ces courbes est bien entendu un réchauffement estival et un refroidissement hivernal, avec un léger déphasage par rapport aux saisons dues à l'inertie thermique de l'eau. Mais on observe également, ce qui est paradoxal, *un épisode de refroidissement estival* de durée et d'intensité variable selon les années. Nous avons souligné par des hachures sur le diagramme des isothermes les domaines où se fait sentir cette anomalie.

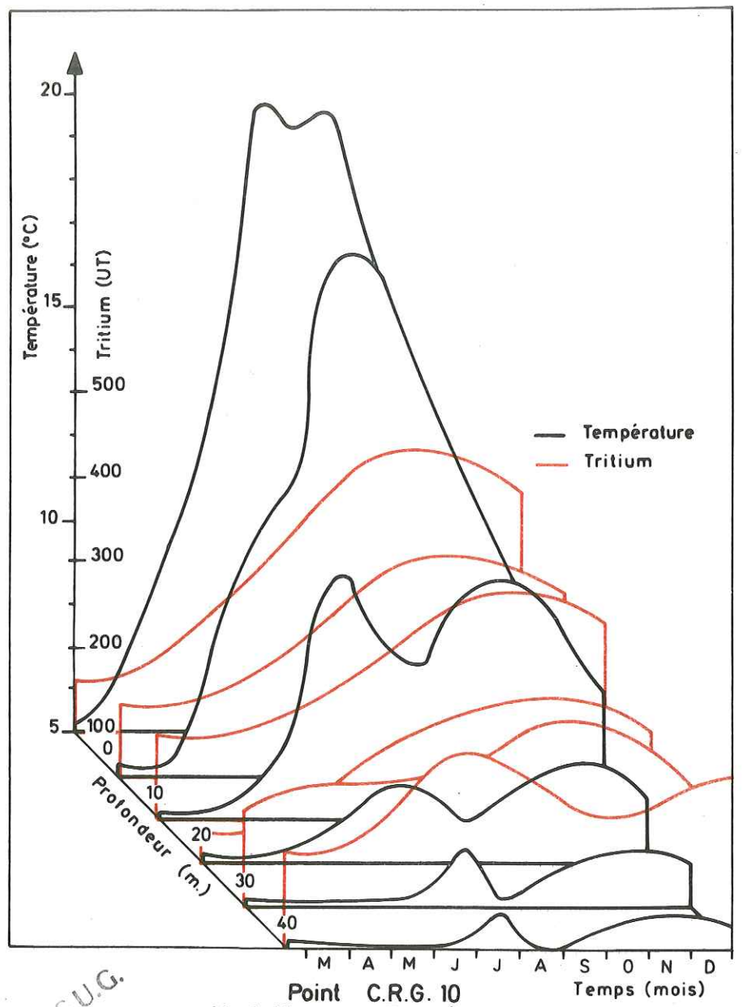
Se reproduisant chaque année, cette anomalie n'est pas accidentelle. Nous pensons pouvoir l'attribuer aux eaux de la crue du Rhône, plus fraîche que les eaux du lac. DUSSART (1948) signale d'ailleurs, en se basant sur l'étude des résistivités, une vaste perturbation

du Grand Lac en surface pendant l'été. La crue du Rhône a lieu de Mai à Septembre environ, l'anomalie s'observe en CRG 10 vers Juillet-Août.

Il nous a semblé intéressant d'étudier parallèlement les variations de température et les variations de teneur en tritium au point CRG 10. C'est ce que nous avons fait sur la figure 13. Nous avons superposé deux diagrammes tridimensionnels, température-profondeur-temps en noir et teneur en tritium-profondeur-temps en rouge, pour l'année 1965. En effet, l'année 1965 présente une anomalie particulièrement marquée et cette année là les teneurs en tritium du Rhône étaient beaucoup plus fortes que celles du lac. On constate d'abord que l'anomalie n'affecte réellement que les 50 premiers mètres, particulièrement de 20 à 40 m et qu'elle est maximale en Août. Quant aux teneurs en tritium, elles augmentent jusqu'au début du mois de Septembre.

Nous proposons de ces faits l'interprétation suivante. Les eaux de la crue du Rhône, très tritiées (près de 700 UT pendant la crue en moyenne) se propagent dans la couche superficielle en se mélangeant à elle. Au centre du lac, deux mois plus tard environ, elles sont dans une proportion de l'ordre de deux cinquièmes, leur température étant initialement suffisamment basse (7 à 8°C) pour contrarier l'échauffement de la couche superficielle du lac pendant un mois. Cependant la tendance saisonnière au réchauffement redevient prépondérante alors même que le maximum de teneur en tritium n'est pas atteint.

Nous avons également pu observer et nous avons reporté sur les figures 14 et 15, une anomalie thermique analogue en 1965 aux points CRG 22 et CRG 23. Là aussi, elle présente un maximum d'intensité vers 20-30 m de profondeur, mais sensiblement plus tôt dans l'année. Remarquons enfin qu'elle est pratiquement le même en CRG 22, hors du CANYON, qu'en CRG 23 au-dessus de celui-ci car il s'agit d'un *phénomène essentiellement superficiel.*

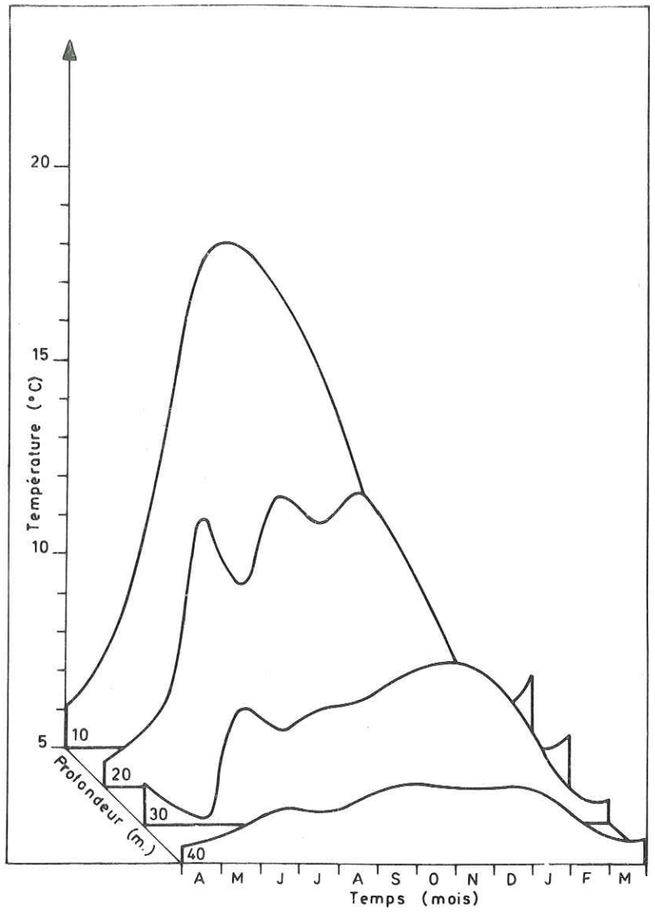


Point C.R.G. 10
Variations de Température
et de teneur en Tritium en 1965

Figure : 13

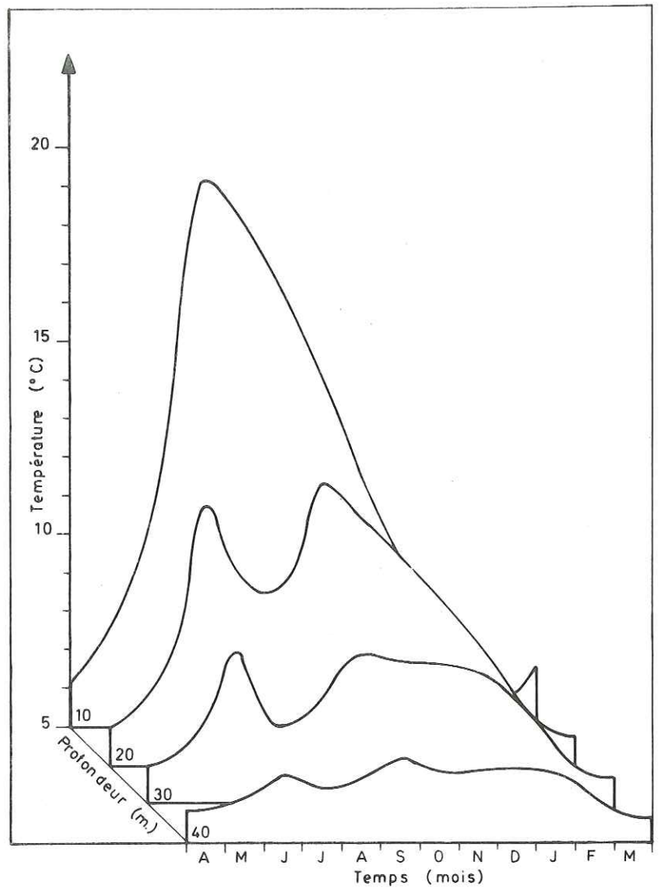
Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail : plalour@ujf-grenoble.fr

18 AOUT 2003



Point C.R.G. 22
Variations de Température en 1965

Figure : 14



Point C.R.G. 23
Variations de Température en 1965

Figure : 15

3) *PENETRATION DE LA DRANSE DANS LE LEMAN.*

Comme pour le Rhône, nous avons étudié la façon dont les eaux de la Dranse pénétraient dans le Léman d'une part par des campagnes en Février 1968 c'est-à-dire en période de basses eaux et au cours d'une grande crue en Septembre 1968, à partir de mesures régulières d'autre part.

CAMPAGNE DE FEVRIER 1968. Dans les premiers jours de Février 1968, alors que la Dranse était en période d'étiage, nous avons prélevé sur 12 verticales au voisinage de son embouchure (figure 16). Durant les mois précédents les teneurs de la rivière ont oscillé entre 200 et 250 UT. C'est pourquoi nous considérons dans cette étude que les eaux dont les teneurs sont comprises entre ces deux bornes sont des eaux apportées récemment par la Dranse. Pour donner une idée des volumes d'eau mis en jeu, nous avons tracé sur les échelles un parallélépipède représentant le volume d'eau apporté par la Dranse pendant un mois pour un débit d'étiage de 12 m^3/s soit environ 0,03 km^3.

On constate sur le schéma que les eaux récentes de la Dranse se répartissent essentiellement en deux zones séparées par des eaux de teneurs plus faibles (< 200 UT). Il s'agit d'une part d'une *zone superficielle* de 0 à 30 mètres environ et d'une *zone profonde*, plus importante, autour de 100 m de profondeur. Hors de cette région d'influence directe de la Dranse, il existe latéralement des masses d'eaux de teneurs plus importantes (> 250 UT) qui doivent dater de l'année 1967, et au large des lentilles d'eaux profondes de très faible teneur âgées de plusieurs années.

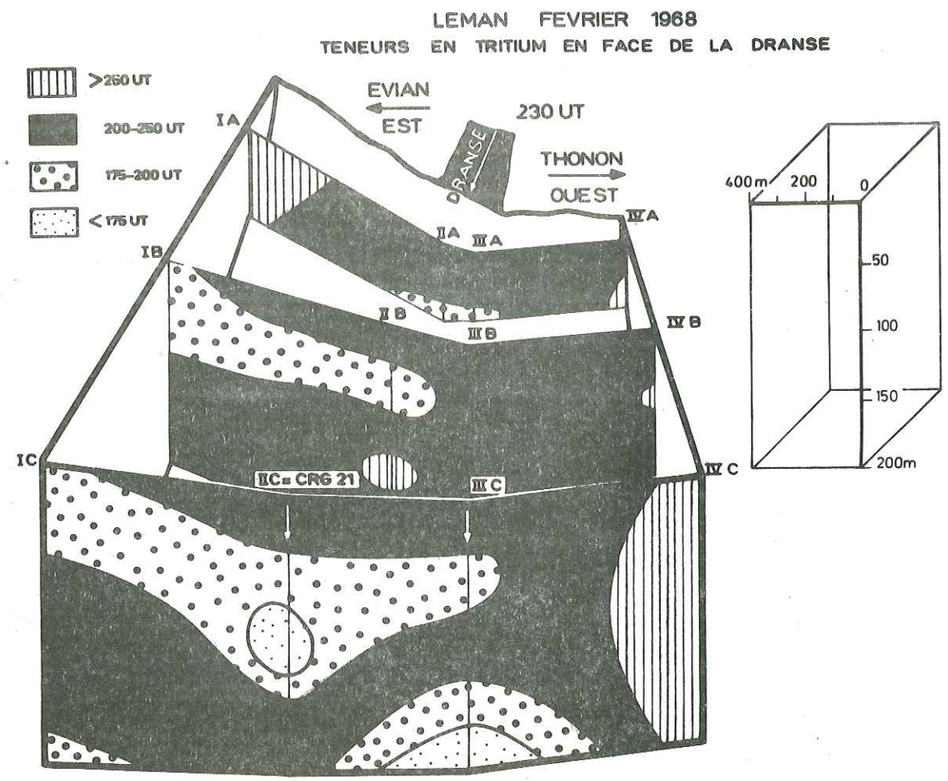
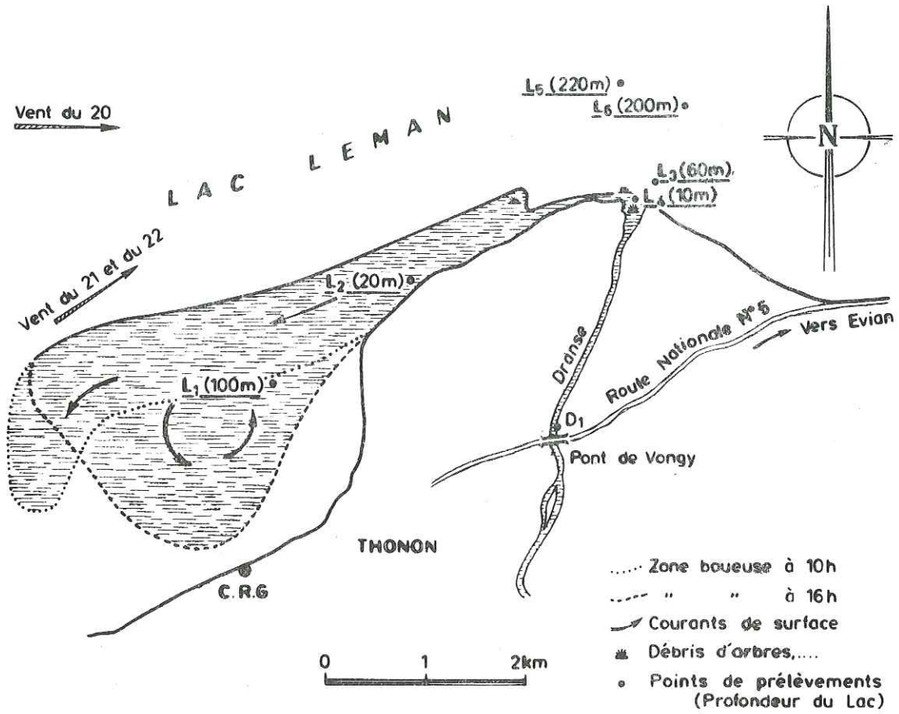


Figure 16

CRUE DE SEPTEMBRE 1968. Nous avons réabordé ce problème lors d'une très forte crue dont la pointe a dépassé 400 m^3/s, en septembre 1968 (HUBERT et al 1969). La teneur moyenne des eaux de la Dranse pendant cette crue était de l'ordre de 260 UT.

Un courant turbide superficiel orienté est-ouest était bien visible (figure 17). En effet un fort vent (5 m/s) soufflant depuis 2 jours en direction de l'Est a provoqué un courant rétrograde, bien connu des pêcheurs du lac, suffisant pour orienter le flot de la crue en surface. Les teneurs en tritium au point L_1 en surface (240 UT) et en L_2 vers 10 m (220 UT) subissent déjà bien l'influence des eaux de



PENETRATION DE LA DRANSE DANS LE LEMAN LE 22.IX.1969

ETAT EN SURFACE

Figure 17

la Dranse en crue sur une zone du lac dont on peut estimer la teneur à 200 UT avant la crue (point L_2 à 0 et 20 m).

Mais le tritium nous a surtout permis de mettre en évidence deux courants dirigés vers le nord. Quelques jours avant la crue (16/17 Septembre 1968) un prélèvement avait été effectué au point CRG 21. Après la crue du 22 Septembre on a pu observer (figure 18) une augmentation des teneurs en surface et à partir de 100 m de profondeur alors qu'à la station CRG 9 de situation géographique et de profondeur analogues, mais hors de l'influence de la Dranse on observait une évolution de sens contraire. Nous attribuons ces augmentations de teneur aux eaux apportées par la crue de la Dranse dont la teneur, 260 UT, était supérieure à celle du lac. *On peut donc remarquer que le schéma de pénétration de la Dranse dans le Léman est analogue à celui que nous avons pu observer pour le Rhône en été* (figure 19).

Enfin nous avons étudié au point CRG 21, pour lequel nous disposions d'un certain nombre de mesures au cours de l'année 1968, le coefficient de variation (chapitre 1) des teneurs en tritium au cours du temps pour chaque profondeur. Ce coefficient, V, marque un maximum en surface et en profondeur, avec un minimum vers 50 m de profondeur (figure 20). Cela est bien en accord avec les conclusions résultant des deux campagnes d'étude.

4) *CIRCULATIONS VERTICALES.*

Selon FOREL, le Léman est un lac *Tropical*. Principalement en raison de son volume important il ne gèle jamais, et même sa température s'abaisse très rarement en-dessous de 4°C, température de densité maximum de l'eau. *La stratification thermique du Léman sera donc toujours directe*. Tous les Auteurs s'accordent à décrire le cycle thermique suivant : A la fin de l'hiver le lac est thermiquement homogène à une température de l'ordre de 4 à 5°C (figure 12). Au printemps, il se réchauffe en surface. Cet échauffement ne saurait entrainer de mouvements de convection car les eaux de surface en se réchauffant deviennent plus légères. Une stratification thermique s'établit donc, déterminant peu à peu dans le lac un *épilimnion chaud* et un *hypolimnion*

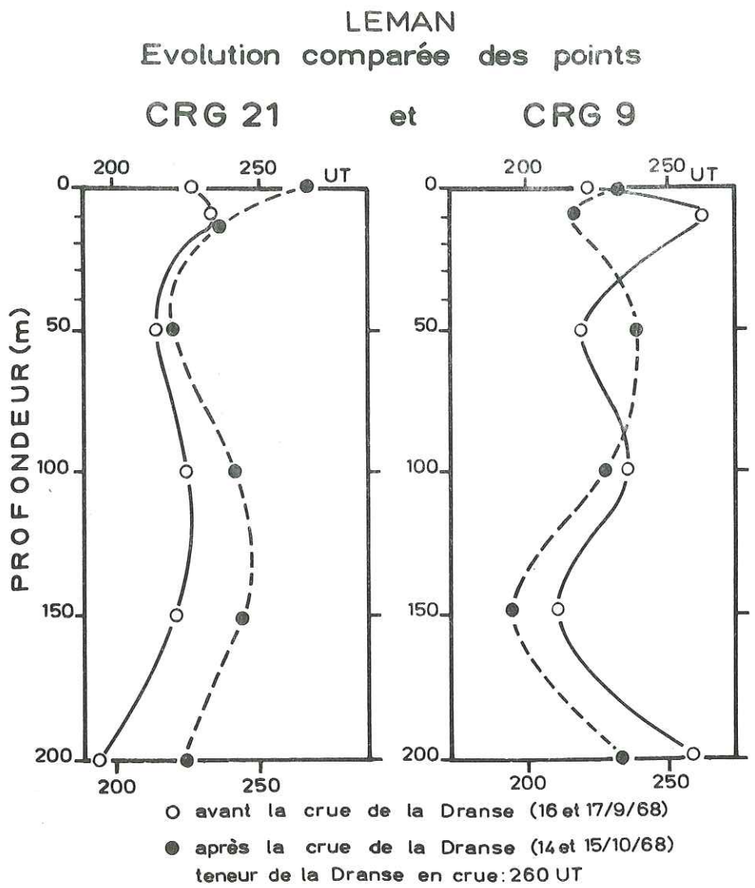
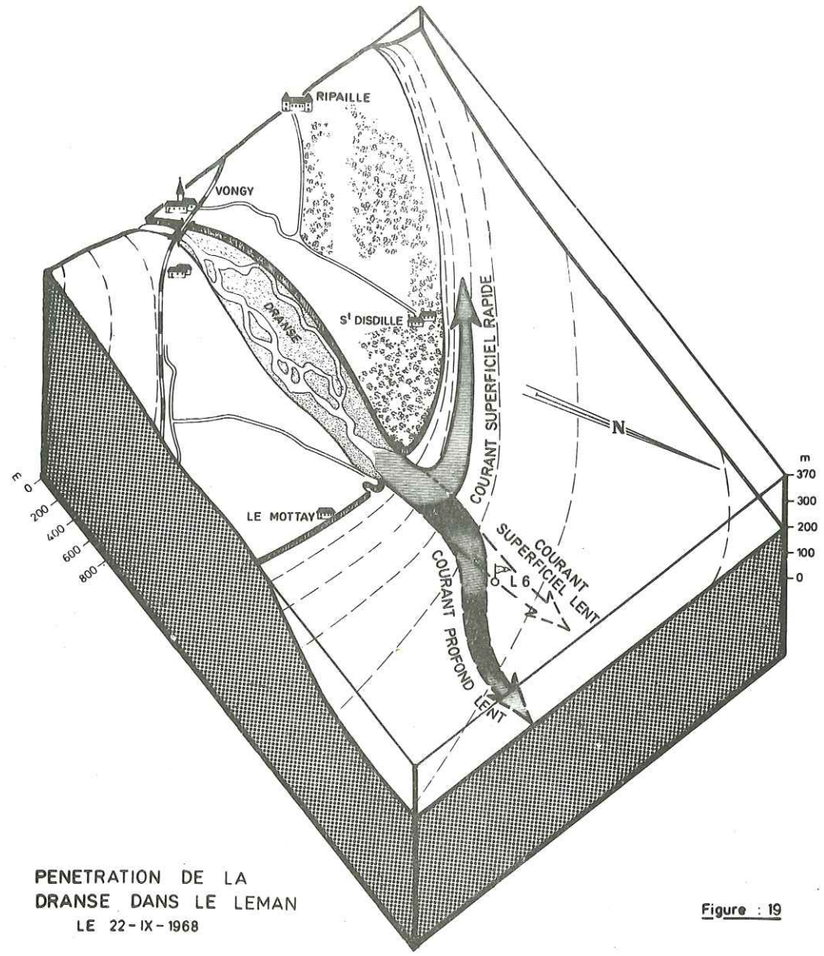


Figure : 18



PENETRATION DE LA DRANSE DANS LE LEMAN
LE 22-IX-1968

Figure : 19

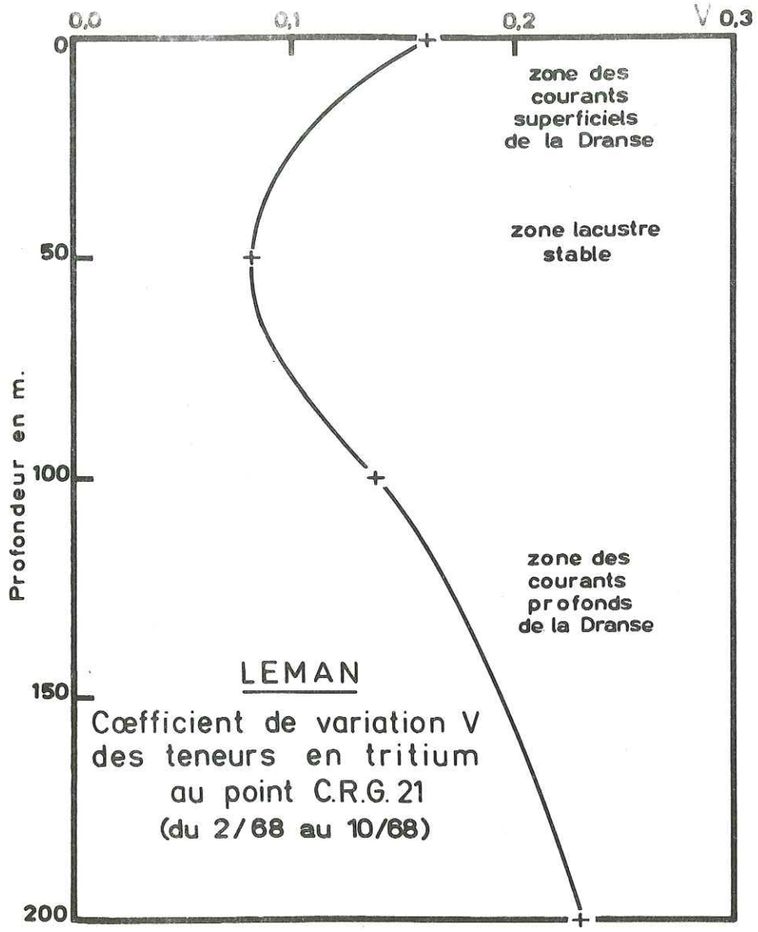


Figure : 20

froid séparé par un *métalimnion* ou *zone de saut thermique* (thermocline). Remarquons (figure 12) qu'à partir d'une centaine de mètres de profondeur l'amplitude des variations thermiques devient pratiquement insignifiante (environ 0,2°C par an). A partir de Septembre ou Octobre, les eaux de surface, qui deviennent plus lourdes en se refroidissant, ne sont plus en équilibre. Elles seraient en équilibre à une profondeur telle qu'elles se trouveraient au-dessus d'eaux plus froides donc plus lourdes et en-dessous d'eaux plus chaudes donc plus légères. *Des mouvements verticaux prendront donc nécessairement naissance lors du refroidissement*. Ces mouvements sont souvent décrits dans la littérature comme la *circulation* d'un lac (*overturn* en anglais).

FOREL a émis une hypothèse sur le mécanisme de ces mouvements. Pour lui le passage des couches supérieures devenues plus lourdes que les couches sous-jacentes à leur niveau d'équilibre est un phénomène discontinu. Il y aurait une période d'*équilibre instable local* (c'est-à-dire avec stratification thermique inverse) qui serait rompu par une impulsion donnée par une vague, une seiche ou même le passage d'un poisson, déterminant un point de moindre résistance à l'interface de la couche supérieure plus lourde et de la couche inférieure plus légère. C'est par cette *brèche* que les eaux supérieures gagneraient leur nouveau niveau d'équilibre et la période de circulation serait donc la succession de tels épisodes. L'hypothèse selon laquelle l'eau de la couche supérieure gagnerait par petits filets verticaux son niveau d'équilibre de façon continue est aussi signalée par FOREL. C'est une hypothèse de ce type que reprend DUSSART lorsqu'il décrit un épaississement et un refroidissement simultanés de l'épilimnion lors de la période de refroidissement entrainant le mélange et l'homogénéisation des eaux.

L'usage du tritium comme traceur dans l'étude de ce phénomène doit se révéler très riche puisque l'homogénéisation éventuelle des eaux le long de tout ou partie d'une verticale au cours du refroidissement hivernal sera bien lisible.

Afin de nous former une première idée, quoiqu'un peu grossière, nous avons étudié l'évolution au cours du temps du rapport M/m au point CRG 10, au centre du Léman. M et m sont respectivement le maximum et le minimum de teneur en tritium mesurés à la même date sur une même verticale. Nous avons reporté les valeurs M/m sur le tableau 16 et sur la figure 21, et dès l'abord l'hétéogénéité des valeurs est constante même en tenant compte du fait que M et m étant déterminés à 7 % près

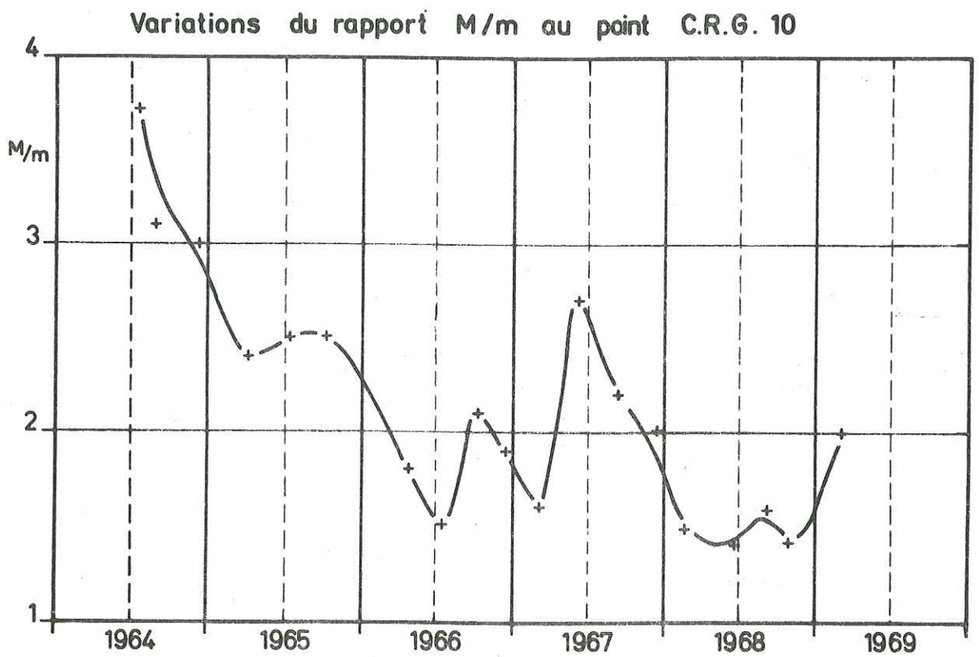


Figure : 21

TABLEAU 16

MAXIMUM, MINIMUM DES TENEURS EN TRITIUM DANS LE LEMAN

	Date	Maximum M	Minimum m	M/m	Nombre de mesures
CRG 10	18 Juin 1964	276	75	3,7	9
	07 Juillet 1964	324	105	3,1	2
	12 Décembre 1964	260	88	3,0	11
	22 Mars 1965	287	119	2,4	11
	22 Juin 1965	397	162	2,5	10
	24 Septembre 1965	422	170	2,5	10
	07 Décembre 1965	413	172	2,4	7
	30 Mars 1966	230	131	1,8	11
	15 Juin 1966	258	169	1,5	11
	15 Septembre 1966	322	155	2,1	11
	15 Décembre 1966	300	156	1,9	11
	16 Février 1967	227	146	1,6	10
	17 Mai 1967	310	114	2,7	11
	16-17 Août 1967	250	112	2,2	11
	24 Novembre 1967	273	140	2,0	10
	13 Février 1968	235	152	1,5	7
	19 Juin 1968	230	170	1,4	6
	16 Septembre 1968	231	147	1,6	9
	26 Novembre 1968	267	185	1,4	12
	18 Mars 1969	309	151	2,0	8
CRG 6	30 Mars 1966	253	198	1,3	7
	14 Juin 1966	292	182	1,6	7
	14 Septembre 1966	307	230	1,3	7
	15 Décembre 1966	307	227	1,4	7
	12 Février 1967	302	208	1,5	7
	16 Mai 1967	225	203	1,1	7
	16 Août 1967	207	183	1,1	7
	12 Février 1968	248	198	1,3	3
	18 Avril 1968	236	201	1,2	3
Vevey	29 Mars 1966	346	200	1,7	9
	16 Juin 1966	349	193	1,8	9
	15 Septembre 1966	312	145	2,2	9
	15 Décembre 1966	239	191	1,3	9
	17 Février 1967	287	206	1,4	9
	30 Mai 1967	297	244	1,2	9
	18 Août 1967	241	182	1,3	9
CRG 9	24 Novembre 1967	205	147	1,4	5
	18 Avril 1968	243	167	1,5	5
	17 Septembre 1968	256	208	1,2	6
	14 Octobre 1968	236	195	1,2	6
	24 Novembre 1968	205	147	1,4	5

Variation du rapport M/m aux points
C R G 6 ; Vevey ; C.R.G 9

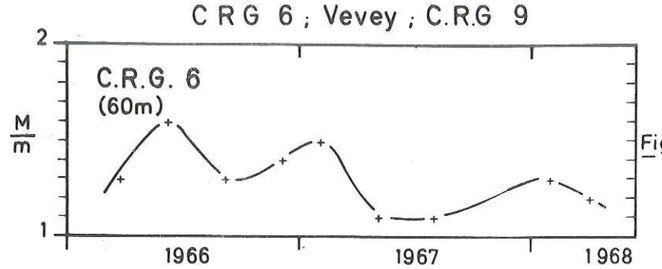


Figure : 22

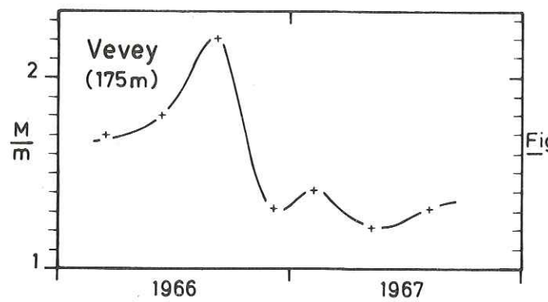


Figure : 23

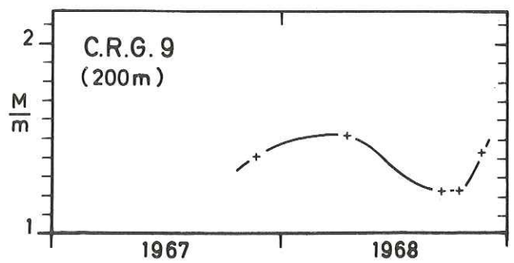


Figure : 24

environ le rapport M/m n'est connu qu'à environ 15 % près. M/m est rarement inférieur à 1,5. Cependant, il faut noter une *tendance générale à la décroissance* de M/m de 1964 à 1969 et une *pseudo périodicité* du rapport M/m marquant un *minimum lors du premier semestre* et un *maximum lors du second.*

Pour compléter et éventuellement nuancer ces premières observations, nous avons calculé (tableau 16) et reporté sur graphique ce même rapport pour quelques autres points du lac (CRG 6 - Vevey - CRG 9). On voit immédiatement sur les figures 22, 23 et 24 que l'homogénéité est beaucoup plus grande pour ces points de moindre profondeur et situés plus près des côtes.

Mais il ne s'agit là que d'une analyse assez rudimentaire, qui ne s'appuie que sur les valeurs extrêmes, et ne rend donc pas compte de l'ensemble de nos mesures. C'est pourquoi nous avons voulu aller plus loin en étudiant pour chaque série de prélèvements le coefficient de variation, que nous avons défini au premier chapitre de ce travail , égal au rapport de l'écart-type des teneurs en tritium mesurées le long d'une verticale à leur moyenne. L'écart-type d'une distribution mesure sa dispersion ; la division par la moyenne permet de comparer entre elles les dispersions rendues unitaires.

Nous avons effectué ces calculs au point CRG 10 d'une part en considérant toutes les mesures de la surface au fond, d'autre part de la surface à 50 m de profondeur. En effet, l'étude du rapport de la valeur maximale à la valeur minimale des teneurs nous a suggéré que l'homogénéité sur toute la profondeur du lac n'était probablement jamais réalisée. C'est pourquoi, nous nous sommes plus précisément penchés sur la zone superficielle de 0 à 50 m, où se développent les variations thermiques les plus accusées et donc plus susceptibles d'entrainer des mouvements de convection. Les valeurs sont calculées sur le tableau 17 et reportées sur la figure 25. Les mêmes calculs,

effectués pour l'ensemble des valeurs mesurées de chaque verticale sont reportés sur le tableau 18 et sur les figures 26, 27, 28 pour les points CRG 6, Vevey, et CRG 9. Pour interpréter les courbes de

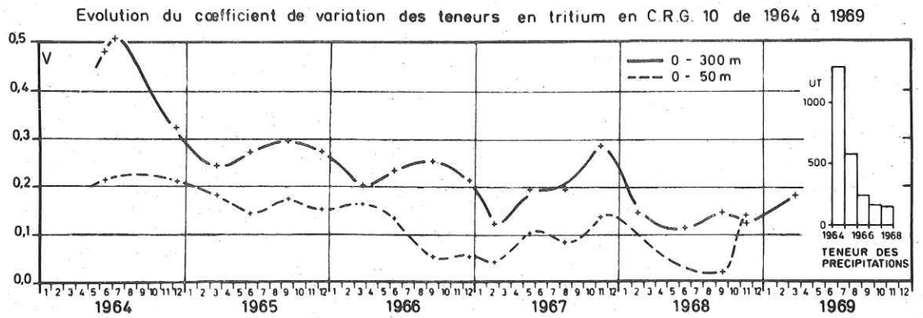


Figure 25

ces figures, il ne faut pas oublier la notion d'erreur de mesure. Nos mesures de teneur en tritium sont faites avec une erreur relative d'environ 7 % et c'est à cette valeur qu'il faudra comparer le coefficient de variation que nous étudions pour déterminer si la dispersion d'un ensemble de mesures, ici l'ensemble des mesures effectuées le long d'une verticale, est significative.

Examinons tout d'abord le point CRG 10 pour l'ensemble des valeurs. *On n'observe jamais d'homogénéité totale de la surface au fond*, sauf peut-être en 1968, mais on retrouve la *pseudo-périodicité* signalée pour le rapport M/m. En effet, le coefficient de variation présente chaque année un *minimum aux alentours de Février-Mars* et un *maximum vers le mois de Septembre*. Cela est très net et ne souffre aucune exception pour toutes nos 5 années de mesure de 1965 à 1968. Cela oblige à revenir sur une notion très largement admise en limnologie, celle de la circulation hivernale que nous décrivions au début de ce paragraphe. *Un lac comme le Léman ne se retourne pas en hiver*, on n'y observe pas de brassage général des eaux. La profondeur est telle qu'à partir d'une certaine côte, l'amplitude annuelle des écarts thermiques est trop petite pour vaincre les forces de viscosité et de frottement et entrainer des courants de convection. *Cependant, le minimum observé pour le rapport V/m à la fin de chaque hiver montre l'existence de tels mouvements, mais limités à la partie supérieure du lac*. Le maximum d'hétérogénéité observé le plus fréquemment en Septembre, doit selon nous, être attribué aux apports du Rhône. Un premier aspect des perturbations entraînées superficiellement par ces apports nous est fourni par l'anomalie thermique précédemment étudiée, un autre aspect sera mis en évidence plus loin pour les couches profondes.

Il nous faut dire quelques mots de la décroissance relativement régulière du coefficient de variation V depuis 1964. *Cette décroissance ne signifie pas que les mouvements verticaux d'origine thermique soient devenus plus importants d'année en année*. Les eaux des affluents du Léman, nous l'avons vu, pénètrent dans celui-ci suivant des chemins privilégiés. L'apparition dans les affluents d'un traceur comme le tritium entraînera l'apparition du tritium dans le lac d'abord suivant ces chemins privilégiés, mais au fur et à mesure du renouvellement des eaux du lac, le tritium se répandra peu à peu partout. Les différences de teneurs entre les chemins de pénétration, que nous avons décrits précédemment, et le reste des eaux ne seront

TABLEAU 17

MOYENNE, ECART TYPE ET COEFFICIENT DE VARIATION AU POINT C.R.G. 10 DE JUIN 64 A MARS 69

Date	0 - 300 m				0 - 50 m			
	Moyenne m	Ecart type σ	V = σ/m	Nombre de mesures	Moyenne m	Ecart type σ	V = σ/m	Nombre de mesures
18 Juin 1964	152	78	0.48	9	206	43	0.21	4
07 Juillet 1964	214	109	0.51	2				
12 Décembre 1964	189	61	0.32	11	216	45	0.21	7
22 Mars 1965	189	45	0.24	11	185	33	0.18	7
22 Juin 1965	281	76	0.27	10	285	40	0.14	6
24 Septembre 1965	289	84	0.29	10	343	58	0.17	6
07 Décembre 1965	285	77	0.27	7	341	51	0.15	3
30 Mars 1966	180	36	0.20	11	192	31	0.16	6
15 Juin 1966	209	48	0.23	11	210	27	0.13	6
15 Septembre 1966	252	63	0.25	11	298	15	0.05	6
15 Décembre 1966	241	51	0.21	11	279	14	0.05	6
16 Février 1967	206	25	0.12	10	218	9	0.04	6
17 Mai 1967	231	44	0.19	11	253	25	0.10	6
16-17 Août 1967	202	38	0.19	11	222	18	0.08	6
24 Novembre 1967	195	55	0.28	10	220	29	0.13	5
13 Février 1968	196	27	0.14	7				
19 Juin 1968	187	21	0.11	6				
16 Septembre 1968	200	28	0.14	9	214	4	0.02	4
20 Novembre 1968	226	27	0.12	12	226	30	0.13	7
18 Mars 1969	242	44	0.18	8				

TABLEAU 18

VALEUR MOYENNE, ECART TYPE ET COEFFICIENT DE VARIATION

DES TENEURS EN TRITIUM

	Date	Moyenne m	Ecart type σ	V = σ/m	Nombre de mesures
CRG 6	30 Mars 1966	231	16	0.07	7
	14 Juin 1966	226	43	0.19	7
	14 Septembre 1966	276	25	0.09	7
	15 Décembre 1966	265	27	0.10	7
	12 Février 1967	244	32	0.13	7
	16 Mai 1967	215	6	0.03	7
	16 Août 1967	198	10	0.05	7
	12 Février 1968	216	22	0.10	3
	14 Avril 1968	215	15	0.07	3
Vevey	29 Mars 1966	256	41	0.16	9
	16 Juin 1966	274	49	0.18	9
	15 Septembre 1966	243	56	0.23	9
	15 Décembre 1966	214	17	0.08	9
	17 Février 1967	237	24	0.10	9
	30 Mai 1967	271	16	0.06	9
	18 Août 1967	216	17	0.08	9
CRG 9	24 Novembre 1967	177	19	0.10	5
	18 Avril 1968	222	28	0.13	5
	17 Septembre 1968	232	18	0.08	6
	14 Octobre 1968	223	13	0.06	6
	24 Novembre 1968	177	19	0.11	5

Evolution du cœfficient de variation des teneurs en tritium aux points : C.R.G. 6 ; Vevey ; C.R.G. 9

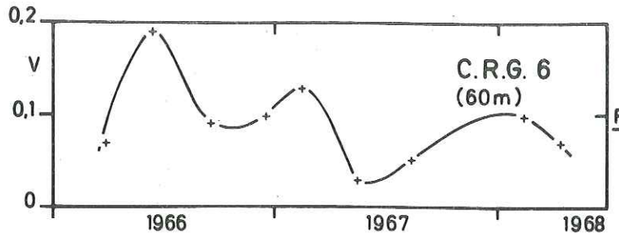


Figure : 26

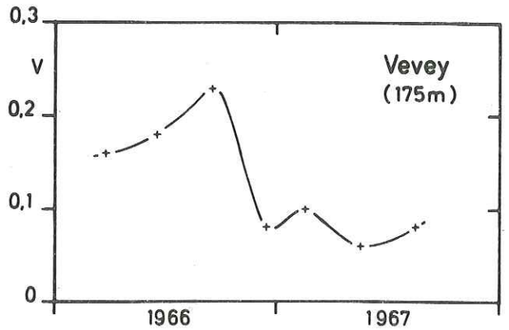
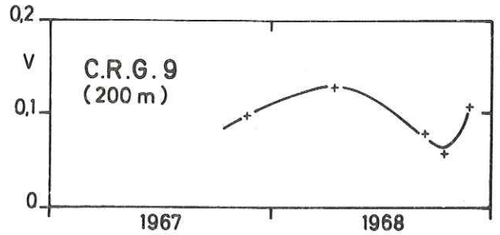


Figure : 27

Figure : 28



plus aussi importantes, d'autant plus que la teneur des apports diminue (figure 25). Ainsi, les eaux de fond du Grand Lac sont, nous le verrons, moins renouvelées que celles de la surface. Cependant, au fil des années des eaux tritiées pénètrent et diffusent dans cette région. C'est pourquoi, si le phénomène des mouvements verticaux d'origine thermique se renouvelle de façon sensiblement identique chaque année, il ne se traduit pas de la même façon en terme de coefficient de variation des teneurs en tritium.

La courbe en pointillé sur la figure 25, représente l'évolution du coefficient de variation dans les 50 premiers mètres. Il est bien moindre que pour l'ensemble des profondeurs, mais son comportement est plus capricieux et on ne saurait reconnaître de maxima ou de minima régulièrement répartis dans l'année. Il faut attribuer cela aux nombreux mouvements des eaux qui peuvent se développer dans la partie superficielle, notamment ceux provoqués par les vents. Mais cela doit également être lié au *mécanisme même des mouvements de convection*. Selon toute vraisemblance, *c'est le mécanisme décrit par FOREL*, c'est-à-dire, un mélange procédant par masses d'eaux, et non pas un mélange intime des eaux qui doit être retenu. On peut alors expliquer l'irrégularité de comportement du coefficient de variation entre 0 et 50 m.

Paradoxalement, alors que l'hétérogénéité des teneurs en tritium est grande sur l'ensemble des profondeurs, c'est la courbe du coefficient de variation des teneurs relative à toutes les profondeurs qui rend le mieux compte des mouvements verticaux d'origine thermique, alors même que ceux-ci sont limités à la partie superficielle du lac. Cela provient du fait que les mouvements verticaux d'origine thermique dominants sur l'ensemble du lac, ne le sont plus dans les 50 premiers mètres.

L'examen des figures 26, 27 et 28 relatives aux points CRG 6, Vevey et CRG 9 ne permet pas de tirer beaucoup de conclusions. Les

eaux sont à la limite de l'homogénéité. Le sens des variations et la place des extrêmes ne nous permettent pas de dire, comme pour les 50 premiers mètres du lac à CRG 10, qu'en ces points proches des bords ou de faible profondeur les mouvements verticaux dominants ne sont pas d'origine thermique.

Parallèlement à nos travaux, MEYBECK (1970), s'est intéressé aux éléments dissous qui auraient pu servir de traceur pour juger du mélange des eaux du lac. La plupart des éléments, comme d'ailleurs la résistivité, varient trop peu en fonction de la profondeur pour que leur étude soit fructueuse. Seule la *Silice dissoute* répondait bien aux exigences de l'étude : elle augmente régulièrement à partir de 50 mètres de profondeur jusqu'au fond en été et en automne. (En effet, c'est à partir de 50 mètres de profondeur que l'utilisation biologique de la Silice devient négligeable). En hiver, par le jeu des mouvements de convection la teneur en silice s'homogénéise jusqu'à plus de 50 mètres de profondeur. En Février 1968 et Mars 1969 cette homogénéité se remarque jusqu'à 150 mètres de profondeur ce qui pourrait s'accorder avec les résultats déduits du tritium. En Mars 1970 on observe pour la première fois une teneur en silice identique de la surface au fond. Nous n'avons malheureusement pas de point de comparaison avec le tritium à cette date. Il n'y a donc pas à l'heure actuelle de contradiction fondamentale entre les deux méthodes. Les doutes que nous pourrions formuler sur une homogénéisation complète en 1970 s'appuyeraient sur la stratification dynamique du lac que nous mettrons en évidence plus bas.

Nous conclurons donc, à la lumière des résultats déduits du tritium et enrichis par la silice, que les mouvements de convertion d'origine thermique intéressent en général la première centaine de mètres du lac. Cependant, le mécanisme de ces mouvements ne conduit pas à un mélange intime des eaux car il s'agit de mouvements discontinus de masses d'eaux.

5) CIRCULATION HORIZONTALE.

Nous nous intéressons ici à ce que FOREL appelait les *courants d'écoulement du lac*. Ces mouvements ne sont pas les plus rapides mais ils constituent en fait le phénomène dominant, car ils intéressent l'ensemble de la masse d'eau du lac.

FOREL a calculé la vitesse moyenne de ces courants suivant différentes sections du lac en le considérant comme un simple élargissement des affluents s'écoulant vers Genève, c'est-à-dire en supposant que les vitesses sont perpendiculaires à la section sur toute celle-ci, sans courant de retour. Pour un débit de 250 m^3/s à Genève, les valeurs sont alors les suivantes (tableau 19).

TABLEAU 19

Sections	Surface en km^2	Vitesse en cm/s
VEVEY ST-GINGOLPH	1,457	0.0060
OUCHY-PETITE RIVE	2,460	0.0036
ST PREX-DRANSE	1,475	0.0060
DETROIT DE PROMENTHOUX	0,135	0.0720
BARRE DU TRAVERS	0,0076	1.1300

Avec un débit de 600 m^3/s à Genève les chiffres de la dernière colonne deviendraient respectivement : 0.014, 0.0086, 0.014, 0.173, 2.70 cm/s. On voit que même dans ces circonstances, extrêmement simplifiées et favorables, les courants d'écoulement demeurent imperceptibles aux courantomètres dont le seuil de détection est de l'ordre du centimètre par seconde.

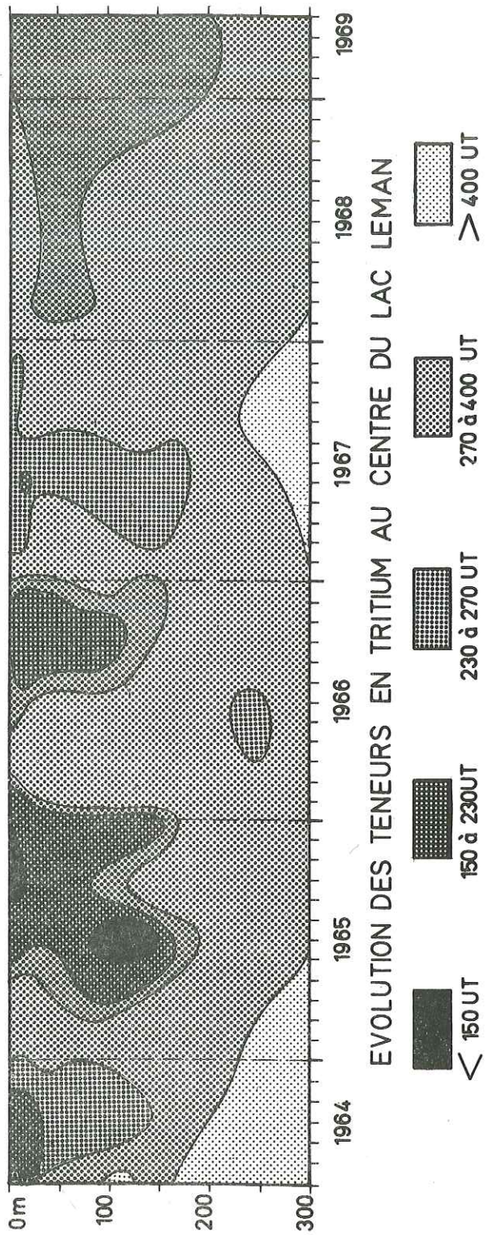


Figure 29

L'étude de ces mouvements a été effectué, grâce au traçage des eaux par le tritium, tout particulièrement au point CRG 10 qui s'avère bien représentatif des masses d'eau du Léman.

Nous avons représenté sur la figure 29, l'évolution des teneurs en tritium au point CRG 10, de 1964 à 1969. Les profondeurs sont portées en ordonnées, le temps en abscisse. La famille de courbes d'égales teneurs en tritium (courbes isotrites) que nous avons tracée sur ce diagramme comprend les isotrites 150, 230, 270 et 400 UT. Nous nous sommes efforcés de choisir ces valeurs de telle sorte que les intervalles soient suffisamment étroits dans les domaines les plus fréquents (de 150 à 300 UT), sans toutefois devenir comparables aux marges d'erreurs.

On constate sur le diagramme la présence chaque année de 1964 à 1967, de *noyaux de forte teneur*. A partir de 1968, ce *noyau annuel* n'est plus individualisable, *ce qui est à rapprocher de l'amortissement des courbes de la figure 25*. C'est en 1965 que le phénomène est le plus lisible et c'est cette année là que l'on peut observer les plus fortes teneurs jamais mesurées en ce point (422, 413 et 408 UT). Or, les essais thermonucléaires de 1961-1962 ont déterminé un maximum de teneur dans les précipitations en 1963 qui n'est apparu dans le Rhône et la Dranse qu'en 1964 (HUBERT et al 1970). C'est donc, nécessairement cette impulsion et par là même, en partie au moins, des eaux de la crue du Rhône de 1964 que l'on retrouve à CRG 10 vers 100 m de profondeur à partir de Mars-Avril 1965. En surface il en est autrement. En effet, l'étude de l'anomalie thermique observée au point CRG 10, nous a montré que des eaux du Rhône vieilles de quelques mois seulement se trouvaient en ce point. Comme tous les mouvements d'eau, en surface comme en profondeur, s'accompagnent de mélanges et de diffusion, il serait erroné de conclure sur ces simples bases à un temps de transit ou de séjour des eaux, mais seulement à un temps de propagation de la crête d'une impulsion. Les eaux du Rhône et de la Dranse avaient en 1964 une teneur que l'on peut estimer à environ

800 UT, les eaux du centre du Léman atteignent en 1964 une teneur moyenne de l'ordre de 300 UT entre 0 et 200 m. Tout comme les eaux souterraines, *les eaux du Léman tamponnent les variations de teneurs en tritium.* Pour l'instant nous conclurons donc seulement que *les noyaux de fortes teneurs mis en évidence en profondeur chaque année, sont à mettre en relation avec la crue du Rhône de l'année précédente.*

La deuxième constatation importante que l'on peut faire sur le diagramme de la figure 29 est que les eaux de 150 à 200 mètres jusqu'au fond, présentent des variations de teneurs lentes et de faibles amplitudes. Les isotrites sont moins nombreuses et moins pentues dans cette zone profonde que dans la zone superficielle où se développent les noyaux dont nous avons parlé.

C'est donc une division en trois couches de comportements dynamiques différents que nous suggèrent les isotrites du point CRG 10.

La *couche superficielle* est le siège des mouvements les plus rapides, mais sans doute aussi les plus désordonnés. Les impulsions du Rhône s'y transmettent en quelques mois jusqu'au centre du lac.

La *couche moyenne* est celle où de vastes masses d'eaux sont mises en jeu dans le processus même de renouvellement du lac. Il faut là un an à une impulsion du Rhône pour être transmise jusqu'au milieu du Léman.

Ces deux couches sont à rapprocher du mode de pénétration des rivières dans le Léman que nous avons décrit plus haut dont elles constituent en quelque sorte le prolongement.

Enfin, la *couche profonde* se distingue par des mouvements plus lents et ne semble pas directement liée à la pénétration des eaux fluviales dans le lac. Les seules perturbations directes doivent être apportées par les courants turbides, mais nous connaissons mal leur fréquence et les volumes d'eaux qu'ils mettent en jeu. On ne peut encore

TABLEAU 20

VALEUR MOYENNE, ECART TYPE ET COEFFICIENT DE VARIATION DES TENEURS EN TRITIUM DU 3/66 AU 8/67

	Profondeur en m	Moyenne en UT	σ en UT	V en %
CRG 6	0	248	35	14
	10	248	41	17
	20	236	24	10
	30	239	42	18
	40	229	34	15
	50	227	30	13
	fond	224	34	15
CRG 10	0	245	21	9
	10	250	32	13
	20	245	50	20
	30	231	54	23
	40	225	38	17
	50	230	44	19
	100	215	35	17
	150	210	26	12
	200	193	27	14
	250	181	43	24
	fond	148	25	17
Vevey	0	256	39	15
	10	263	50	19
	20	251	42	17
	30	262	44	17
	40	239	34	14
	50	236	45	19
	100	226	32	14
	150	230	41	18
	fond	216	17	8

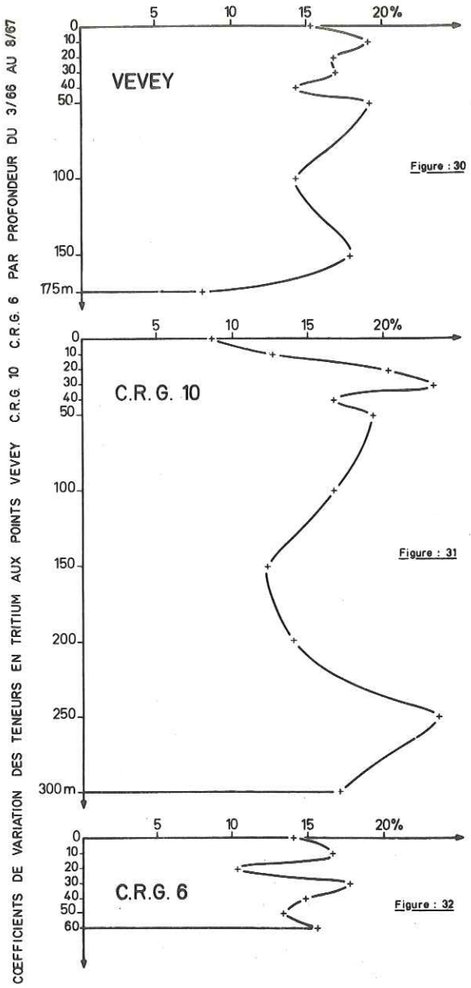


Figure : 30

Figure : 31

Figure : 32

se livrer qu'à des estimations.

Pour poursuivre, en l'élargissant, cette étude des teneurs en tritium du point CRG 10, nous avons étudié les coefficients de variation des teneurs en tritium pour chaque profondeur, aux points CRG 6, CRG 10 et Vevey entre Mars 1966 et Août 1967, période pour laquelle nous possédons des mesures de teneurs en tritium simultanées en ces trois points. Ces calculs (tableau 20) sont reportés sur les courbes des figures 30, 31 et 32. *La division du lac en trois couches y est bien lisible*. En CRG 6, CRG 10 et Vevey les variations de teneur en tritium marquent trois maxima dont les cotes s'accordent bien avec ce que nous savons déjà de la localisation des trois couches mises en évidence.

Nous avons essayé de rassembler l'ensemble de nos résultats sur la figure 33 en délimitant les couches par les lieux des minimums du coefficient de variation des teneurs en tritium que nous appellerons *les noeuds de variation* (en noir sur la figure 33). Nous appellerons *ventre de variation* les lieux des maxima du coefficient de variation des teneurs en tritium (en rouge sur la figure 33). Ils marquent les régions les plus actives de chaque couche. Nous avons ainsi un premier schéma, dont le défaut est d'être encore trop statique de la structure du Léman.

Enfin, il nous a semblé utile de revenir particulièrement au point CRG 10, *point représentatif du lac*, pour lequel nous disposons de la plus longue série de mesures, pour y effectuer sur l'ensemble les valeurs dont nous disposons, c'est-à-dire d'Août 1964 à Mars 1969, les calculs que nous venons de faire sur une période plus réduite (tableau 21), pour les trois points Vevey, CRG 10, CRG 6.

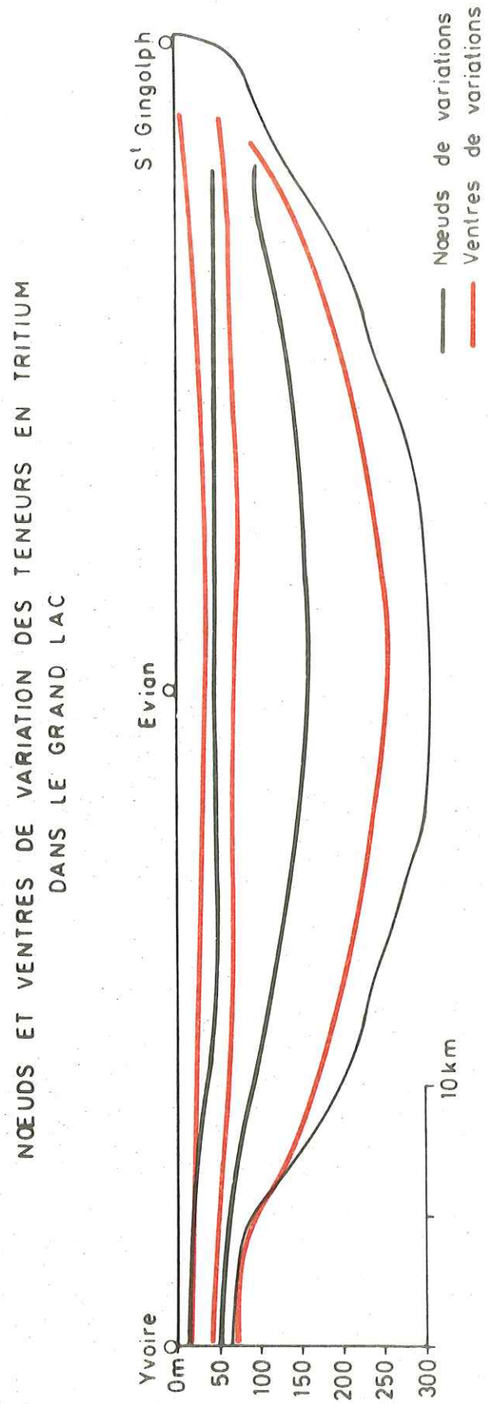


Figure 33

TABLEAU 21

MOYENNE, ECART-TYPE ET COEFFICIENT DE VARIATION DES TENEURS EN TRITIUM

AU POINT CRG 10 DU 18/6/1964 AU 18/3/1969

Profondeur (m)	m (UT)	σ (UT)	V = σ/m
0	225	69	0.27
10	259	60	0.23
20	253	51	0.20
30	215	54	0.25
40	231	50	0.22
50	240	43	0.18
100	232	60	0.26
150	223	51	0.23
200	184	36	0.20
250	117	42	0.24
300	147	34	0.23

Les diagrammes de la valeur moyenne m, de l'écart-type σ et du coefficient de variation V en fonction de la profondeur sont tracés sur les figures 34, 35 et 36 respectivement. C'est à partir de ces valeurs, parce qu'elles sont représentatives de l'évolution du Léman sur une période plus longue, que nous déterminerons les profondeurs, en CRG 10, des noeuds et des ventres de variations plutôt qu'à partir des valeurs de la figure 31.

Nous connaissons ainsi les limites des différentes couches que nous avons mises en évidence et dont les profondeurs nous étaient seulement suggérées sur le diagramme des isotrites de CRG 10.

Sur les figures 35 et 36, *les noeuds de variation apparaissent à 50 - 200 et 300 m. Les ventres de variations qui ne sont bien marqués*

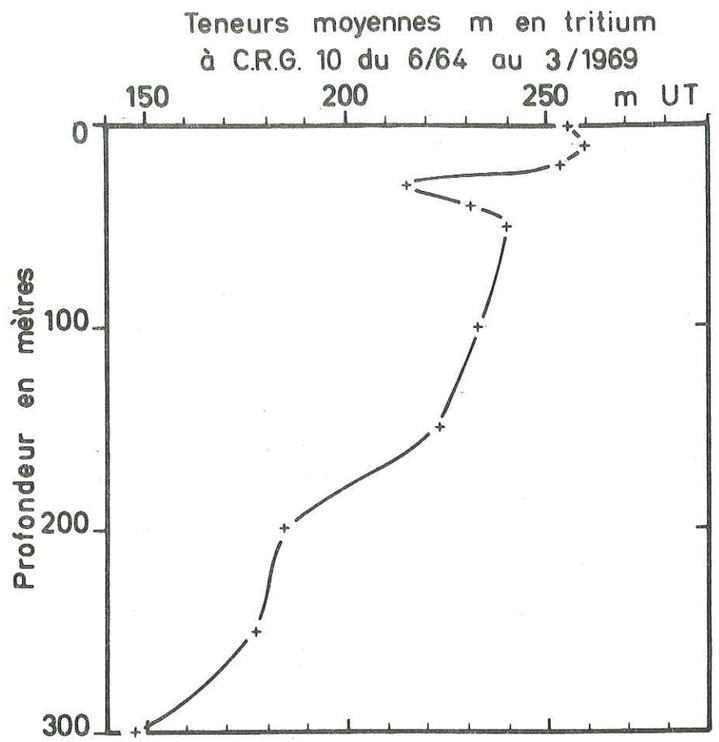


Figure : 34

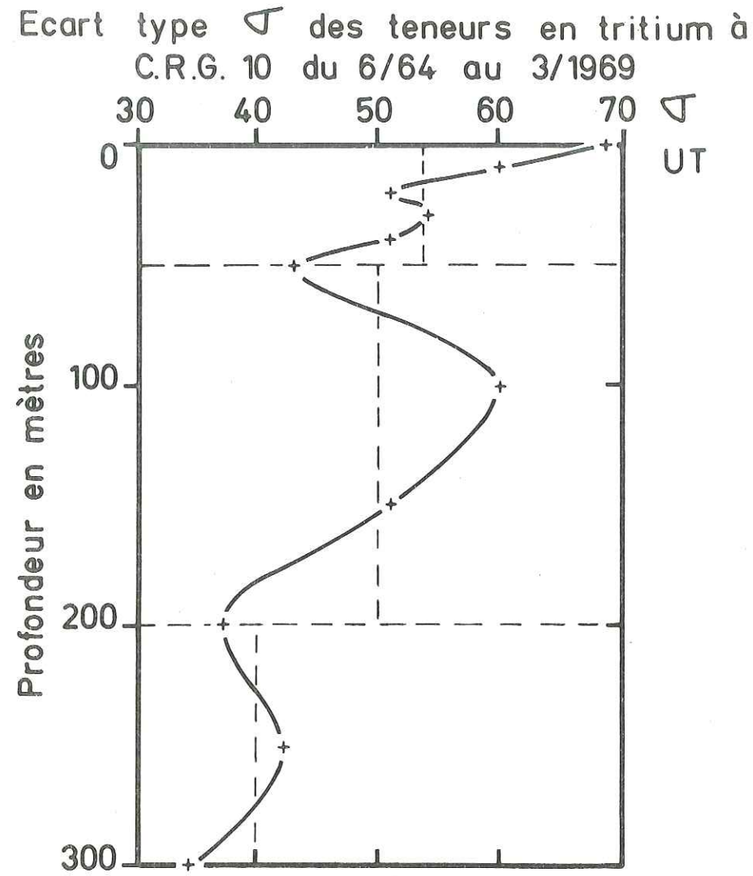


Figure : 35

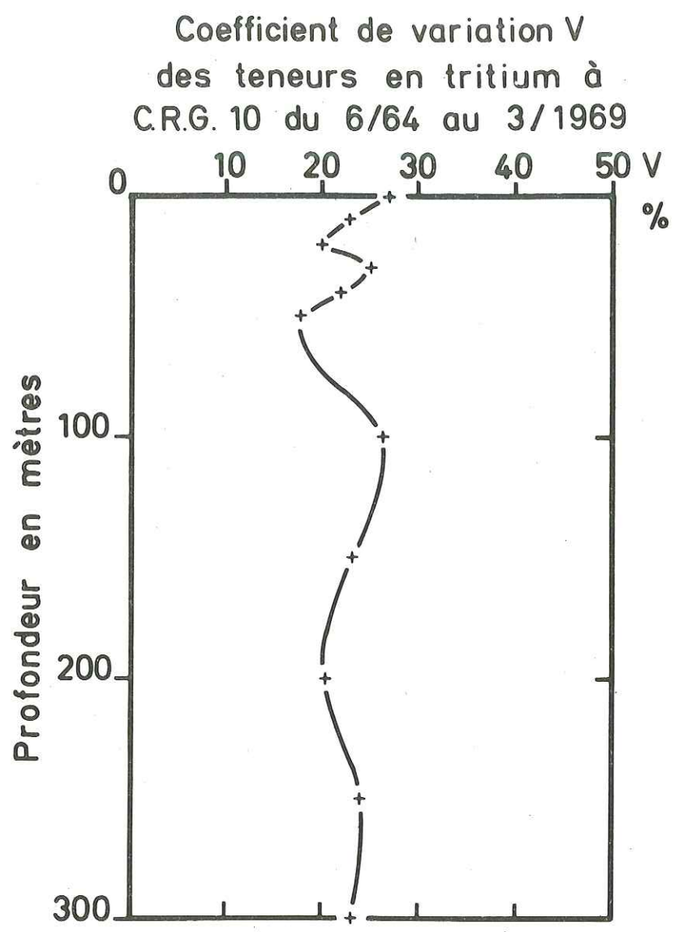


Figure : 36

que dans la couche superficielle et la couche moyenne se trouvent respectivement vers 0 m et vers 100 m de profondeur. Nous retrouverons donc ici une bonne concordance entre les résultats de l'étude de la pénétration des rivières dans le lac, et l'analyse des teneurs en tritium du lac. Les ventres de variation des teneurs en tritium se trouvent précisément aux profondeurs où se manifestent le plus activement le Rhône et la Dranse au voisinage de leur embouchure.

CINQUIEME CHAPITRE

ESSAI NUMERIQUE

Nous avons jusqu'ici étudié le Léman de façon essentiellement qualitative en utilisant principalement les propriétés de traceur du Tritium. Nous essayerons dans ce chapitre de déterminer *l'âge des eaux du Léman* en nous fondant sur les propriétés de dateur relatif du Tritium. Nous aurons à effectuer un certain nombres de calculs numériques, ce qui implique que nous devrons nous soucier des erreurs de mesures ainsi que des erreurs entraînées par les hypothèses que nous avons été ou que nous serons amenés à émettre. Nous grouperons les remarques et les calculs relatifs aux certitudes en fin de chapitre pour discuter de la valeur qu'il convient d'attribuer à nos résultats.

Un lac est un réservoir dont l'eau se renouvelle par le jeu des apports d'eau (affluents, précipitations, ruissellement, sources sous-lacustres) et des départs d'eau (émissaire, évaporation, pertes sous-lacustres). Effectuer le bilan hydrologique d'un lac c'est mesurer ou évaluer ces différents apports ou pertes. En admettant que le lac est en équilibre hydrologique on peut calculer un débit moyen d'alimentation et de perte Q, et mesurer son volume V. On appellera alors temps de renouvellement du lac le rapport.

$$\tau = V/Q$$

τ est le temps théorique qu'il faudrait pour que le lac se vide (en l'absence d'apports) ou se remplisse (en l'absence de pertes).

C'est aussi le temps de séjour moyen des eaux dans le lac.

Le temps de séjour d'une molécule d'eau dans le lac est le temps écoulé entre son entrée et sa sortie du lac. Ce temps peut être très court et à la limite peut tendre vers zéro. Il peut également être très long et peut théoriquement tendre vers l'infini. Chaque molécule d'eau du réservoir lacustre a donc un temps de séjour particulier qui peut varier entre 0 et l'infini et la distribution des temps de séjour des molécules d'eau peut être décrite par les méthodes de la statistique.

On admet généralement qu'un lac est un milieu bien mélangé. Cela signifie que la probabilité de fin du séjour d'une molécule d'eau dans le lac est indépendante du temps qu'elle y a déjà séjourné. Les lois qui décrivent la distribution des temps de séjour t sont alors particulièrement simples et ne dépendent que d'un seul paramètre, leur moyenne τ (COX 1966).

La densité de probabilité du temps de séjour t est alors égale à

$$f(t) = (1/\tau) \exp(-t/\tau)$$

et la fonction de répartition des temps de séjour est

$$F(t) = 1 - \exp(-t/\tau)$$

(C'est la fraction de molécules d'eau dont le temps de séjour est inférieur ou égal à t).

Le bilan hydrologique du Léman a été effectué (BLAVOUX et al 1962). Il rend possible le calcul de son temps de renouvellement τ = 11 ans. Ce temps est connu avec une approximation qui est de l'ordre de grandeur de celle des mesures de débits, mesures qui conduisent aux termes prépondérants du bilan.

Il serait donc possible, sur la base des hypothèses que nous avons rapportées, de décrire la distribution des temps de séjour par les lois que nous avons signalées. Mais cette façon de faire ne nous semble pas satisfaisante. En effet, après ce que nous venons de mettre en évidence dans le Léman, il n'est pas possible de considérer ce milieu comme bien mélangé. Il nous semble plus correct de le considérer comme la juxtaposition de 3 réservoirs constitués par les trois couches que nous avons définies. Cela ne doit pas être interprété trop strictement car il y a bien entendu relation et échange entre ces 3 réservoirs. Nous avons par exemple pu voir que les mouvements de convection thermique pouvaient intéresser les 2 premières couches. Ceci dit, *nous appliquerons à chaque réservoir les hypothèses de bon mélange habituellement émises pour le réservoir lacustre dans son ensemble*. Mais pour cela nous devons attribuer un temps de renouvellement à chacun des trois réservoirs. Ces temps de renouvellement ne peuvent pas être atteints par des méthodes purement hydrologiques car si nous pouvons évaluer le volume des réservoirs il nous est impossible de mesurer la répartition par réservoir des apports en eau. C'est pourquoi nous avons cherché une grandeur susceptible de rendre compte du temps de renouvellement de chaque réservoir ; *nous pensons que l'écart-type moyen de la distribution constitué par les teneurs en tritium de chaque couche, de 1964 à 1969, est une grandeur adéquate.*

En effet, parce que la teneur en tritium des apports a constamment diminué, passant de 680 UT en 1965 à 200 UT en 1969, le renouvellement des eaux dans un domaine du réservoir lacustre a été

nécessairement accompagné de variations de teneurs en tritium, d'autant plus importantes que le renouvellement y a été intense. La dispersion de ces teneurs est mesurée par l'écart-type moyen de la distribution des teneurs en tritium du domaine considéré pendant la période envisagée. C'est cet écart-type moyen, et non le coefficient de variation que nous utiliserons ici car la connaissance de la rapidité du renouvellement exige la connaissance de la dispersion absolue et non de la dispersion relative des teneurs en tritium.

Nous avons à partir de la figure 35 déterminé les écarts-types moyens par couche pour la période allant de Juin 1964 à Mars 1969.

Couche superficielle σ_s = 54 UT

Couche moyenne σ_m = 50 UT

Couche profonde σ_p = 40 UT

Nous avons apprécié le volume des couches superficielle, moyenne et profonde à respectivement 23, 40 et 23 km^3 en nous basant sur les valeurs de Hubault (cf tableau 7) que nous avons modifiées pour tenir compte du fait que les limites des couches ne sont pas horizontales (figure 33).

Pour l'ensemble du lac la valeur de l'écart-type moyen sera obtenue en effectuant la moyenne des écarts-types de couche, pondérés par le volume auquel ils s'appliquent.

$$\sigma_o = 48 \text{ UT}$$

qui correspond à un temps de renouvellement

$$\tau_o = 11 \text{ ans}$$

Ce dernier calcul est nécessaire car les seules valeurs σ_s, σ_m et σ_p ne nous permettent pas de faire des datations absolues. *Il faudra les utiliser relativement à* σ_o. C'est pourquoi nous introduirons les grandeurs réduites (c'est-à-dire sans dimension) suivantes.

$$m_s = \sigma_s/\sigma_o \qquad m_m = \sigma_m/\sigma_o \qquad m_p = \sigma_p/\sigma_o$$

Nous procéderons de même pour les temps de renouvellement τ_s, τ_m et τ_p par rapport à τ_o, et nous introduirons donc trois grandeurs réduites supplémentaires.

$$T_s = \tau_s/\tau_o \qquad T_m = \tau_m/\tau_o \qquad T_p = \tau_p/\tau_o$$

Nous chercherons maintenant à exprimer les T en fonction des m que nous connaissons (m_s = 1,13, m_M = 1,04, m_p = 0,833).

Nous avons hélas bien peu de renseignements sur la fonction $T = \phi(m)$. Nous savons seulement que $\phi(1) = 1$ et que la fonction ϕ est strictement décroissante. Il n'est pas question d'introduire des conditions aux limites (c'est-à-dire pour $m \to o$ ou $m \to \infty$) car en réalité m reste toujours dans un voisinage de 1.

Nous prendrons donc l'hypothèse la plus simple : une liaison linéaire entre T et m et nous écrirons :

$$T = \alpha\ (m - 1) + 1$$

avec $\alpha < o$ puisque T est une fonction décroissante de m. En fait, il s'agit là d'une famille de fonction à un paramètre. Il nous faut donc choisir, ou déterminer α. Nous verrons tout à l'heure comment cela pourra se faire grâce à une optimisation, et provisoirement, nous considérerons les temps de renouvellement τ_s, τ_m et τ_p des couches superficielle, moyenne et profonde comme des fonctions de α.

$$\tau_s\ (\alpha) = \alpha\ (m_s - 1)\ \ \tau_o + \tau_o$$

$$\tau_m\ (\alpha) = \alpha\ (m_m - 1)\ \ \tau_o + \tau_o$$

$$\tau_p\ (\alpha) = \alpha\ (m_p - 1)\ \ \tau_o + \tau_o$$

Les temps de renouvellement de chaque couche, avec les hypothèses simplificatrices évoquées plus haut, permettent de déterminer, pour chaque couche, puis pour le lac dans son ensemble la densité de probabilité du temps de séjour d'une molécule d'eau ainsi que la fonction de répartition de ces temps de séjour. En particulier on peut à partir de la fonction de répartition déterminer la fraction a_α (n) des eaux dont le temps de séjour dans le lac est compris entre n-1 et n années.

$$a_\alpha\ (n) = F_\alpha\ (n) - F_\alpha\ (n - 1)$$

Si F_α (t) est la fonction de répartition des temps de séjour des eaux dans l'ensemble du lac.

En raison de l'hypothèse de bon mélange dans chaque couche admise plus haut, cette fraction a_α (n) d'eaux dont l'âge est compris entre n - 1 et n années se retrouvera dans les eaux quittant le lac à tout moment. Or, nous avons mesuré les quantités de tritium sorties du lac à GENEVE de 1965 à 1968, soient G_n ces quantités (tableaux 5 et 14). D'autre part, les mesures effectuées sur les affluents du Léman et sur les précipitations de 1964 à 1969 nous ont permis (BOSCH et al 1970, HUBERT et al 1970) de déterminer les teneurs des apports antérieurs et donc connaissant les débits des affluents et les hauteurs des précipitations de calculer les quantités de tritium apportées chaque année au Léman, soient F_n (tableau 22).

TABLEAU 22

n	F_n
1968	1 900
1967	2 600
1966	3 800
1965	5 300
1964	5 400
1963	5 400
1962	1 400
1961	1 100
1960	1 300
1959	1 200
1958	600
1957	600
1956	700
1955	900
1954 et avant	200

(F_n est exprimé en UT x km^3. Par soucis d'homogénéité nous avons conservé partout les valeurs issues du calcul même à partir de 1965).

D'après nos hypothèses la quantité

$$G'_n\ (\alpha) = \sum_{p=1}^{p=\infty} a_\alpha\ (p)\ \delta\ [(2p - 1)/2]\ F_{n - p + 1}$$

doit représenter la quantité de tritium sortie à GENEVE pendant l'année n. (La fonction δ (t) définie au chapitre 3 effectue la correction de décroissance).

Il est évident, en raison de la faible teneur des apports avant 1956 d'une part, de la décroissance radioactive d'autre part qu'à partir d'un certain rang p les termes introduits seront négligeables. Nous nous sommes ici limités à p = 16.

Nous voyons donc maintenant de quelle façon il nous sera possible de déterminer α.

En effet, la quantité $G'_n(\alpha)$ déterminée par le calcul doit être égale à la valeur G_n déterminée sur la base des mesures. Nous choisirons dans la valeur de α qui minimisera l'écart entre les G_n et les $G'_n(\alpha)$ et nous caractériserons cet écart par l'expression :

$$\Delta(\alpha) = \sum_{n=1965}^{n=1968} (G_n - G'_n(\alpha))^2$$

puisqu'α minimise $\Delta(\alpha)$ il sera solution de :

$$\frac{d\,\Delta(\alpha)}{d\,\alpha} = o$$

Comme l'expression de $\Delta(\alpha)$ en fonction de α n'est pas simple, il nous a semblé préférable de rechercher graphiquement la ou les solutions de cette équation. Nous avons calculé la fonction $\Delta(\alpha)$ pour différentes valeurs de α (tableau 23) et tracé sa courbe représentative (figure 37). La fonction $\Delta(\alpha)$ est minimale pour $\alpha = -5$.

α	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7
$\Delta(\alpha).10^{-6}$	0,547	0,460	0,347	0,232	0,156	0,179	0,281

Tableau : 23

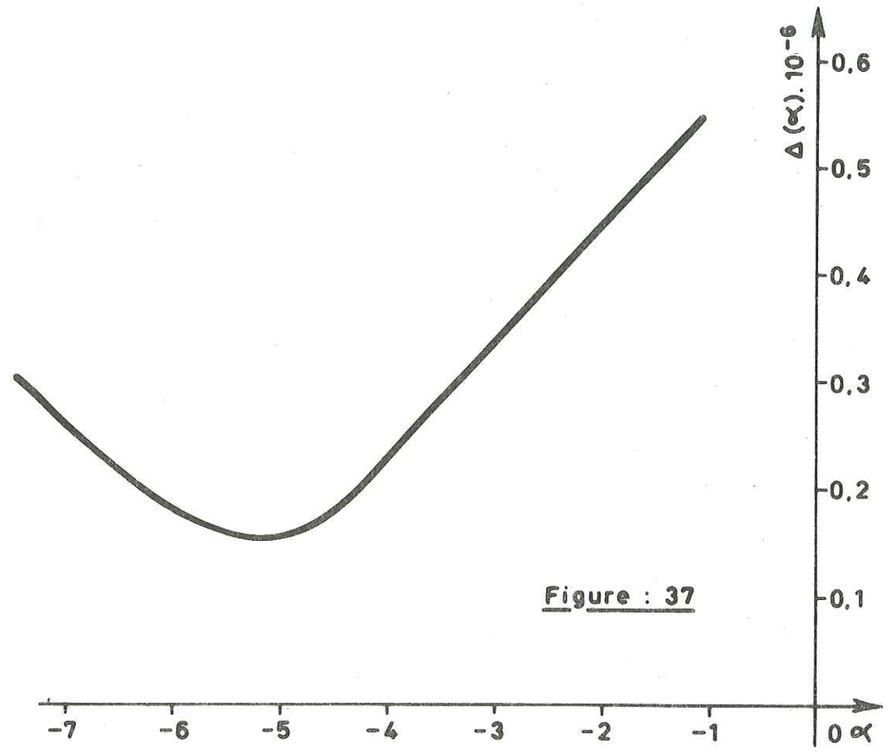


Figure : 37

A la valeur $\alpha = -5$ correspondent les temps de renouvellement suivants :

$$\tau_s = 4 \text{ ans} \qquad \tau_m = 9 \text{ ans} \qquad \tau_p = 20 \text{ ans}$$

ce qui nous permet de tracer la fonction f (t) densité de probabilité du temps de séjour t (figure 38), la fonction de répartition des temps de séjour F (t) (figure 39) et l'histogramme des coefficients a_p (figure 40).

Cependant ces résultats doivent être discutés. Ils s'appuient sur des hypothèses : la régularité de l'alimentation, la division en trois couches bien mélangées, la validité de l'écart-type moyen des teneurs en tritium comme grandeur représentative du temps de séjour, et enfin le choix d'une relation linéaire entre les variables réduites m et T. Ils s'appuient aussi sur des valeurs numériques : le volume des couches, les écarts-types moyens, des quantités de tritium mesurées ou estimées.

Les hypothèses que nous avons émises ne conduisent pas à des absurdités. Il n'en demeure pas moins qu'il est certain qu'elles sont la source d'incertitudes qu'il est difficile de chiffrer mais qui, à notre avis, sont plus importantes que les incertitudes entraînées par des valeurs numériques connues à 5 ou 10 % près. *C'est pourquoi nous ne considérerons nos résultats que comme des ordres de grandeur et non comme un modèle du Léman.* Ainsi, reprenant les temps de renouvellement déterminés par les trois couches du Léman, nous dirons simplement que *le temps de renouvellement des couches superficielles et moyennes est inférieur à 10 ans*, et que *celui de la couche profonde est de l'ordre de 20 ans.* Il faudra considérer avec la même distance les fonctions f (t) et F (t) ainsi que les coefficients a_p.

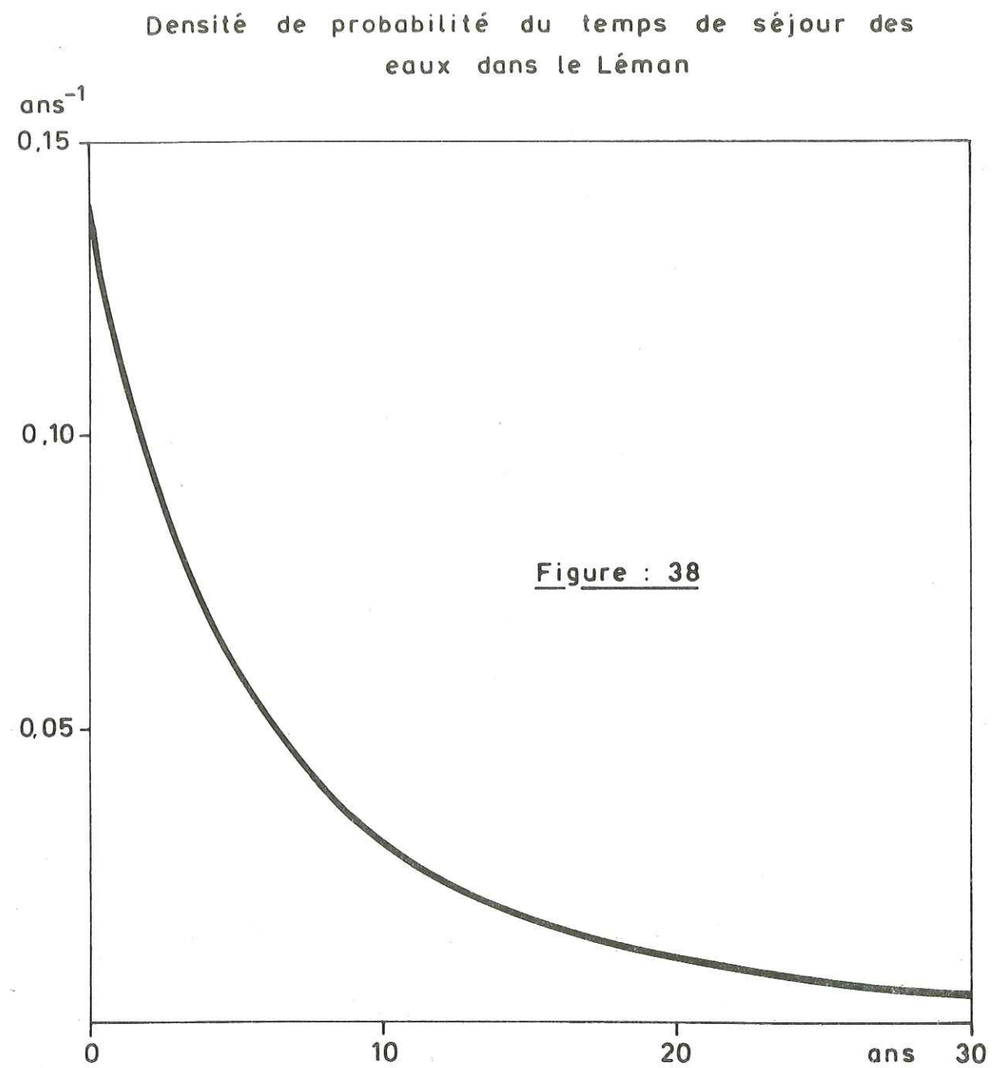


Figure : 38

Fonction de répartition du temps de séjour des eaux dans le Léman.

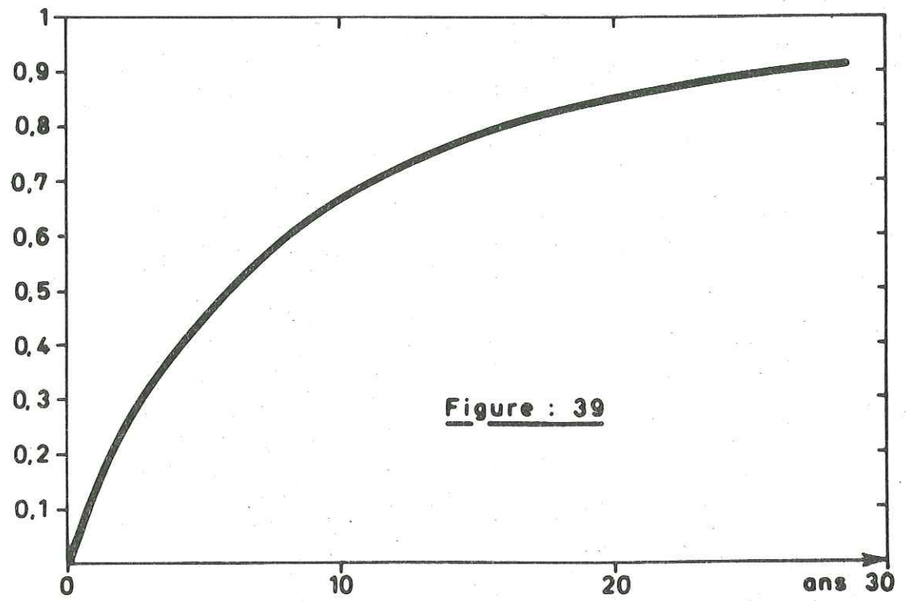


Figure : 39

Histogramme des cœfficients α_p

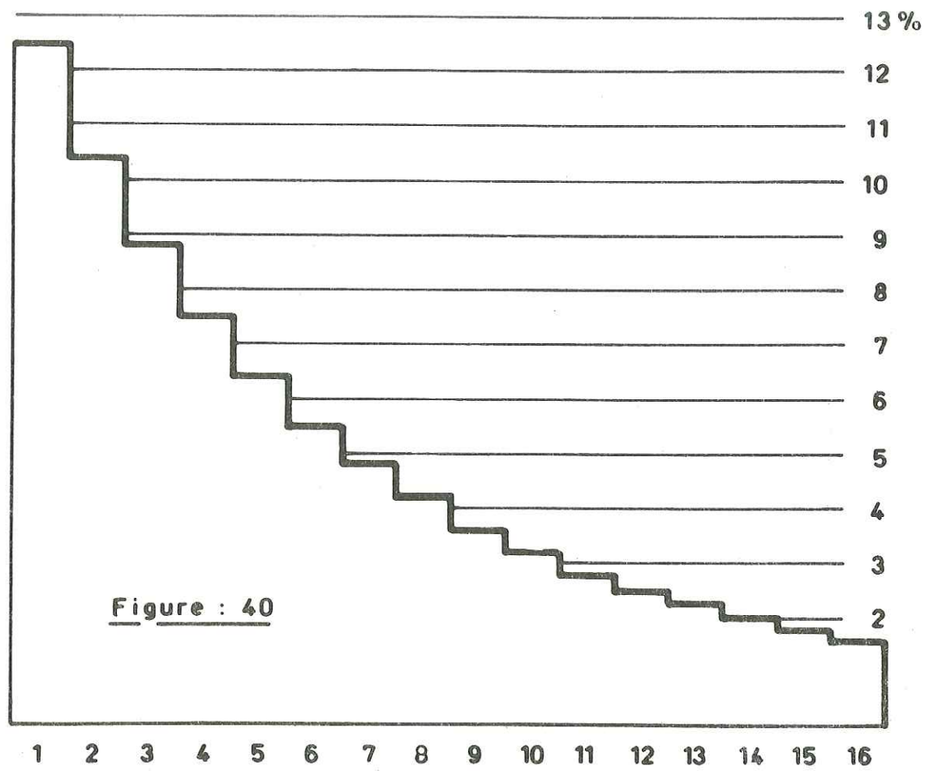


Figure : 40

18 AOUT 2003
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
050 032345 1

Cependant nous pensons que même avec les quelques éléments que nous avons pu rassembler, cette étude a permis d'avancer dans la connaissance du temps de séjour des eaux dans le Léman.

CONCLUSIONS

A l'issue de cette étude nous voudrions tout d'abord rappeler l'ensemble des résultats que nous avons obtenus et montrer leur unité (figure 41). Nous voudrions aussi dégager de ces résultats quelques conséquences quant à l'étude et à la surveillance du Léman en particulier et des lacs en général. Nous voudrions enfin réfléchir sur la méthode du tritium en limnologie.

Nous avons pu mettre en évidence dans le Léman trois couches de comportements dynamiques différents, étroitement liés au mode de pénétration et de mélange des eaux des affluents dans les eaux du Léman. Il existe en effet une contradiction entre les eaux lacustres, relativement stagnantes et les eaux fluviales. L'équilibre dynamique résultant de ce conflit évolue suivant les saisons et l'on peut observer deux aspects extrêmes.

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

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

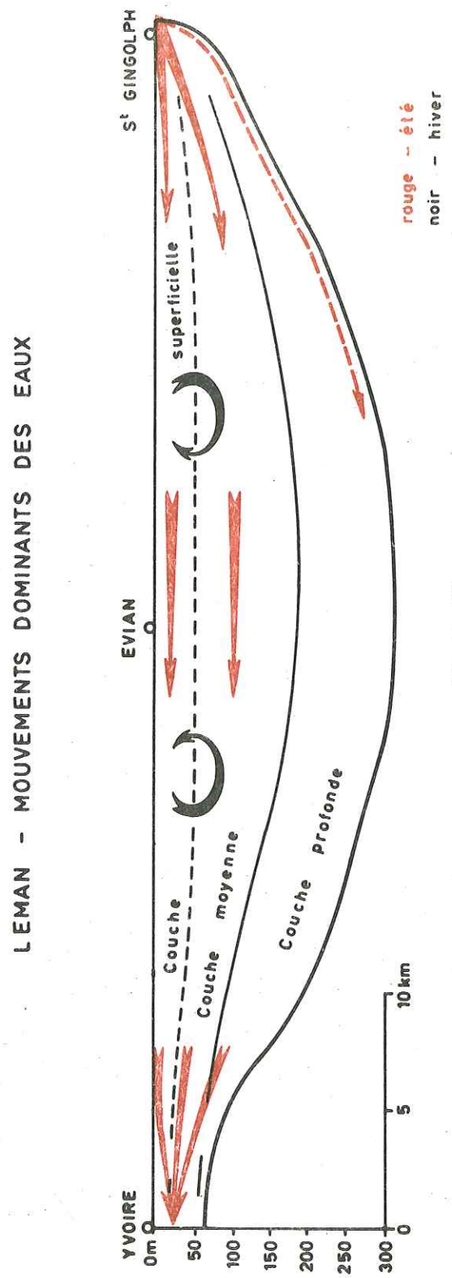


Figure : 41

Dans tous les cas la couche profonde (au-delà de 200 mètres de profondeur) conserve son individualité. Il est même possible qu'elle ne soit renouvellée qu'à la faveur des courants de turbidité qui ne se produisent qu'en période de crue. Ils peuvent probablement à eux seuls justifier un temps de renouvellement d'une vingtaine d'années.

La distinction entre les couches superficielle et moyenne ne prend vraiment tout son sens qu'en été car à bien des égards la couche superficielle apparait comme la fraction de la couche moyenne soumise aux influences externes (vents, température, précipitations, évaporation...). C'est pourquoi, compte tenu des incertitudes de méthode et des mesures nous ne différencierons pas leur temps de renouvellement qui est inférieur à 10 ans.

Nous pensons que cette première approche du comportement dynamique global du Léman n'est pas sans conséquences dès lors que l'on veut l'étudier, le surveiller ou le transformer. Cela est d'autant plus vrai que les phénomènes chimiques et biologiques, que nous n'avons pas abordés dans cette étude, sont à la fois *superposés et liés aux phénomènes dynamiques*. L'étude, la surveillance ou l'action devront donc être diversifiés selon les domaines de leur application. Il n'est pas concevable d'étudier de la même façon les premières dizaines de mètres du lac, étroitement soumises aux conditions extérieures et susceptibles d'évoluer à l'échelle de la semaine, et la zone abyssale qui n'est elle susceptible d'évoluer qu'à l'échelle de l'année. De la même façon il n'est pas possible d'attendre de la lutte contre la pollution les mêmes résultats dans des domaines lacustres dont les temps de réponse sont essentiellement différents. Un milieu comme le Léman est diversifié, cette étude nous l'a montré, et cela doit être pris en compte.

Cette étude a été possible parce qu'à la suite des essais thermonucléaires on a pu observer, pendant plusieurs années, de

notables différences de teneurs en tritium entre les eaux du lac et les eaux de ses affluents. Ces différences ont amené une hétérogénéité des teneurs en tritium des eaux du Léman, hétérogénéité dont nous nous sonnes servis pour déceler certains mécanismes de la dynamique lacustre jusqu'alors masqués pour l'essentiel par l'équilibre chimique du lac et de ses affluents. Mais aujourd'hui, et nous l'avons quelquefois remarqué (figure 25 et 29), les teneurs en tritium du lac et de ses affluents tendent à s'égaliser.

En effet, l'apport de tritium ne peut plus maintenant être considéré comme une impulsion par rapport aux échelles de temps propres au lac (une dizaine d'années). Cela s'observe également dans d'autres lacs : on trouve désormais du tritium dans la couche stagnante (monimolimnium) du lac Pavin. La méthode du tritium devient donc moins féconde dans certains cas. C'est dans des lacs à très long temps de renouvellement, comme le lac Baïkal, que l'on peut s'attendre aujourd'hui à observer des teneurs en tritium suffisamment hétérogènes pour en tirer des conclusions. De larges possibilités s'ouvrent donc encore à l'usage du tritium en limnologie.

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

ALVINERIE J., DEGOT B., LEVEQUE P., VIGNEAUX M., 1966. Activité en tritium et caractéristiques chimiques des eaux du lac Pavin.
C.R. Ac. Sc., Paris, Série D, 262, 846-849.

ALVINERIE J., DEGOT B., LEVEQUE P., VIGNEAUX M., 1966. Etude de l'activité en tritium du bassin versant du Mont-Cenis.
C.R. Ac. Sc., Paris, Série D, 262, 32-35.

ANNUAIRES HYDROGRAPHIQUES DE LA SUISSE. Service Fédéral des eaux. Berne.

BAKALOWICZ M., OLIVE Ph., 1970. Teneurs en tritium des eaux du karst du Taurus de Pisidie (Turquie).
Revue Suisse d'Hydrologie, 2.

BARRY P.J., MERRIT W.L., 1970. The Perch lake evaporation study, Isotope hydrology 1970, I.A.E.A., Vienne. 139-151.

BETANT A., PERRENOUD G., 1932. Etudes sur la partie occidentale du Lac Léman, courants et températures.
Mem. Soc. Phys. et Hist. Nat., Genève, 41, 2.

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

BLAVOUX B., OLIVE Ph., 1966. Premiers résultats sur les teneurs en tritium des eaux du Lac Léman.
C.R. Ac. Sc., Paris, Série D, 262, 2445-2448.

BOSCH B., QUEGAN B., HUBERT P., MARCE A., OLIVE Ph., SIWERTZ E., 1970. Les cycles atmosphère-hydrosphère du tritium sous les latitudes moyennes.
C.R. Ac. Sc., Paris, Série D, 270, 267-270.

CHESSELET R., NORDEMANN D., DUSSART B., 1963. Détermination par détection nucléaire des coefficients de diffusion et des courants dans les eaux naturelles. Evolution de la surface de collection d'un grand lac alpin pour les retombées radioactives.
Radioisotopes in hydrology, Symposium Tokyo, I.A.E.A. Vienne. 63-75.

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

CROUZET E., HUBERT P., MEYBECK M., OLIVE Ph., 1970. Etude de la dynamique des lacs par les méthodes isotopiques.
Cong. Ass. Franc. de Limnologie. Ann. St. Hydrobiol. Besse en Chandesse. 4, 367-376.

COMMISSION FRANCO-SUISSE POUR LA PROTECTION DES EAUX DU LEMAN ET DU RHONE CONTRE LA POLLUTION. (Rapports).

COX D.R., 1966. Théorie du Renouvellement, Dunod, Paris.

DELEBECQUE A., 1892-1896. Atlas des lacs français.

DELEBECQUE A., 1898. Les lacs français, Béranger, Paris, 463 p.

DIENERT F., GUILLERD A., 1948. Mouvement de l'eau dans les lacs, A.I.H.S.
Assemblée Générale d'Oslo, 1, 379-385.

DUSSART B., 1948. Recherches hydrographiques sur le Lac Léman.
Ann. St. Centr. Hydrobiol. Appl. 2, 187-206.

DUSSART B., 1954. Température et mouvement des eaux dans les lacs, introduction à l'étude d'un milieu.
Ann. St. Centr. Hydrobiol. Appl. 5, 7-128.

DUSSART B., 1966. Limnologie, l'étude des eaux continentale, Gauthier-Villars, Paris, 677 p.

DUSSART B., SUCHET M., 1952. Influence du Rhône sur l'état thermique du Lac Léman.
C.R. Ac. Sc. Paris, 235, 806-808.

FOREL F.A., 1895-1904. Le Léman, monographie limnologique, Rouge, Lausanne. Tomes I, II et III.

FREDERICK B.J., 1963. Labeling lake water with tritium.
Int. Journal of Appl. Radiation and isotopes, 14, 401-404.

GAT J.R., 1970. Environmental isotopes balance of lake Tiberia, Isotope hydrology 1970, I.A.E.A., Vienne. 109-127.

GLANGEAUD L., 1949. Epistémologie des sciences naturelles et structure du réel.
XV Congrès Int. Philosophie des Sciences, Hermann. Paris, 1, 127-139.

GLANGEAUD L., 1955. Classification des sciences de la matière et de leurs méthodes.
Conf. Intersciences de l'Institut H. Poincarré.
Revue Gale des Sc., LXII, 5-6, 30 p.

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.

GORCEIX Ch., *KREITMANN L.*, 1929. Etude thermique de la "Bataillère" sur le Léman.
Soc. Internat. d'Hydr. Scient., 1-11.

HUBAULT E., 1947. Etudes thermiques, chimiques et biologiques des eaux des lacs de l'Est de la France.
Ann. Ecole Nat. des Eaux et Forêts, X, 2, 116-220.

HUBERT P., *MARIN E.*, *MEYBECK M.*, *OLIVE Ph.*, *SIWERTZ E.*, 1969. Aspects hydrologique, géochimique et sédimentologique de la crue exceptionnelle de la Dranse du Chablais du 22 Septembre 1968.
Arch. Sciences, Genève, 22, 3, 581-604.

HUBERT P., *MEYBECK M.*, *OLIVE Ph.*, 1970. Etude par le tritium de la dynamique du Léman (Lac de Genève).
C.R. Ac. Sc. Paris, Série D, 270, 1298-1301.

HUBERT P., *MARCE A.*, *OLIVE Ph.*, *SIWERTZ E.*, 1970. Etude par le tritium de la dynamique des eaux souterraines.
C.R. Ac. Sc., Paris, Série D, 270, 908-911.

HUTCHINSON G.E., 1957. A treatise of limnology, John Wiley, New-York, 1015 p.

KREITMANN L., 1931. Etudes des courants du Lac Léman.
Les études rhodaniennes, VII, 2, 109-130.

LEVEQUE P., *VIGNEAUX M.*, 1965. Résultats des mesures d'activité en tritium de certaines eaux du sud-ouest.
C.R. Ac. Sc. Série D, 261, 4168-4171.

LEVEQUE P., *VIGNEAUX M.*, *ALVINERIE J.*, 1966. Evolution de l'activité en tritium dans le sud-ouest de la France.
Isotopes in hydrology, I.A.E.A., Vienne. 417-432.

LEVEQUE P., *PAPAKIS N.*, 1969. Etude de l'activité en tritium de quelques résurgences karstiques en Grèce méridionale.
C.R. Ac. Sc., Paris, 268, 1023-1025.

MERCANTON P.L., 1932. Etude de la circulation des eaux du Lac Léman.
Mem. Soc. Vaud. de Sc. Nat., 4, 225-271.

MEYBECK M., 1970. Bilan hydrochimique et géochimique du Lac Léman.
Thèse 3ème cycle, Paris.

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.
Isotope hydrology 1970, A.I.E.A., Vienne, 523-541.

OLIVE Ph., 1970. Contribution à l'étude géodynamique du cycle de l'eau dans l'hémisphère nord par la méthode du tritium. Thèse, Paris.

PAYNE B.R., 1970. Water balance of lake Chala and its relations to ground water from tritium and stable isotope datas. Journal of hydrology, 11, 47-58.

ROETHER W., 1966. Estimating the tritium input to groundwater from wines samples : ground water and direct run off to central european surface waters. Isotopes in hydrology, I.A.E.A., Vienne, 73-91.

SHEPARD H., *DILL R.F.*, 1966. Submarine canyons and other sea valleys. Rand Mc Nally and co, Chicago.

SIEGENTHALER V., *OESCHCER M.*, *TONGIORGI E.*, 1970. Tritium and 180 in natural water samples from switzerland. Isotope hydrology 1970, I.A.E.A., Vienne, 373-385.

В. Н. СОЙФЕР, В. В. РОМАНОВ, М. Н. ШИМАРАЕВ (1966). Использование изотопных методов при изучении водного режима озера Байкал.
SOIFER, ROMANOF, CHIMARAIEF.
Utilisation de méthodes isotopiques dans l'étude du régime aquifère du lac Baïkal.
Isotopes in hydrology, S.M. 83/45, I.A.E., Vienne.

А.П. ВИНОГРАДОВ, А. Л. ДЕВИРЦ, Э. И. ДОБКИНА (1968). Современное содержание трития в природных водах , Геохимия , 60, 1147-1162.
VINOGRADOF, DEVIRTZ, DOBKINA.
Teneurs actuelles en tritium des eaux naturelles.

A N N E X E S

TENEUR EN TRITIUM DES EAUX DU LEMAN, DE RHONE (AU PONT DE SCEX ET A GENEVE) ET DE LA DRANSE

Les résultats des analyses sont rassemblés par station de prélèvement, par domaine de prélèvement pour les campagnes particulières ou par rivière. Tous les points de prélèvements sont localisés sur les figures 6, 11, 16 et 17.

Comme nous l'avons précisé au premier chapitre, nous n'avons pas reporté les barres d'erreur mais la précision relative de l'ensemble des analyses est toujours comprise entre 5 et 20 %.

CRG 6

TRANSVERSALE NYON-MESSERY (ENTREE DU PETIT LAC) : Profondeur - 60 m

Coordonnées sur la carte suisse au 1/50 000 509,80 - 136,15

Date	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	Fond
30/03/66	230	253	241	233	230	232	198
14/06/66	276	292	246	182	182	193	208
14/09/66	307	293	272	256	287	285	230
15/12/66	277	284	252	307	270	241	227
12/02/67	228	208	239	283	214	237	302
16/05/67	217	225	203	219	210	216	216
16/08/67	207	183	201	199	212	191	190
12/02/68	198	203					248
11/03/68							194
18/04/68	208	236					201

Localisation figure 6

CRG 8

TRANSVERSALE EVIAN-OUCHY, DEVANT OUCHY : Profondeur - 100 m

Coordonnées sur la carte suisse au 1/50 000 535,25 - 150,23

Date	10 m	30 m	50 m
18/06/64	316	155	123

Localisation figure 6

CRG 9
=-=-=

TRANSVERSALE THONON-OUCHY (FACE OUCHY) : Profondeur - 200 m

Coordonnées sur la carte suisse au 1/50 000 535,13 - 149,07

Date	0 m	5 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	100 m	150 m	200 m
18/06/64		280		125		135	<100			
24/11/67	205		185			167			180	147
18/04/68	234		167					243	237	228
17/09/68	221		256				218	233	208	253
14/10/68	230		224				236	226	195	229
24/11/68	205		185				167		180	147

Localisation figure 6

CRG 10
=-=-=-

TRANSVERSALES THONON-OUCHY, PLAINE CENTRALE : Profondeur - 309 m

Coordonnées sur la carte suisse au 1/50 000 534,87 - 146,69

Date	0 m	5 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m	300 m
18/06/64		194		276	161		188	100	167	< 100	111	75
07/07/64	324											105
12/12/64	224	260	253	250	170	130	225	204	180		93	88
22/03/65	157	183	175	187	133	240	223	287	208		166	119
22/06/65	285		343	259	240	253	335	397	363		173	162
24/09/65	422		408	364	288	325	254	240	170		218	198
07/12/65	413		312				299	281	328		189	172
30/03/66	221		216	230	163	152	168	152	175	138	230	131
15/06/66	232		258	169	204	204	193	202	206	184	243	199
15/09/66	285		309	307	322	274	293	276	200	195	155	155
15/12/66	262		280	277	300	264	292	215	257	196	156	157
16/02/67	226		218	226	200	224	212		227	197	182	146
17/05/67	247		235	310	234	247	242	249	231	230	198	114
16-17/08/67	250		237	203	203	216	225	219	185	227	112	148
24/11/67	210		273	217	206		193	204	188	165	157	140
13/02/68	182						235	222	214	152	189	176
19/06/68			170				230	187		179	177	177
16/09/68	215		218	209			214	231	222	192	156	147
26/11/68	203	194	245	248	185	239	267	254	251	200	237	189
18/03/69	230			309			277	261	238	242	227	151

Localisation figure 6

CRG 12
=-=-=-

TRANSVERSALE EVIAN-OUCHY, DEVANT EVIAN : Profondeur - 200 m

Coordonnées sur la carte suisse au 1/50 000 534,17 - 140,21

Date	0 m	10 m	30 m	50 m	100 m	150 m	Fond
18/06/64		280	125	135	< 100		
24/11/67	233	220		211		245	219

Localisation figure 6

CRG 21
=-=-=-

FACE AU DELTA DE LA DRANSE : Profondeur - 200 m

Coordonnées sur la carte suisse au 1/50 000 529,87 - 140,75

Date	0 m	10 m	50 m	100 m	150 m	200 m
08/02/68	234	213	199	166		202
18/04/68	349		246	234		111
16/09/68	227	236	216	226	223	196
14/10/68	268	236	223	244	245	226

Localisation figure 6

CRG 22
=-=-=-

TRANSVERSALE VEVEY St-GINGOLPH : Profondeur - 195 m

Coordonnées sur la carte suisse au 1/50 000 552,50 - 142,50

Date	0 m	10 m	50 m	100 m	150 m	Fond
13/02/68		198	193	227	173	173
13/03/68	236	244	340	215	227	221
18/04/68	256	233	236	246	210	193
19/06/68	189	230	260	250		221
17/07/68						182
20/08/68	206		211	208	221	192

Localisation figure 6

CRG 23
=-=-=-

TRANSVERSALE VEVEY St-GINGOLPH (CANYON DU RHONE) : Profondeur - 195 m

Coordonnées sur la carte suisse au 1/50 000 551,70 - 139,97

Date	0 m	10 m	50 m	100 m	150 m	Fond
08/01/68		209	211	267		180
13/02/68			184			147
13/03/68		234	300	184	207	268
19/06/68	221	211	259	252	224	136
17/07/68						176
20/08/68	221	247	167	201	196	194

Localisation figure 6

VEVEY
=-=-=

HAUT LAC

Profondeur - 175 m

Date	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	100 m	150 m	175 m
29/03/66	275	346	249	282	271	226	200	241	212
16/06/66	292	308	292	349	260	323	193	245	202
15/09/66	312	295	297	277	255	175	197	145	230
15/12/66	208	198	229	201	203	224	239	235	191
17/02/67	219	220	206	243	240	244	287	261	214
30/05/67	272	244	297	259	284	275	267	292	251
18/08/67	224	241	196	233	182	205	220	214	230

Localisation figure 6

ZONE DE L'EMBOUCHURE DE LA DRANSE

Janvier - Février 1968

Point	Date	0 m	10 m	50 m	60 m	100 m	150 m	200 m
I A	31/01/68				283			
I B	31/01/68		184	171		233	219	
I C	31/01/68			179		264		191
II A	31/01/68		214	189				
II B	31/01/68	206		188		258	190	
II C	08/02/68	234	213	199		166		202
III A	08/02/68		226	186				
III B	08/02/68		221	226		212	230	
III C	08/02/68		221	189		212		150
IV A	08/02/68		222	273				
IV B	08/02/68		207	183		218	178	
IV C	08/02/68		263	308		305		256

Localisation figure 16

ZONE DE L'EMBOUCHURE DE LA DRANSE

Septembre 1968

Point	Date	0 m	10 m	20 m	30 m	80 m	150 m
L1	22/09/68	240					
L2	22/09/68	198	218	198			
L3	22/09/68	211			257		
L4	22/09/68		232				
L5	22/09/68				220	220	221
L6	(Voir CRG 21)						

Localisation figure 17

ZONE DE L'EMBOUCHURE DU RHONE

Point	Date	0 m	10 m	20 m	50 m	90 m	100 m	120 m	150 m	170 m	180 m
M1	13/02/68				292		178				279
M10	13/02/68				228	232					
M11	13/02/68		204		214	241					
M12	13/02/68				232	227					
M7	26/08/68		251	186	231		239			213	
M2	26/08/68	171		223	222		222			149	
M9	26/08/68	210		235	192		246		190		
M6	26/08/68	197	224	218	200		144		167		
M8	26/08/68		208	191	186			205			
M5	26/08/68		219	244	235						

Localisation figure 11

ETUDES DES COURANTS TURBIDES

Point	Date	Fond	Fond + 3 m
LM7 = CRG23	19/06/68	189	136
LM8	19/06/68	207	140
LM9	26/06/68	194	

Localisation figure 11

RHONE (PONT DE SCEX)

18 Fev 65	596		
21 Mar 65	575		
4 Mai 65	639	*22 Mai 65*	703
15 Sep 65	666		
30 Nov 65	599		
19 Dec 65	591		
30 Jan 66	586		
29 Avr 66	400		
31 Mai 66	422		
10 Jun 66	444		
5 Jul 66	439		
8 Aou 66	372		
3 Oct 66	418		
2 Nov 66	405		
2 Dec 66	387		
6 Jan 67	386	*31 Jan 67*	416
25 Fev 67	320		
1 Avr 67	359		
2 Mai 67	318	*31 Mai 67*	281
18 Jul 67	279		
2 Aou 67	239		
2 Sep 67	285		
13 Oct 67	302		
21 Nov 67	288		
15 Dec 67	251		

8 Jan 68	239	*30 Jan 68*	263
19 Jun 68	218		
17 Jul 68	173		
7 Aou 68	247	*27 Aou 68*	261
7 Dec 68	235		
31 Jan 69	175		
30 Mar 69	215		
15 Mai 69	185		
16 Jun 69	206		
30 Jul 69	216		
24 Sep 69	198		
13 Oct 69	192		
13 Nov 69	227		
17 Dec 69	195		
15 Fev 70	217		

DRANSE (VONGY)

1 Fev 65	910
19 Mar 65	596
27 Avr 65	618
29 Mai 65	639
28 Jun 65	639
20 Sep 65	851
25 Nov 65	577
24 Jan 66	506
14 Fev 66	599
7 Mar 66	555
11 Avr 66	445
13 Jun 66	424
27 Jul 66	414
27 Oct 66	400
15 Nov 66	373
6 Mar 67	324
4 Avr 67	310
8 Mai 67	386
5 Jun 67	388
10 Jul 67	230
16 Aou 67	288

18 Jan 68	223		
2 Fev 68	245	*5 Fev 68*	345
4 Mar 68	267		
8 Avr 68	248	*24 Avr 68*	210
6 Mai 68	178		
17 Jun 68	259		
6 Jul 68	213	*11 Jul 68*	239
2 Aou 68	257	*17 Aou 68*	246
17 Sep 68	237	*28 Sep 68*	218
4 Oct 68	209	*9 Oct 68*	183
4 Nov 68	233		
9 Dec 68	290		
13 Jan 69	286		
10 Mar 69	283		
22 Avr 69	243		
30 Mai 69	215		
13 Jun 69	350		
15 Jul 69	404		
18 Aou 69	292		
15 Sep 69	360		
23 Oct 69	224		

RHONE (GENEVE)

18 Fev 65	177		
15 Mar 65	200		
17 Avr 65	150		
17 Jun 65	226		
8 Aou 65	355		
28 Sep 65	422		
3 Dec 65	333	*24 Dec 65*	233
13 Jun 66	217		
19 Jul 66	260		
13 Aou 66	295		
28 Sep 66	246		
19 Oct 66	300		
5 Nov 66	265		
14 Dec 66	237		
18 Jan 67	221		
1 Fev 67	207		
4 Mar 67	209		
5 Avr 67	267		
3 Mai 67	196		
7 Jun 67	205		
12 Jul 67	224		
13 Sep 67	263		

16 Jan 68	207
19 Fev 68	215
10 Mai 68	207
15 Jun 68	218
9 Aou 68	238
15 Oct 68	246
26 Nov 68	234
31 Jan 69	245
2 Avr 69	237
1 Mai 69	243
16 Jun 69	175
15 Sep 69	184
12 Nov 69	184
6 Jan 70	217

LISTE DES FIGURES

Pages

DEUXIEME CHAPITRE.

1 - Bassin versant du Léman..... 10

2 - Relation entre les teneurs moyennes annuelles du Rhône et de la Dranse..... 14

3 - Teneurs pondérées annuelles en tritium des affluents du Léman..... 17

4 - Teneurs en tritium comparées du Rhône affluent et effluent..... 18

TROISIEME CHAPITRE.

5 - Carte bathymétrique du Léman..... 22

6 - Stations de prélèvements sur le Léman..... 26

7 - Teneur en tritium des coupes transversales Evian-Ouchy..... 28

8 - Comparaison des teneurs en tritium aux points CRG 22 et CRG 23..... 30

9 - Comparaison des teneurs en tritium aux points CRG 9 et CRG 21..... 31

QUATRIEME CHAPITRE.

10 - Teneurs en tritium dans le Haut Lac (Mars 1968) 44

11 - Teneurs en tritium dans le Haut Lac (Août 1968) 46

12 - Isothermes du point CRG 10..... 48

13 - Variations de température et de teneur en tritium au point CRG 10 en 1965..... 51

14 - Variations de température au point CRG 22 en 1965..... 52

15 - Variations de température au point CRG 23 en 1965..... 53

16 - Teneurs en tritium en face de la Dranse (Février 1968)..... 55

17 - Pénétration de la Dranse dans le Léman (22/11/68). Etat en surface..... 56

Pages

18 - Evolutions comparées des points CRG 9 et CRG 21... 58

19 - Bloc diagramme de la pénétration de la Dranse dans le Léman..... 59

20 - Coefficient de variation des teneurs en tritium au point CRG 21 en 1968..... 60

21 - Variation du rapport M/m au point CRG 10..... 62

22 - 23 et 24 - Variation du rapport M/m aux points CRG 6, Vevey et CRG 9..... 64

25 - Evolution du coefficient de variation des teneurs en tritium au point CRG 10..... 66

26 - 27 et 28 - Evolution du coefficient de variation des teneurs en tritium aux points CRG 6, Vevey et CRG 9..... 70

29 - Evolution des teneurs en tritium au centre du Léman de 1964 à 1969..... 74

30 - 31 et 32 - Coefficient de variation des teneurs en tritium aux points Vevey, CRG 10 et CRG 9, par profondeur, du 3/66 au 8/67..... 78

33 - Noeuds et ventres de variation des teneurs en tritium dans le Grand Lac..... 80

34 - Teneurs moyennes en tritium à CRG 10 du 6/64 au 3/69..... 82

35 - Ecart-type des teneurs en tritium à CRG 10 du 6/64 au 3/69..... 83

36 - Coefficient de variation des teneurs en tritium à CRG 10 du 6/64 au 3/69..... 84

CINQUIEME CHAPITRE.

37 - Courbe de variation de la fonction Δ (α)..... 95

38 - Densité de probabilité du temps de séjour des eaux dans le Léman..... 97

39 - Fonction de répartition du temps de séjour des eaux dans le Léman..... 98

40 - Histogramme des coefficients a_p..... 99

CONCLUSIONS.

41 - Mouvements dominants des eaux du Léman en hiver et en été..... 102

LISTE DES TABLEAUX

Pages

DEUXIEME CHAPITRE.

1 - Apports de tritium du Rhône au Léman..... 12

2 - Apports de tritium de la Dranse au Léman..... 13

3 - Teneurs moyennes pondérées en tritium de la Dranse et du Rhône..... 14

4 - Teneurs moyennes en tritium du Rhône entrapolées de 1954 à 1969..... 19

5 - Tritium dans le Rhône effluent (Genève)..... 20

TROISIEME CHAPITRE.

6 - Caractéristiques géométriques du Léman..... 24

7 - Courbe hypsométrique du Léman..... 24

8 - Comparaison des teneurs en tritium des points CRG 22 et CRG 23..... 30

9 - Comparaison des teneurs en tritium des points CRG 9 et CRG 21..... 31

10 - Quantités de tritium dans le Léman au 1/1/1965 et au 1/1/1969..... 33

11 - Apports de tritium des précipitations au Léman.... 34

12 - Apports de tritium au Léman par années..... 35

13 - Tritium évaporé par années..... 36

14 - Sorties de tritium du Léman par années..... 37

15 - Bilan du tritium..... 39

QUATRIEME CHAPITRE.

16 - Maximum et minimum des teneurs en tritium dans le Léman..... 63

17 - Moyenne, écart-type et coefficient de variation des teneurs en tritium au point CRG 10 de Juin 1964 à Mars 1969..... 68

18 - Valeur moyenne, écart-type et coefficient de variation des teneurs en tritium aux points CRG 6, Vevey, CRG 9..... 69

Pages

19 - Vitesse des courants d'écoulement du Léman..... 73

20 - Valeur moyenne, écart-type et coefficient de variation des teneurs en tritium, par profondeur du 3/66 au 8/67 aux points CRG 6, CRG 10 et Vevey.... 77

21 - Moyenne, écart-type et coefficient de variation des teneurs en tritium, par profondeur du 6/64 au 3/69 au point CRG 10..... 81

CINQUIEME CHAPITRE.

22 - Quantités de tritium sorties du Léman, par années, de 1954 à 1968..... 93

23 - Table de la fonction Δ (α)..... 95

TABLE DES MATIERES

Pages

AVANT-PROPOS.

INTRODUCTION..... 1

1er CHAPITRE : *Le tritium en limnologie*..... 3

2ème CHAPITRE : *Le bassin versant du Léman*..... 11

3ème CHAPITRE : *Le tritium dans le Léman*..... 23

4ème CHAPITRE : *Dynamique lacustre*..... 41

5ème CHAPITRE : *Essai numérique*..... 87

CONCLUSIONS..... 101

BIBLIOGRAPHIE..... 105

ANNEXES : *Analyses tritium par point de prélèvement*..... 111

LISTE DES FIGURES..... 145

LISTE DES TABLEAUX..... 147

TABLE DES MATIERES..... 149