Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae
Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft
Band: 68 (1975)
Heft: 1

Artikel: Analyse de la radioactivé des sédiments des lacs Léman et de Morat
Autor: Vernet, Jean-Pierre / Davaud, Eric / Cosandy, Maurice
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-164379

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

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

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

Download PDF: 20.08.2025

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

Eclogae geol. Helv.	Vol. 68/1	Pages 87–96	3 figures dans le texte et 4 tableaux	Bâle, avril 1975

Analyse de la radioactivité γ des sédiments des lacs Léman et de Morat

Par JEAN-PIERRE VERNET[1]), ERIC DAVAUD[1]), MAURICE COSANDEY[2]) et JACQUES BERLIE

ABSTRACT

Four isotopes (Cs^{137}, K^{40}, Ra^{226}, Th^{232}) in superficial sediments from lakes Geneva and Morat have been analysed by γ spectrometry. The relationships have been computed between these isotopes and other chemical elements. It is shown that K^{40} comes from illite while Th^{232} and Ra^{226} are associated with clays by substitution or adsorption. Their spatial distribution is similar to that of thin detrital material. Cs^{137}, derived from the last nuclear explosions, is linked with the organic matter and its spatial distribution in the lakes leads to an understanding of the hydrodynamic of the basin.

1. Introduction

Une étude systématique dans les lacs Léman (lac de Genève) et de Morat a été entreprise afin de déterminer la composition minéralogique, chimique et radiochimique de leurs sédiments superficiels. Ce travail se propose uniquement de présenter les résultats et les interprétations provenant de la détermination par spectrométrie γ de la teneur en éléments radioactifs dans les sédiments. Le résultat des analyses chimiques et minéralogiques fera l'objet d'une publication ultérieure.

2. Méthodes

2.1 *Prélèvements et préparation des sédiments*

Dans le Léman, les prélèvements ont été effectués aux points d'intersection du quadrillage kilométrique de la carte topographique nationale (fig. 1). Pour le lac de Morat la maille d'échantillonnage a été réduite à 600 m (fig. 2).

Les échantillons du Léman ont été tamisés par voie humide, et seule la fraction inférieure à 63 μ, soit les limons et les argiles, a été analysée. Pour le lac de Morat, les analyses ont porté sur le sédiment total.

[1]) Ecole des Sciences de la Terre, Université de Genève.
[2]) Service cantonal de contrôles des irradiations, Genève.

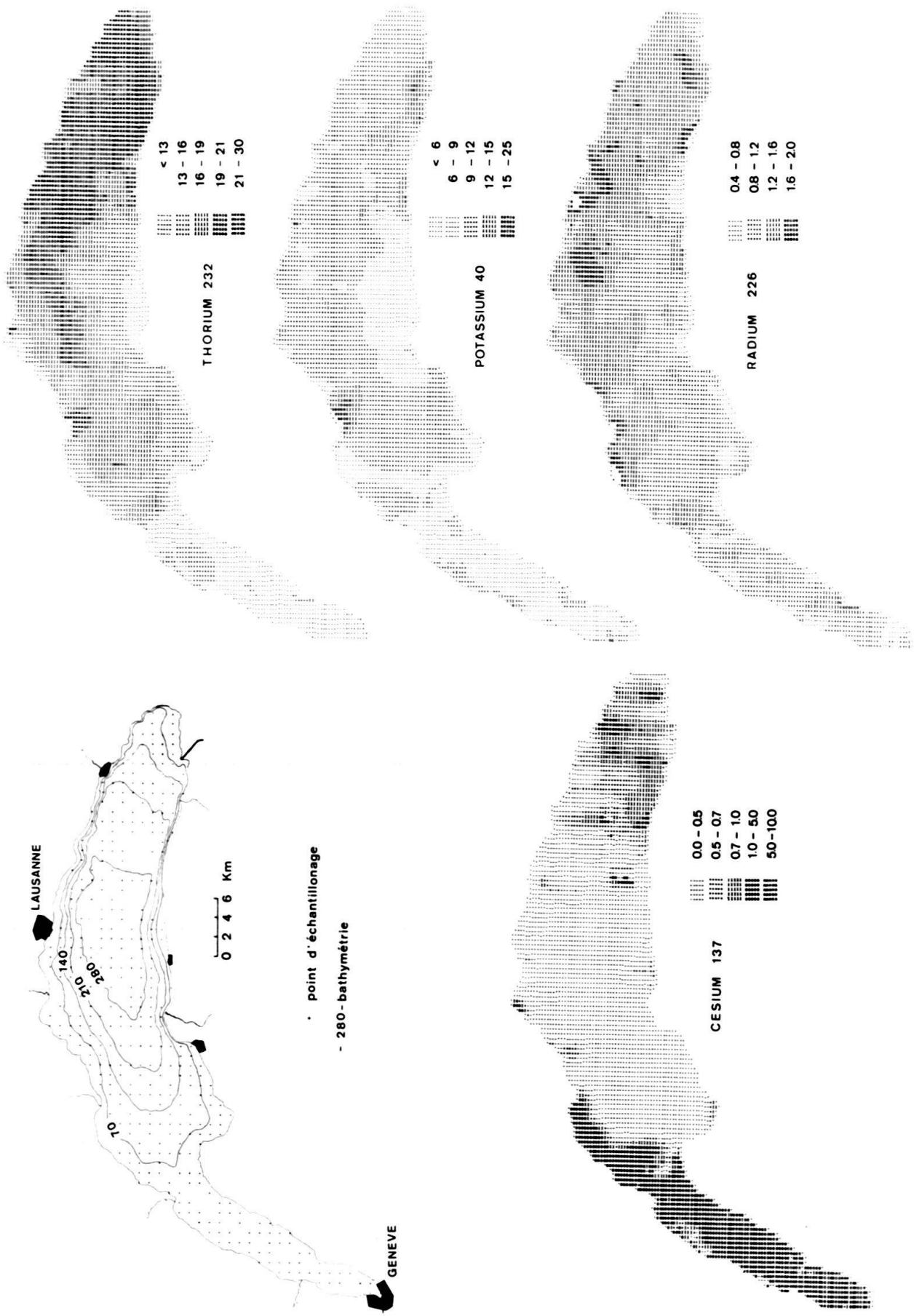

Fig. 1. Lac de Genève. Cartes d'isoteneurs établies à partir de 358 mesures. Valeurs en pCi/g, à l'exception du Th^{232}, mesuré en $\mu g/g$.

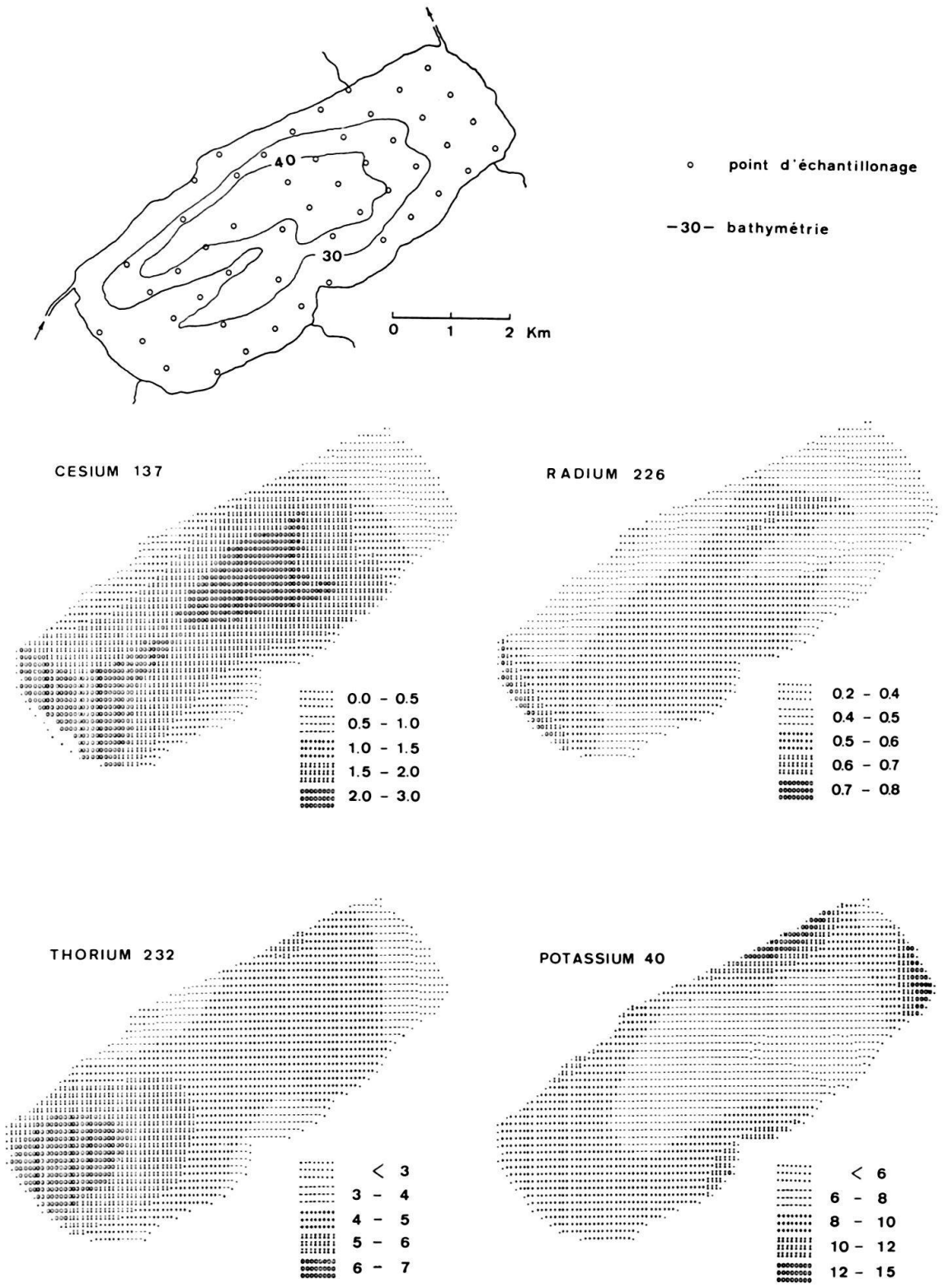

Fig. 2. Lac de Morat. Cartes d'isoteneurs établies à partir de 50 mesures. Mêmes unités qu'à la figure 1.

2.2 *Radioéléments détectés*

Les seuls radionuclides détectés dans les sédiments étudiés sont le Cs^{137}, le K^{40} et les membres des deux familles radioactives de U^{238} et Th^{232}. Le Cs^{137} provient des retombées radioactives. Comme le délai séparant la date du prélèvement de celle de la mesure est de l'ordre de l'année, les autres isotopes émetteurs γ présents dans les retombées n'ont pas pu être détectés à cause de leur période trop courte. Le K^{40} constitue 0,012% du potassium naturel. L'U^{238} et le Th^{232} présents à l'état naturel dans les roches et les sédiments sont détectés par les γ qu'émettent leurs descendants. Ainsi l'isotope de la famille de U^{238} que l'on détecte le plus facilement est le Bi^{214} (RaC). Mais comme sa période est brève, son activité peut être considérée comme égale à celle du premier de ses ancêtres de longue période radioactive: Ra^{226} (1620 ans). Nous avons donc exprimé la mesure d'activité du Bi^{214} en quantités correspondantes de Ra^{226}. Or le Ra^{226} est lui-même le descendant de U^{238} et il aurait possible été d'exprimer l'activité de Ra^{226} en activité de U^{238} si on pouvait être certain que l'équilibre entre U^{238} et Ra^{226} est établi, c'est-à-dire qu'il n'y a pas eu de séparation chimique entre U et Ra pendant l'accumulation des sédiments lacustres. Faute d'information à ce sujet, nous avons exprimé les activités de Bi^{214} en Ra^{226} et non en U^{238}.

Une autre difficulté d'interprétation réside dans le fait que le Ra^{226} devient, après désintégration α, du Rn^{222}, gaz pouvant éventuellement s'échapper du sédiment. Toutefois dans les grains de 50 μ de diamètre, la fraction du Ra^{226} située à moins de 10 Å de la surface du grain est de l'ordre de 1% du Ra^{226} total. Le dégagement de Rn^{222} peut donc être considéré comme négligeable dans le sédiment, et l'équilibre radioactif entre Ra^{226} et Bi^{214} est très probablement établi.

2.3 *Technique de mesure*

Le sédiment est déposé dans un récipient cylindrique de plexiglas muni d'un piston mobile servant à en définir la géométrie. Le détecteur de rayons γ est un cristal NaI(Tl) de ∅ 20,3 cm × 10,2 cm, couplé à un analyseur RCL à 400 canaux. L'ensemble de détection est blindé par 18 cm de fer pour diminuer le bruit de fond. La durée de comptage est de 50 minutes.

Le spectre d'énergie enregistré s'étend de 0,1 à 2 mégaélectron-volt (MeV). Les principaux pics photoélectriques qu'il contient sont rassemblés dans le tableau 1.

Tableau 1.

Pic photoélectrique γ MeV	*Origine du γ*	*Bande d'énergie* MeV
0,66	Ba^{137} m, fille de Cs^{137}	0,59–0,75
0,91	Ac^{228}, fille de Th^{232}	0,85–1,02
1,46	K^{40}	1,34–1,59
1,76	Bi^{214}, descendant de Ra^{226}	1,60–1,87

2.4 *Etalonnages des mesures*

Pour assurer la conversion du taux de comptage en activité, nous avons contaminé des sédiments avec du Cs^{137} ou du Th naturel (Th^{232} 100%). Pour étalonner K^{40}, nous avons utilisé de la poudre de sylvine (KCl nat.). L'étalonnage en Ra^{226} a été

établi à l'aide d'une source ponctuelle dont le spectre γ a été corrigé pour simuler une source homogène.

L'ensemble de ces mesures a permis d'établir le tableau 2 qui exprime le rendement de comptage en cpm/pCi ou cpm/µg[3]) que donne chaque radionuclide dans les 4 bandes d'énergie considérées. Ce tableau est valable pour 100 g de sédiment de densité apparente moyenne comprise entre 0,85 et 1,05.

Tableau 2.

Bande d'énergie	*Radionuclide*			
	Cs^{137}	Th^{232}	K^{40}	Ra^{226}
MeV	cpm/pCi	cpm/µg	cpm/pCi	cpm/pCi
0,59–0,75	0,346	0,013	0,0038	0,124
0,85–1,02	0	0,019	0,0044	0,038
1,34–1,59	0	0,004	0,0264	0,052
1,60–1,87	0	0,003	0	0,067

2.5 *Mesure de l'activité spécifique des échantillons*

Après enregistrement du spectre γ de l'échantillon de sédiment, le bruit de fond est soustrait et le taux de comptage est intégré dans les 4 bandes considérées. Pour rapporter la valeur obtenue à une masse de 100 g, on la multiplie par un facteur f selon la méthode décrite par LERCH (1953) avec:

$$f = \frac{0{,}51}{1 - e^{-0{,}00713 \cdot m}} \qquad m = \text{masse de l'échantillon en grammes}$$

La transformation du taux de comptage ainsi obtenu en activité s'effectue à l'aide de la matrice des coefficients reproduits dans le tableau 2 et revient à la résolution d'un système linéaire de 4 équations à 4 inconnues.

Les seuils de détection sont de l'ordre de 0,3 pCi Cs^{137}, 1 μg Th^{232}, 1 pCi K^{40} et 0,2 pCi Ra^{226} par gramme de sédiment sec. On peut convertir le K^{40} en K naturel en se rappelant que 1 pCi K^{40} est contenu dans 1,21 mg K naturel.

L'erreur sur le résultat provient de nombreuses causes, dont les plus importantes sont l'erreur statistique sur le taux de comptage et les propagations d'erreur dues au calcul matriciel.

3. Résultats des mesures

358 prélèvements ont été analysés dans le lac Léman et 50 dans le lac de Morat. La distribution des mesures individuelles est reportée dans les histogammes de la figure 3. Les moyennes x et l'écart-type s de ces distributions figurent au tableau 3.

Tableau 3. Distribution des mesures de Cs^{137}, K^{40}, Th^{232} et Ra^{226}.

	Lac de Morat			*Lac Léman*		
	x	s	s/x	x	s	s/x
Th^{232}	4,73	1,34	28%	9,45	2,10	22%
K^{40}	7,25	2,68	37%	16,78	4,15	25%
Ra^{226}	0,52	0,15	30%	1,24	0,34	27%
Cs^{137}	1,71	0,86	50%	0,62	0,84	134%

[3]) cpm = coups par minute; pCi = pico-Curie = 10^{-12} Curie.

Pour les trois éléments naturels, les mesures faites sont toujours supérieures au seuil de détection. Dans le Léman, les valeurs moyennes sont 2 à 3 fois plus élevées que dans le lac de Morat. La distribution des valeurs individuelles est normale, unimodale, avec un coefficient de variation s/x relativement constant: 22–27% dans le Léman, 28–37% dans le lac de Morat.

Les mesures de Cs^{137} présentent la particularité d'un écart-type élevé et d'un histogramme multimodal. Dans le Léman la majorité des mesures sont inférieures au seuil de détection ce qui cause une augmentation démesurée du coefficient de variation (134%). Si on élimine les 198 mesures inférieures à 0,3 pCi/g correspondant en général aux points situés dans la zone centrale du lac, le nouvel histogramme ressemble à celui de Morat avec une moyenne de 1,37 pCi/g et un écart-type de 0,88 pCi/g.

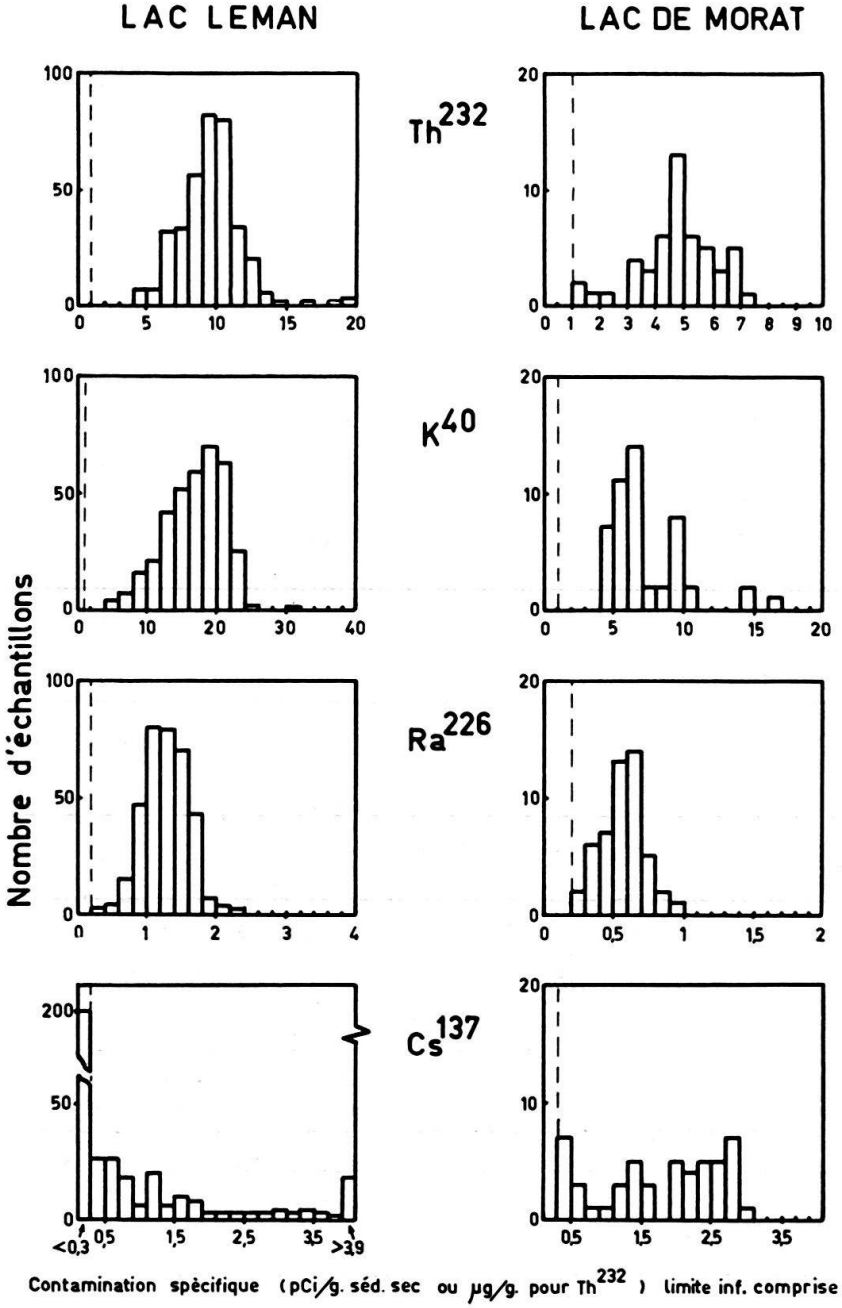

Fig. 3. Histogrammes des mesures effectuées. Le seuil de détection est indiqué en tireté.

4. Interprétation des cartes de répartition des isotopes

Les cartes présentées aux figures 1 et 2 ont été tracées par ordinateur au moyen d'un algorithme d'interpolation (DAVAUD 1974). Les symboles les plus foncés représentent les zones à plus fortes teneurs. Les zones laissées en blanc sont celles où le nombre de mesures est trop faible pour permettre une interpolation.

4.1 *Lac Léman*

4.11 *Th^{232}, K^{40} et Ra^{226}*

Ces trois isotopes naturels ont même origine: apport principal par le Rhône qui draine une partie de l'édifice alpin, apports secondaires par les petits affluents du bassin molassique.

L'analyse des cartes de répartition montre que pour les trois isotopes considérés, le courant principal d'apport sédimentaire se prolonge dans le lac selon l'axe du Rhône, s'incurve en se rapprochant de la côte suisse (nord) et la suit à une certaine distance jusqu'à l'entrée du Petit Lac. Les apports détritiques se déposent progressivement durant ce trajet et une faible partie seulement atteint le Petit Lac, où la teneur en Th^{232}, K^{40} et Ra^{226} est la plus faible. Les grandes lignes de ce schéma sont localement perturbées par des courants de turbidité.

4.12 *Cs^{137}*

Le Cs^{137} est d'origine météorique et provient de la série des grandes explosions nucléaires des années 1962 à 1964 (RAVERA & PREMAZZI 1971). Il a donc été apporté par les affluents du Léman et les précipitations tombées sur le lac.

La contamination n'est pas uniforme dans l'ensemble du Léman (fig. 1). Elle est forte dans les parties amont et aval et faible ou nulle dans la partie centrale et profonde du lac. Dans le Grand Lac, le schéma de distribution invoqué pour les 3 isotopes précédents s'applique aussi au Cs^{137} dont la teneur dans les sédiments décroît d'amont en aval. Ce schéma est cependant moins apparent du fait que les teneurs en Cs^{137} mesurées sont proches du seuil de détection. Cela implique que le Cs^{137} provenant du bassin du Rhône parvient au Léman déjà fixé aux matières en suspension.

La contamination exceptionnellement forte du Petit Lac peut s'expliquer par la dynamique particulière des eaux du Léman. En effet, HUBERT (1970, 1971) et MEYBECK et al. (1970) ont montré par des dosages d'eau tritiée dans le Grand Lac qu'il y a trois couches d'eau de comportements dynamiques différents: la couche superficielle de 0 à 50 m, la couche moyenne de 50 à 150 m et la couche profonde de 150 à 300 m. La distinction entre couche superficielle et couche moyenne n'est réelle qu'en été avec la stratification thermique. Leur temps de renouvellement est inférieur à 10 ans. Par contre, la couche profonde conserve son individualité toute l'année et n'est alimentée épisodiquement que par des courants de turbidité. Son temps de renouvellement est élevé, de l'ordre d'une vingtaine d'années. Par conséquent, les eaux de surface du Grand Lac qui reçoivent le Cs^{137} apporté par les précipitations ne peuvent pas entrer en contact avec la couche profonde et sont entraînées vers le Petit Lac. Dans cette région de faible bathymétrie (41 m en moyenne), comme le long des rives, le Cs^{137} peut se déposer et contaminer les sédiments. Il proviendrait donc essentiellement ou en totalité des précipitations tombées dans le lac.

En résumé le Cs^{137} provenant du bassin du Rhône parvient au Léman déjà fixé aux matières en suspension et se dépose selon le même schéma que les autres isotopes. L'existence d'une stratification des eaux dans le Grand Lac empêche le Cs^{137} provenant des précipitations atmosphériques d'entrer en contact avec les sédiments avant l'écoulement des eaux dans le Petit Lac.

4.2 *Lac de Morat*

4.21 *Cs^{137}, Th^{232}, Ra^{226}*

Les fortes teneurs s'observent (fig. 2) sur rive SW qui reçoit par la Broye les eaux d'un bassin versant très important par rapport aux dimensions du lac. La contamination diminue en direction de l'exutoire (nord) et aussi en passant des zones profondes (42 m au maximum) vers les rives. Dans le cas du Th^{232}, on observe sur la rive nord une zone à teneur élevée à l'embouchure d'un ruisseau transportant des alluvions d'origine molassique.

4.22 *K^{40}*

Cet isotope présente un schéma de répartition totalement différent de celui des trois précédents: les plus fortes teneurs se rencontrent le long des rives et les zones à faible teneur coïncident avec celle à forte sédimentation carbonatée.

5. Relations entre les isotopes et les autres éléments analysés

Le tableau 4 indique les valeurs des coefficients de corrélation entre la teneur de chacun des quatre isotopes détectés et celle des autres éléments chimiques dont l'analyse fera l'objet d'une publication ultérieure. Chaque coefficient constitue une mesure de la covariation entre les deux éléments considérés. Il tend vers +1 lorsque ces derniers varient sympathiquement, vers 0 lorsqu'il n'existe aucune relation entre eux et vers −1 lorsqu'ils varient antipathiquement.

5.1 *Lac Léman*

Le Cs^{137} ne présente pas d'association très prononcée avec les autres éléments. Les liaisons les plus marquées s'observent avec le C inorganique, S, Ca et Sr. C'est avec les éléments constitutifs des minéraux argileux que les corrélations sont les plus négatives. Il en résulte que le Cs^{137} est probablement fixé par la matière organique.

Par contre le Th^{232} et le K^{40} présentent un comportement totalement différent de celui du Cs^{137}: ils sont fortement associés aux éléments constitutifs des argiles (Al_2O_3, K_2O, MgO, Fe_2O_3) et sont corrélés négativement avec les éléments rattachés aux carbonates (Ca, Sr, CO_2) et à la matière organique. On remarque que les covariances sont beaucoup plus marquées pour le K^{40} que pour le Th^{232}. Cela tient certainement au fait que le potassium est un élément constitutif de l'illite, alors que le Th^{232} y est probablement associé par substitution ou adsorption.

Le Ra^{226} présente de faibles associations positives avec les éléments des argiles et des associations négatives avec les éléments rattachés aux carbonates et à la matière organique.

En résumé on retiendra que le K^{40}, le Th^{232} et le Ra^{226} sont liés plus ou moins fortement aux apports terrigènes alors que le Cs^{137} est associé à la matière organique et aux carbonates.

Tableau 4

	LAC LEMAN				LAC DE MORAT			
	Cs^{137}	Th^{232}	K^{40}	Ra^{226}	Cs^{137}	Th^{232}	K^{40}	Ra^{226}
Silice	0,0	0,2	0,2	0,2	-0,4	-0,1	0,7	0,0
Alumine	-0,5	0,5	0,8	0,5	0,1	0,4	0,5	0,3
Fer	-0,4	0,3	0,7	0,4	0,5	0,7	-0,1	0,4
Calcium	0,5	-0,5	-0,8	-0,4	0,4	0,1	-0,8	-0,1
Magnesium	-0,4	0,4	0,8	0,4	0,3	0,7	0	0,2
Potassium	-0,4	0,5	0,8	0,5	-0,2	0,0	0,7	0,2
Sodium	-0,4	0,3	0,5	0,3	-0,1	-0,2	-0,4	-0,3
Soufre	0,3	-0,3	-0,5	-0,3	0,6	0,1	-0,5	0,2
Plomb	0,2	0,0	0,3	0,3	0,3	0,3	-0,1	0,1
Nickel	-0,1	0,1	0,3	0,2	0,5	0,4	-0,3	0,3
Cobalt	-0,4	0,1	0,3	0,1	0,4	0,3	-0,1	0,4
Chrome	-0,2	0,3	0,6	0,4	-0,3	0,0	0,3	0,1
Vanadium	-0,3	0,2	0,4	0,2	0,2	0,4	-0,2	0,2
Cuivre	0,2	0,0	0,1	0,2	0,6	0,6	-0,6	0,3
Bore	-0,4	0,3	0,5	0,2	-0,2	-0,1	0,4	0,3
Etain	-0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	-0,2	-0,1
Zinc	0,1	-0,1	0,1	0,1	0,8	0,7	-0,5	0,4
Baryum	-0,2	0,2	0,4	0,3	0,1	0,2	0,3	0,2
Yttrium	0,1	0,0	0,0	0,1	-0,3	0,0	0,6	0,1
Strontium	0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,2	-0,3	0,0	-0,1
Carbone org.	0,5	-0,4	-0,5	-0,2	0,8	0,6	-0,6	0,3
Carbone inorg.	0,1	-0,4	-0,6	-0,4	0,5	0,1	-0,8	0,2
Phosphore	-0,2	0,2	0,4	0,2	0,8	0,6	-0,6	0,4
Manganèse	-0,4	0,1	0,3	0,2	0,4	0,1	-0,5	0,2
Mercure	0,2	0,1	0,3	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
$Cesium^{137}$	1	-0,2	-0,4	-0,1	1	0,5	-0,6	0,5
$Thorium^{232}$	-0,2	1	0,5	0,2	0,5	1	-0,3	0,2
$Potassium^{40}$	-0,4	0,5	1	0,6	-0,6	-0,3	1	-0,2
$Radium^{226}$	-0,1	0,2	0,6	1	0,5	0,2	-0,2	1
Sable					-0,9	-0,6	0,7	-0,4
Limon	0,3	-0,2	-0,1	0,1	0,9	0,6	-0,7	0,4
Argile	-0,6	0,1	0,3	0,1	0,7	0,5	-0,5	0,5
Bathymétrie	0,4	-0,2	-0,5	-0,2	0,8	0,5	-0,6	0,4

5.2 *Lac de Morat*

Comme dans les sédiments du Léman, le Cs^{137} est fortement lié au carbone organique et aux éléments qui lui sont associés (Zn, P, Cu, S, C inorganique). Par contre l'antipathie observée précédemment entre le Cs^{137} et les éléments des argiles ne se retrouve ici que de manière très atténuée.

Le Th^{232} et le Ra^{226} présentent des corrélations positives avec les éléments associés à la matière organique et semblent aussi liés aux argiles.

Seul le K^{40} reste nettement associé aux éléments constitutifs des argiles et négativement lié aux carbonates et à la matière organique.

6. Conclusions

Tant dans le lac de Morat que dans le lac Léman, le K^{40} provient certainement des illites, le Th^{232} et le Ra^{226} sont associés aux minéraux argileux par substitution ou plus probablement par adsorption. La distribution dans les sédiments de ces trois isotopes semble donc contrôlée essentiellement par la répartition des argiles dans le bassin sédimentaire et permet dans une certaine mesure d'étudier la dynamique des apports terrigènes fins.

Le Cs^{137} est fixé par la matière organique. La distribution géographique de cet isotope dans les sédiments est contrôlée par la répartition de la matière organique et par la dynamique des eaux du bassin. Elle confirme la présence d'une couche d'eau inerte (HUBERT 1970, 1971; MEYBECK et al. 1970) au fond du Léman et l'existence d'apports turbides récents dans la zone du delta du Rhône.

Remerciements

Les auteurs tiennent à exprimer leurs remerciements au Fonds national suisse pour la recherche scientifique pour son appui et au Dr J.M. Jaquet pour sa précieuse collaboration.

BIBLIOGRAPHIE

DAVAUD, E. (1975): *Le traçage automatique de cartes d'isovaleurs: un algorithme simple en FORTRAN IV.* – Canad. J. Earth Sci. (à paraître).

HUBERT, P. (1971): *Etude par le tritium de la dynamique des eaux du lac Léman. Apport du tritium à la limnologie physique.* – Thèse, Paris.

HUBERT, P., MEYBECK, M., & OLIVE, PH. (1970): *Etude par le tritium de la dynamique des eaux du Léman.* – C.R. Acad. Sci. Paris *270*, 1298–1301.

KOCZY, F., ANTAL, P.S., & JOENSUU, O. (1963): *Die natürlichen radioaktiven Elemente in Sedimenten.* – Fortschr. Geol. Rheinl. Westfal. *10*, 201–214.

LERCH, P. (1953): *Mesure de l'activité β des sources épaisses.* – Helv. chim. Acta *26*, 665.

MEYBECK, M., HUBERT, P., MARTIN, J.M., & OLIVE, PH. (1970): *Etude par le tritium du mélange des eaux en milieu lacustre et estuarien.* – Isotope Hydrol., 523–541 (A. I. E. A., Vienne).

RAVERA, O., & PREMAZZI, G. (1971): *A Method to Study the History of any Persistent Pollution in a Lake by the Concentration of Cs^{137} from Fall-out.* – Comm. europ. Communities, Publ. Biol. Directorate *679*.