Zeitschrift: Archives des sciences [2004-ff.]

Herausgeber: Société de Physique et d'histoire Naturelle de Genève

Band: 65 (2012)

Heft: 1-2

Artikel: Taux d'accumulation de sédiments récents et bilan de la matière particulaire dans le Léman (Suisse-France)

Autor: Loizeau, Jean-Luc / Girardclos, Stéphanie / Dominik, Janusz

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-738353

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: 09.07.2025

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

Taux d'accumulation de sédiments récents et bilan de la matière particulaire dans le Léman (Suisse - France)

Jean-Luc LOIZEAU[1,2], Stéphanie GIRARDCLOS[2,3] and Janusz DOMINIK[1]*

Ms. reçu le 25 septembre 2012, accepté le 23 novembre 2012

Abstract

Recent sediment accumulation rates and particulate matter budget in Lake Geneva (Switzerland-France). – *Dated lake sediments are excellent archives of continental paleoenvironments. Thus, a good chronology of the sediments is essential to reconstruct the evolution of lakes and their catchments. In the last 40 years two radioisotopic methods (^{137}Cs and ^{210}Pb) have been frequently used to date sediments for the last 50 to 100 years. A review of the literature revealed the existence of 76 dated sediment cores that have been collected in Lake Geneva between 1970 and 2010. A compilation of these data allow us to map the sediment accumulation rates (SAR) in Lake Geneva and to estimate a yearly deposition of sediment of ~1.7 x10^6 metric tons. The total sediment accumulation rate is strongly influenced by the upper Rhône River particulate load, decreasing logarithmically from the river mouth to the central plain, and remaining constant (~0.1 g cm^{-2} y^{-1}) in the other portion of the lake. The comparison of sediment accumulation rates estimated from the two ^{137}Cs peaks for the periods 1964-1986 and post-1986, as well as those obtained from ^{210}Pb profiles does not show any changes for the last decades. This is despite major changes occurring in the lake and its catchment (dam construction, reforestation, retreat of glaciers). This relative sediment accumulation stability can result from opposed processes in the watershed, some promoting and others reducing sediment availability and transport.*

Although the lake sediment budget is balanced, several uncertainties remain due to i) inaccurate evaluation of the Rhone sediment load; and ii) insufficient number of measurements of sediment accumulation rates in some delta areas (Rhône, Dranse). The detrital inputs account for 90% of the sediment load to Lake Geneva.

Keywords: *Lake Geneva, sediment dating, sediment accumulation rate, mass balance*

Résumé

Les sédiments lacustres représentent des archives environnementales des milieux continentaux. L'établissement d'une chronologie de déposition des sédiments est essentiel à la reconstruction de l'évolution du lac et de son bassin versant. Depuis une quarantaine d'année, les méthodes radioisotopiques basées sur les activités en ^{137}Cs et ^{210}Pb sont utilisées pour dater les sédiments lacustres des 50 à 100 dernières années. Une recherche de la littérature a permis d'identifier 76 carottes datées prélevées dans le Léman entre 1970 et 2010. Sur la base de ces données, une carte de répartition des taux d'accumulation des sédiments (TAS) a pu être établie, et la sédimentation sur l'ensemble du lac a pu être estimée à ~1.74 Mt/an. La distribution des taux est fortement influencée par les apports du Rhône, et présente une décroissance exponentielle de l'embouchure du fleuve jusqu'au milieu du lac. Les taux sont relativement constants (~0.1 g cm^{-2} an^{-1}) sur le reste du lac. La comparaison des résultats anté- et post-1986 (basés sur le ^{137}Cs), ainsi que ceux obtenus par ^{210}Pb, ne montre pas d'évolution glo-

[1] *Institut F.-A . Forel, Section des sciences de la Terre et de l'environnement, Faculté des sciences, Université de Genève, 1290 Versoix, Suisse.*

[2] *Institut des sciences de l'environnement, Université de Genève, 1227 Carouge, Suisse.*

[3] *Département de géologie et paléontologie, Section des sciences de la Terre et de l'environnement, Faculté des sciences, Université de Genève, 1205 Genève, Suisse.*

* *Adresse actuelle: Istituto di Scienze Marine - Consiglio Nazionale delle Ricerche, Arsenale - Tesa 104, Castello 2737/F, 30122 Venezia, Italie.*

bale des taux d'accumulation au cours du dernier siècle, malgré les modifications majeures survenues dans le lac et son bassin versant (barrage, reforestation, retrait des glaciers). Cette relative stabilité des apports peut découler de processus opposés dans le bassin versant, certains retenant les sédiments et d'autres favorisant leur disponibilité et leur transport. Le bilan de masse entre apports particulaires, sédimentation et export par l'émissaire est équilibré, avec toutefois de grandes incertitudes d'une part sur les flux sédimentaires du Rhône et d'autre part sur les TAS dans les zones deltaïques (essentiellement Rhône et Dranse). De manière globale, la part détritique des apports en sédiment entre pour 90% dans ce bilan de masse des sédiments.

Mots-clés: *Lac de Genève, datation des sédiments, vitesse d'accumulation de sédiments, bilan de masse*

Introduction – histoire des datations des sédiments du Léman

Les sédiments lacustres sont d'utiles archives de notre environnement, enregistrant les modifications se déroulant dans le bassin versant et dans la colonne d'eau du lac. La détermination des taux de sédimentation (TS, correspondant à une épaisseur de sédiments déposée par unité de temps et exprimé en $cm \cdot an^{-1}$) ou d'accumulation de sédiment (TAS, correspondant à une masse de sédiments déposée par unité de surface et de temps et exprimée en $g \cdot cm^{-2} \cdot an^{-1}$) est un paramètre incontournable dans la compréhension de l'évolution sédimentaire des milieux, aussi bien pour les reconstructions paléo-environnementales (p. ex. Mangini et Dominik 1979) que l'histoire des contaminations anthropiques (p. ex. Muller et al. 1979; Thevenon et al. 2011).

Dans cette optique, la question du comblement du Léman et de la détermination des taux d'accumulation des sédiments remontent à plus d'un siècle, avec les observations et hypothèses de F.A. FOREL présentées dans sa monographie limnologique «Le Léman», et plus particulièrement dans le premier volume paru en 1892 (Forel 1892). Il fait une description détaillée des «sols du Léman», sur leurs aspects chimiques et minéralogiques. Mais à son époque, aucun moyen n'existait pour dater les sédiments. En effet les méthodes absolues de datation des sédiments ont été découvertes dans la seconde moitié du 20e siècle: ^{14}C (Libby 1952), ^{210}Pb (Krishnaswamy et al. 1971), ^{137}Cs (Pennington et al. 1973; Ritchie et al. 1972; 1973). Concernant l'épaisseur des sédiments, Forel indique (op. cit. p. 136) «tous les débris que le glacier du Rhône des temps antiques a laissés au fond de notre vallée, tout ce terrain glaciaire est recouvert par une couche uniforme et monotone de limon. Quelle en est l'épaisseur? nous ne le savons pas, mais devons la supposer assez puissante, car cette couche a, dans son dépôt régulier et continu, réussi à découvrir toutes les inégalités et irrégularités du fond, aussi bien sur les talus du lac que dans la plaine centrale, plate et sans accidents, ...». Concernant le taux d'accumulation, il ajoute (op. cit. p. 139), en parlant du recouvrement de gravier et galet «que le dépôt de l'alluvion du lac doit être peu important, que la couche qui se précipite annuellement doit être peu épaisse, et par conséquent les corps étrangers tombés au fond du lac sont longtemps avant d'être enfouis dans le limon ...», puis «J'ai un seul fait, et encore est-il peu précis, qui puisse donner une idée de l'activité du dépôt de l'alluvion lacustre. Dans un dragage fait le 10 juillet 1877 par 60 m de fond, devant Morges, j'ai trouvé un morceau de scorie de coke, enfoui dans une couche intacte de limon, à 3.5 cm de la surface. Cette scorie, provenant évidemment d'un bateau à vapeur, ne peut pas être plus ancienne que 1823, époque du lancement du premier pyroscaphe sur le Léman, et datait au plus de 54 ans. Elle peut être beaucoup plus récente». Il présente ainsi une première tentative de datation des sédiments lacustres. Ses données correspondent à un taux minimum de 0.6 mm/an, ce qui est très faible au regard des données actuelles qui sont un ordre de grandeur plus élevées (voir paragraphes suivants).

La première tentative d'établissement d'une carte des taux de sédimentation est effectuée par Paréjas (1929), sur la base de 46 carottages prélevés dans le Haut-lac (partie est du Grand-lac), en se reposant sur l'hypothèse que les alternances de couches observées sont d'origine saisonnière et s'apparentent à des varves. Il observe une diminution de l'épaisseur de ces couches avec l'éloignement du Rhône et du ravin sous-lacustre. Les datations radioisotopiques ultérieures montrent que cette hypothèse n'était pas valable dans le contexte du delta du Rhône (Loizeau 1991). Meybeck (1971) estime le taux moyen d'accumulation de sédiment dans le Léman à 1.4 $g\ cm^{-2}\ an^{-1}$, en se basant sur un calcul des volumes comblés, comprenant le delta émergé, le delta immergé et la plaine centrale, et en évaluant la quantité de matière apportée par le Rhône. Ce taux est certainement surévalué pour la période actuelle. C'est également à cette période que la première datation des sédiments lacustres, basée sur les méthodes radioisotopiques du ^{210}Pb et du ^{137}Cs, est publiée, comprenant deux carottes prélevées au centre du Léman (Table 1, carottes N° 1 et 2) (Krishnaswamy et al. 1971).

Des mesures paléomagnétiques sont utilisées par Creer et al. (1975) pour dater les sédiments récents du Grand-lac. Les taux obtenus varient entre 0.67 et 0.94 cm/an, mais avec des incertitudes telles que ces variations ne sont pas significatives.

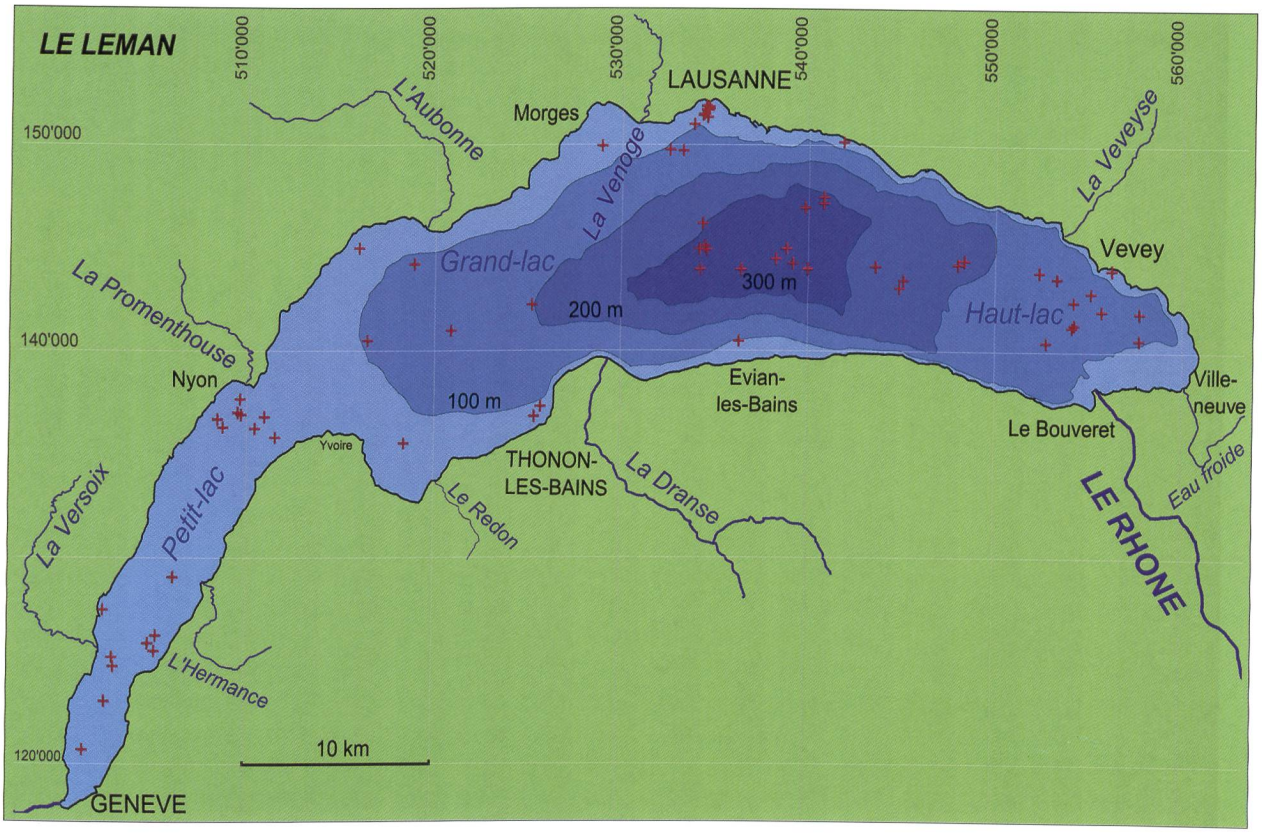

Fig. 1. Carte bathymétrique du Léman, avec ses principaux affluents, et position des 76 carottes (croix) datées par méthodes radio-isotopiques (^{137}Cs et ^{210}Pb). La ligne pointillée localise le ravin principal du Rhône dans le lac.

Fig. 1. Bathymetric map of Lake Geneva, including major tributaries, and locations of the 76 sediment cores dated by ^{137}Cs and ^{210}Pb methods. Dotted line represents the main Rhone canyon in the lake.

Plusieurs études se sont basées sur des analyses palynologiques pour établir la chronologie des dépôts sédimentaires du Léman (p. ex. Chateauneuf et Fauconnier 1977; Lüdi 1939; Moscariello et al. 1998), sans toutefois établir formellement des taux de sédimentation. Baster (2002) établit une chronologie des sédiments au large de Nyon, basée sur des analyses palynologiques, des dates radiocarbone et le niveau de cendre du Laacher See (12350 ± 135 ans BP; Hajdas et al. 1993). Les taux varient entre 0.25 et 0.53 mm/an entre 14000 et 3000 ans BP, pour augmenter entre 0.87 et 1.2 mm/an au cours des 3 derniers millénaires. L'effet de la compaction n'a pas été pris en compte. De plus, des études de la déglaciation et de la période Holocène de la région lémanique ont analysé de longues carottes prélevées dans le Petit-lac. Les données de sismique haute résolution, des paramètres physico-chimiques des sédiments, de palynologie et de datation ^{14}C ont permis de reconstruire l'évolution du Petit-lac et de son environnement, mettant en évidence trois phases de retrait du glacier du Rhône, des fluctuations dans l'orientation des vents dominants, plusieurs effondrements massifs de sédiments, et les changements du paysage, passant de la steppes à la forêt (synthèse de ces travaux dans Girardclos et al. 2005).

Dès 1976, de nombreuses carottes sédimentaires ont été datées par les méthodes basées sur l'analyse de radioisotopes (^{137}Cs et ^{210}Pb, les datations basées sur la méthode du ^{14}C n'ont pas été prises en compte dans cette étude), principalement dans le laboratoire des faibles radioactivités de l'Institut F.-A. Forel. Ces datations (cf. Table 1 pour la liste complète des références) ont permis d'établir des taux d'accumulation des sédiments récents dans les différentes parties du lac, et d'obtenir une image globale de la sédimentation.

Situation et méthodes

Le Léman est un lac profond mésotrophe, partagé entre la Suisse et la France, dont la position moyenne est 46°27' N et 6°32' E, la surface 580.1 km² et le volume 89 km³. Le lac consiste en deux bassins, séparés par une barre de faible profondeur entre la pointe de la Promenthouse et Yvoire (Fig 1). A l'est le Grand-lac forme la plus grande partie du lac avec un volume total de 86 km³. C'est aussi la partie la plus profonde avec un maximum de 309 m. Au sud-ouest, le Petit-lac forme un volume de 3 km³ pour une profondeur maximum de 70 m. L'apport principal en eau

Tableau 1. Liste des carottes sédimentaires du Léman datées par les méthodes ^{137}Cs et ^{210}Pb.

No	Année d'échantil-lonnage	Nom	Coordonnées suisses E	Coordonnées suisses N	Profondeur (m)	^{137}Cs TAS pré-1986 (g cm^{-2} an^{-1})	^{137}Cs TAS post-1986 (g cm^{-2} an^{-1})	^{210}Pb TAS (g cm^{-2} an^{-1})	Références
1	1970	LB13	539000	145000	309	0.10±0.03	-		(Krishnaswamy et al. 1971)
2	1970	LB32	539000	145000	309	-	-	0.07±0.02	(Krishnaswamy et al. 1971)
3	1976	500	501450	120600	18	0.08±0.01	-		(Vernet 1977; Vernet et al. 1984)
4	1976	501	502500	127400	18	>0.53	-		(Favarger et Vernet 1979; Vernet et al. 1984)
5	1976	502	542100	150400	20	>1.01	-		(Favarger et Vernet 1979; Vernet et al. 1984)
6	1976	503	556500	144100	17	0.05±0.03	-		(Favarger et Vernet 1979; Vernet et al. 1984)
7	1976	504	525850	137300	20	0.07±0.01	-		(Vernet et al. 1984)
8	1976	505	525500	136800	20	0.11±0.01	-		(Vernet 1977; Vernet et al. 1984)
9	1976	506	529000	150000	18	0.13±0.01	-		(Vernet 1977; Vernet et al. 1984)
10	1976	509	505250	125400	10	<0.03	-		(Vernet et al. 1984)
11	1979	511	504900	125800	31	<0.03	-		(Vernet et al. 1984)
12	1979	512	509600	137000	43	0.06±0.01	-		(Vernet et al. 1984)
13	1979	513	508500	136700	29	0.07±0.01	-		(Vernet et al. 1984)
14	1979	514	508800	136300	31	0.03±0.01	-		(Vernet et al. 1984)
15	1979	515	509670	137630	48	0.14±0.01	-		(Vernet et al. 1984; Vernet et Favarger 1982)
16	1979	516	503000	125100	52	0.07±0.01	-		(Vernet et al. 1984; Vernet et Favarger 1982)
17	1979	517	511600	135800	52	0.14±0.01	-		(Vernet et al. 1984)
18	1980	518	511000	136800	72	0.04±0.01	-		(Vernet et al. 1984)
19	1980	519	516000	145000	40	0.05±0.01	-		(Vernet et al. 1984)
20	1980	520	521000	141000	166	0.02±0.01	-		(Vernet et al. 1984)
21	1980	521	503050	124620	46	0.11±0.01	-	0.12±0.01	(Vernet et al. 1984)
22	1981	522	534400	144000	308	0.44±0.01	-		(Vernet et al. 1984)
23	1981	523	506200	129000	71	<0.01	-		(Vernet et al. 1984)
24	1981	524	510500	136250	78	<0.01	-		(Vernet et al. 1984)
25	1981	525	519000	144250	104	0.08±0.01	-		(Vernet et al. 1984)
26	1981	526	525350	142250	238	0.07±0.01	-		(Vernet et al. 1984)
27	1981	527	533400	149750	92	0.20±0.01	-		(Vernet et al. 1984)
28	1981	528	536500	140500	52	0.06±0.01	-		(Vernet et al. 1984)
29	1981	529	553000	140450	172	>1.86	-		(Vernet et al. 1984)
30	1981	530	518500	135500	75	0.10±0.01	-		(Vernet et al. 1984)
31	1981	531	516500	140500	112	0.03±0.01	-		(Vernet et al. 1984)
32	1981	532	545300	143500	270	0.10±0.02	-		(Vernet et al. 1984)
33	1981	533	558000	140600	98	0.73±0.04	-		(Vernet et al. 1984)
34	1984	L14 w	548521	144460	260	0.15±0.01	-		(Wang et al. 1986)
35	1984	L14	548230	144260	260	0.15±0.02	-		(Rapin et al. 1985)
36	1984	L16	540000	147000	305	0.07±0.01	-		(Rapin et al. 1985)
37	1985	J11	554370	141230	167	1.87±0.05	-		(Loizeau et al. 1997)
38	1985	J12	554500	141350	165	1.96±0.11	-		(Loizeau et al. 1997)

39	1985	J16	554480	142440	181	1.10±0.11	-		(Loizeau et al. 1997)
40	1987	SM2	536600	144000	309	0.40[a]±0.05	0.10±0.01		(Dominik et al. 1992)
41	1987	SM4	532700	149800	140	0.11±0.01	0.40±0.2	0.12±0.02	(Dominik et al. 1992)
42	1987	SM9	532700	149800	140	0.13±0.02	0.18±0.02	0.12±0.01	(Dominik et al. 1992)
43	1988	J17	558000	141900	123	1.08±0.02	1.14±0.11		(Loizeau et al. 1997)
44	1988	T40	558000	141940	124	0.61±0.07	-		(Loizeau et al. 1997)
45	1988	TLV	534600	151500	50	0.30±0.04	-		(Loizeau et al. 2003)
46	1988	T26	553520	143590	204	0.25±0.02	-		(Loizeau et al. 1997)
47	1988	T49	555980	142000	159	1.01±0.01	-		(Loizeau et al. 1997)
48	1988	SHL2	534600	145100	309	0.10[b]±0.01	-		(Span et al. 1990)
49	1988	Paudex	541000	147500	305	0.11±0.01	-		(Span et al. 1990)
50	1990	J24	552570	143880	219	0.25±0.01	-		(Loizeau et al. 1997)
51	1995	C5	534516	151794	18	0.95±0.03	0.76±0.01		(Loizeau et al. 2003)
52	1995	C7	534784	151732	17	0.77±0.03	-		(Loizeau et al. 2003)
53	1995	E6	534440	151398	47	0.44±0.03	0.44±0.03		(Loizeau et al. 2003)
54	1997	BV	534485	151508	56	0.20±0.03	0.15±0.02	0.16±0.02	(Monna et al. 1999)
55	1997	PC	534700	144950	309	0.09±0.01	0.08±0.02		(Monna et al. 1999)
56	1997	BI18	509747	136909	57	0.08±0.02	0.05±0.01		(Baster 2002)
57	1999	CF11	534560	151540	50	0.52±0.02	-		(Loizeau et al. 2003)
58	1999	CF2	534640	151870	21	-	2.12±0.02		(Rozé 2001)
59	1999	CF30	533970	151060	94	0.14±0.02	0.09±0.02		(Loizeau et al. 2003)
60	1999	CF4	534650	151720	32	-	0.61±0.03		(Loizeau et al. 2003)
61	2000	VS03	538457	144480	309	0.25±0.01	-		(Sastre 2003)
62	2000	VS06	540128	144053	308	0.48±0.02	0.61±0.02		(Sastre 2003)
63	2001	VS08	539363	144272	308	0.97±0.03	0.19±0.02		(Sastre 2003)
64	2001	VS09	543806	144131	284	0.19±0.03	0.58±0.03		(Sastre 2003)
65	2002	VS14	545071	143099	274	0.26±0.03	1.73±0.02		(Sastre 2003)
66	2002	B2	503130	126250	15	0.43±0.03	0.14±0.02		Decrouy (non publié)
67	2003	Pau03-2	540989	147192	305	0.33±0.01	0.36±0.02		(Ebner 2004)
68	2006	LeBC-3	505303	126141	52	0.06±0.02	0.07±0.02		(Jaccard et al. 2009)
69	2007	VS14LH	534682	151410	49	0.26±0.03	1.73±0.01		(Haller 2010)
70	2007	PU-1	540466	150526	30	0.20±0.03	0.26±0.02		(Wildi 2009)
71	2008	CP	534790	151790	26	-	0.57±0.02		(Garcia Bravo 2010)
72	2008	T52-04	555371	142901	172	0.84±0.05	1.25±0.02		(Arlaux 2010)
73	2008	SHL2-03	534348	144961	309	0.08[b]±0.01	0.07±0.01		(Arlaux 2010)
74	2010	C2	534504	146178	306	0.08±0.02	-		(Thevenon et al. 2011)
75	2010	G1	502613	122938	48	0.08±0.02	-		(Thevenon et al. 2011)
76	2010	L1	533392	144692	309	0.15[c]±0.05	0.15[c]±0.05		(Savichtcheva et al. 2011)

[a] Inclus la turbidite de 13 cm d'épaisseur déposée vers 1977 (Dominik et al. 1992), sans la turbidite le taux est de 0.13 g cm^{-2} an^{-1}

[b] sans la turbidite

[c] Estimé à partir du taux de sédimentation en cm/an

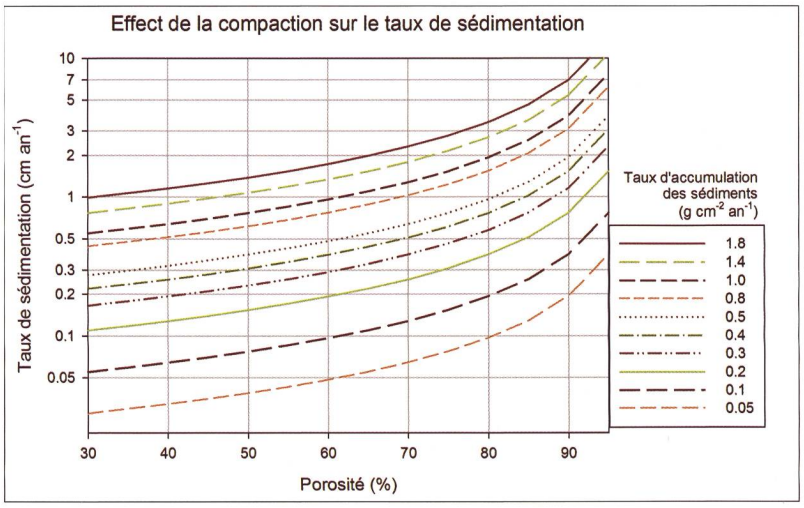

Fig. 2. Abaque montrant l'effet de la diminution de la porosité (par compaction) sur le taux de sédimentation. Les différentes lignes correspondent à des taux d'accumulation de sédiment constants. Les calculs sont effectués pour une densité de particules sédimentaires de 2.6 g·cm^{-3} selon l'équation (1) (voir texte).

Fig. 2. Nomogram showing the effect of porosity reduction on the sediment accumulation rate (SAR). Each curve corresponds to a constant sediment accumulation rate. Curves are determined using equation (1), with a particle density of 2.6 g·cm^{-3}.

(75%) et en particule (<90%) est le Rhône, se jetant dans le lac à l'extrémité est, avec un exutoire situé au sud-ouest à Genève.

Les méthodes de datation par ^{137}Cs et ^{210}Pb

Le ^{137}Cs (demi-vie de 30.1 ans) est un radioisotope artificiel émis dans l'environnement par les activités humaines, principalement lors des essais nucléaires dans l'atmosphère, dans les effluents d'usine de retraitement de combustible nucléaire (p. ex. Sellefield UK), et lors des accidents de centrales nucléaires (p. ex. Windscale UK, Three Mile Island USA, Tchernobyl URSS, Fukushima Japon). A grande distance des sources de ce radioisotope, l'enregistrement des activités dans les sédiments reflète les apports atmosphériques sur le plan d'eau et dans le bassin versant. Ainsi en Europe de l'Ouest, deux repères temporels peuvent être distingués: i) le maximum des retombées de ces essais en 1963-1964, et ii) les retombées de l'accident de Tchernobyl en 1986. La détermination des profils d'activité dans les sédiments permet d'identifier ces repères et ainsi de dater ces niveaux et calculer des taux d'accumulation de sédiment moyen entre les niveaux (Appleby 2001). L'activité du ^{137}Cs est mesurée par spectrométrie gamma (pic à 661.62 keV) sur des sédiments secs.

Le ^{210}Pb est un radioisotope naturel de la série de l'uranium 238. D'une demi-vie de 22.3 ans, il permet de déterminer les taux d'accumulation sur une centaine d'année. Le principe de la méthode se base sur la décroissance radioactive du ^{210}Pb se trouvant en excès par rapport au ^{226}Ra présent dans les sédiments, un des radioisotopes de la série de ^{238}U. Cet excès provient d'un déséquilibre dans la chaîne de décroissance, déséquilibre dû au radon (^{222}Rn), qui est gazeux et peut se retrouver dans l'atmosphère s'il est produit, par la décroissance du ^{226}Ra, dans les premiers décimètres des sols. Une description détaillée de la méthode est donnée par Appleby (2001). Le ^{210}Pb est mesuré le plus souvent par spectrométrie alpha de sa fille le ^{210}Po (Benninger et al. 1979; Flynn 1968) et le ^{226}Ra par spectrométrie gamma (par mesure du ^{214}Pb).

Dans la mesure du possible, les résultats sont exprimés en taux d'accumulation de sédiment (g·cm^{-2}·an^{-1}), mesure indépendante des effets dus à la compaction des sédiments. Pour les sédiments récents, ces effets peuvent être très importants, car en général la compaction des sédiments actuels fait passer la porosité de 90% dans les sédiments de surface à moins de 70% dans des sédiments à une profondeur de quelques dizaines de centimètre. En se basant sur une densité moyenne constante des sédiments secs, il est possible de quantifier l'effet de la compaction sur les changements apparents du taux de sédimentation. La relation entre taux de sédimentation (TS) et taux d'accumulation de sédiment (TAS) est donnée par l'équation (1):

$$TS = \frac{TAS}{(1-\varphi)\rho} \quad (1)$$

avec φ la porosité des sédiments et ρ la densité des particules. La Figure 2 présente un abaque montrant l'effet du changement de porosité sur le taux de sédimentation, pour des taux d'accumulation de sédiment constant. On voit ainsi que pour un taux d'accumulation de sédiments constant de 0.1 g·cm^{-2}·an^{-1} et une densité des particules de 2.6 g·cm^{-3}, le taux de sédimentation est de 0.38 cm/an pour une porosité de 90%, valeur qui tombe à 0.13 cm/an pour une porosité de 70%. Ainsi la compaction récente réduit d'un facteur 3 le taux de sédimentation, alors que la quantité de matière accumulée est constante. Cet effet, très significatif dans les sédiments fins de forte porosité, doit toujours être pris en compte dans les études des sédiments présentant de fortes variations de porosité, soit généralement les sédiments des dernières décennies.

Inventaire des carottes sédimentaires datées

Une liste exhaustive des carottes datées par ^{137}Cs et/ou ^{210}Pb est présentée dans le Tableau 1. Les données proviennent essentiellement de résultats publiés dans des revues scientifiques, ainsi que dans des mémoires de thèse de doctorat, de diplôme et de master. Lorsque les données étaient disponibles dans les archives de l'Institut F.-A. Forel, les résultats exprimés en taux de sédimentation ont été recalculés en taux d'accumulation de sédiment. Au total 76 carottes ont été datées, dont 1 par ^{210}Pb uniquement, 4 par les deux méthodes, et 71 par ^{137}Cs uniquement. Dix-huit carottes ont été prélevées dans le Haut-lac (partie est du Grand-lac, correspondant au delta sous-lacustre du Rhône), 28 dans la plaine centrale (partie la plus profonde au centre du lac) et le reste du Grand-lac, et 12 dans la Baie de Vidy, au large de Lausanne. Les sédiments de cette baie ont été particulièrement étudiés car ils sont sensiblement contaminés par les apports de l'effluent de la station d'épuration de Vidy (Loizeau et al. 2004; Pote et al. 2008). Finalement 18 carottes proviennent du Petit-lac à l'extrémité sud-ouest du lac. Le but principal de la plupart de ces études étant une reconstruction historique de l'enregistrement sédimentaire et non la répartition spatiale des taux d'accumulation, les recherches ont essentiellement porté sur les zones profondes du lac, où les perturbations post-dépositionelles sont censées être moins importantes que dans les zones littorales. Ainsi seules 11 carottes datées ont été prélevées à une profondeur inférieure à 20 m (Fig. 1), zone ne correspondant qu'à 9.7% de la surface totale du lac.

La distance D des sites d'échantillonnage à l'embouchure du Rhône (Fig. 3) est estimée par la relation (2)

$$D = \sqrt{L_c^2 + E_c^2} \qquad (2)$$

avec L_c la distance entre l'embouchure du Rhône et de la projection de la position du site d'échantillonnage sur le grand cercle traversant l'entier du lac (avec un rayon de 33,82 km et un centre situé selon le système de coordonnées suisses à E535240/N110550); et E_c la distance entre la position du site et sa projection perpendiculaire sur le cercle.
La carte du TAS est interpolée par la méthode de l'inverse de la distance au cube à l'aide du logiciel Surfer ver. 8.0 (Golden Software Inc, Colorado), également utilisé pour calculer la masse totale de sédiment déposée annuellement (TAS multiplié par la surface).

Evolution spatiale et cartographie des taux d'accumulation des sédiments

Les taux d'accumulation de sédiment déterminés dans le Léman varient entre <0.01 et 1.96 $g \cdot cm^{-2} \cdot an^{-1}$ (Tableau 1). Les valeurs inférieures à 0.01 $g \cdot cm^{-2} \cdot an^{-1}$ correspondent à des zones soumises à l'érosion, et ne seront pas utilisées dans la suite de l'analyse (n=2). Une forte relation entre les taux d'accumulation et la distance à l'embouchure du Rhône est observée (Fig. 3), reflétant l'importance prépondérante de ce fleuve dans l'apport en matière particulaire du Léman. Toutefois l'image générale est quelque peu biaisée par l'emplacement spécifique des sites d'échantillonnage. Par exemple la baie de Vidy, située à environ 22 km de l'embouchure, reçoit localement une quantité importante de matières particulaires issues de la station d'épuration de Vidy (Fig. 3, symboles rouges), ce qui a motivé nombre d'études, alors que d'autres sites côtiers sans affluent naturel ou artificiel auraient présenté des valeurs de TAS inférieures. De même des valeurs élevées sont observées à une distance de 15 à 18 km, qui correspondent à l'extrémité du canyon principal du Rhône où de fréquents courants de turbidité transportent une grande quantité de sédiments loin de l'embouchure (Girardclos et al. 2012; Lambert et Giovanoli 1988). Similairement, l'échantillon-

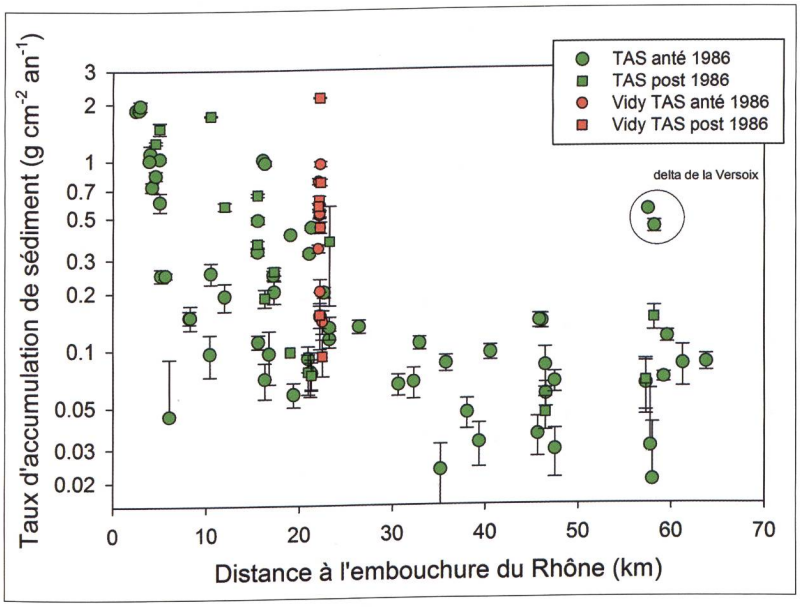

Fig. 3. Relation entre la distance à l'embouchure du Rhône et le taux d'accumulation de sédiment (TAS, axe logarithmique).
Fig. 3. Scatter diagram of sediment accumulation rate vs. distance to the Rhone River mouth. Note the sediment accumulation rate (SAR) logarithmic axis.

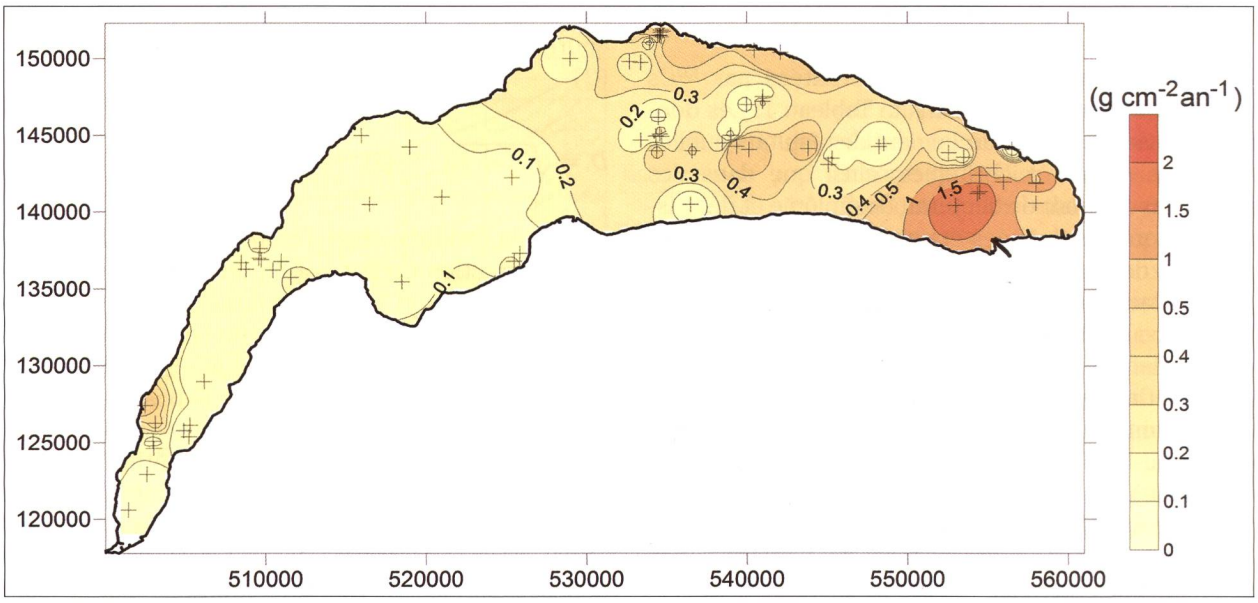

Fig. 4. Carte de répartition des taux d'accumulation de sédiment (g·cm⁻² an⁻¹) dans le Léman. La zone du delta du Rhône, à l'extrémité est du lac, est très approximative car ne tenant pas compte du ravin sous-lacustre (cf. Girardclos et al. 2012).
Fig. 4. Distribution map of the sediment accumulation rates (SAR: $g \cdot cm^{-2} y^{-1}$) in Lake Geneva. The Rhone delta region, at the eastern end of the lake, is not accurate because it doesn't' take into account the Rhone river canyon (see Girardclos et al. 2012).

nage de petits deltas (p. ex. delta de la Versoix dans le Petit-lac) donne des résultats nettement supérieurs à la tendance générale.

Dès 30 km de distance, les TAS se répartissent entre 0.02 et 0.12 $g \cdot cm^{-2} \cdot an^{-1}$ (en écartant les sites deltaïques), et ne montrent pas de tendance notable liée à la distance.

La Fig. 4 présente la carte de répartition générale des TAS basée sur les 73 carottes datées par le maximum de retombées de ^{137}Cs des essais nucléaires dans l'atmosphère de 1963/64. La tendance générale observée sur la Figure 3 se retrouve sur cette carte, avec une diminution marquée des taux en s'éloignant de l'embouchure du Rhône à l'est du lac. Toutefois, les données de TAS dans la zone du canyon principal du Rhône ne reflètent que très imparfaitement cette zone, vu son caractère intrinsèquement hétérogène de par les apports sporadiques et locaux de particules liés au canyon du Rhône (Girardclos et al. 2012, ce volume). Cette complexité est retrouvée à l'échelle de la plaine centrale (zone profond et plate au milieu du lac, de profondeur supérieure à 300 m), qui est marquée par une structure de TAS hétérogène liée à la présence ou à l'absence de dépôts de turbidites en provenance du Rhône ou de la Dranse. La quasi-totalité de la partie ouest du lac présente des TAS inférieurs à 0.1 $g \cdot cm^{-2} \cdot an^{-1}$, à l'exception des zones deltaïques discutées précédemment. Plusieurs processus sédimentaires reconnus dans d'autres études n'ont pas été mis en évidence par cette carte. Ainsi i) aucune marque d'accumulation préférentielle dans les zones les plus profondes du lac par rapport aux zones côtières et le talus (*sediment focusing*) n'est observée, alors que les études sismiques montrent la présence de ce processus. Comme évoqué précédemment, une surreprésentation des sites d'échantillonnage profond peut expliquer cette divergence; ii) la déviation des apports du Rhône sous forme d'une plume turbide vers la côte suisse (Dominik et al. 1983; Giovanoli 1990) ne correspond pas à l'augmentation de TAS dans cette zone car aucun site d'échantillonnage ne se trouve au sud du canyon du Rhône. Il n'y a ainsi pas de point de comparaison; de même, la zone du delta de la Dranse (deuxième affluent du Léman) ne montre pas de TAS important par manque de site d'échantillonnage spécifique.

En se basant sur la carte de répartition des TAS (Fig. 4) et de leurs surfaces associées, la quantité totale de sédiment déposée annuellement dans le Léman est de 1.74 Mt.

Comparaison des taux d'accumulation de sédiments anté- et post-1986.

La présence de deux maximums d'activité du ^{137}Cs permet de calculer, pour les carottes prélevées plusieurs années après l'accident de Tchernobyl, deux TAS moyens: le premier entre 1964 et 1986, et le second entre 1986 et l'année de prélèvement (surface du sédiment). La relation entre les résultats de 19 carottes, pour lesquelles ces deux TAS ont pu être déterminés, résume des évolutions temporelles (Fig. 5). En considérant les incertitudes sur la détermination des TAS, 9 sites se trouvent sur la diagonale 1:1 représentant la ligne sans changement de TAS

entre la période 1964-1986 et celle qui a suivi (post-1986). Quatre sites sont au-dessous de cette ligne, présentant une diminution marquée des TAS après 1986, alors que 6 carottes montrent une augmentation de TAS après 1986. Les sites montrant une diminution correspondent d'une part à un site de la plaine centrale (SHL2), sur lequel on trouve un épais dépôt turbiditique (jusqu'à 13 cm) déposé vers 1977 (Dominik et al. 1992). Sans ce dépôt, les taux anté- et post-1986 sont comparables (environ 0.1·g·cm^{-2}·an^{-1}; Tableau 1). Ce taux correspond aux flux de particules de 0.12 g·cm^{-2}·an^{-1} (Dominik et al. 1989) et 0.09 g·cm^{-2}·an^{-1} (Dominik et al. 1993) déterminés au centre du lac par des pièges à particules en 1986 et 1991, respectivement. Sur le site de la carotte VS08, la forte réduction du TAS après 1986 est probablement due à une érosion récente des dépôts superficiels, cette carotte se situant dans la plaine centrale à l'extrémité du canyon principal du Rhône. Quant aux sites montrant une forte augmentation, on trouve le point VS14, également situé au niveau de l'extrémité du canyon du Rhône, et qui présente au contraire une accumulation récente de turbidites. Les datations par ^{210}Pb indiquent également une sédimentation régulière dans le Petit-lac (carotte 521) au cours du dernier siècle, avec un taux de 0.12±0.01 g·cm^{-2}·an^{-1} (Vernet et al. 1984), identique à celui de 0.11±0.01 g·cm^{-2}·an^{-1} obtenu par ^{137}Cs (Tableau 1). L'ensemble des résultats montre qu'il n'y a pas de tendance générale à l'augmentation ou la diminution de la sédimentation dans le lac au cours des dernières décennies, et que les variations observées semblent être dues à des événements sédimentaires ponctuels. En particulier le

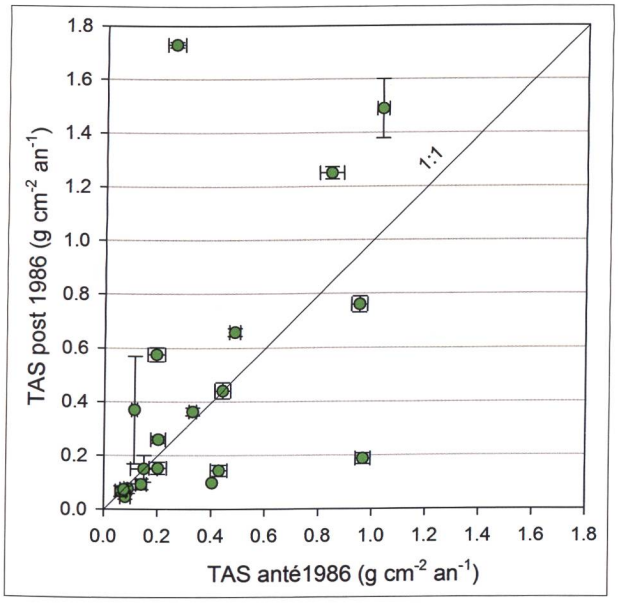

Fig. 5. Comparaison des taux d'accumulation de sédiment pour deux périodes, anté- (1964-1986) et post- 1986 sur 19 carottes du Léman.

Fig. 5. Comparison of pre- (1964-1986) and post-1986 SAR of 19 cores from Lake Geneva.

développement des barrages en Valais au cours de la période 1963-1975 (2/3 de la capacité de stockage totale actuelle) ne semble pas avoir d'influence globale sur les TAS dans Léman, les apports en suspension n'ayant pas significativement variés (Loizeau et Dominik 2000). Cependant, des variations significatives de TAS ont été observées à plus long terme dans le delta du Rhône et attribuées au barrage (Loizeau et al. 1997). Des études détaillées de cette zone très dynamique sont nécessaires pour évaluer l'impact anthropique sur l'accumulation de sédiments.

Bilan de masse de la matière particulaire dans le Léman

La quantité totale de matière déposée annuellement de 1.74 Mt (cf section 3) déterminée à partir de la carte de répartition des TAS est comparable à celle trouvée par Vernet et al. (1984) de 1.8 Mt/an. Ces auteurs ont considéré la surface développée du lac (en considérant les pentes) de 687.9 km^2, soit 107.8 km^2 de plus que la surface du plan d'eau. Une erreur de calcul est certainement intervenue dans l'estimation de la surface développée du fond, car en considérant le lac comme des troncs de cône par intervalle de 20 m de profondeur, on obtient une augmentation de la surface due à la pente de 0.4 km^2. En recalculant cette valeur à partir du taux d'accumulation de sédiment moyen estimé par ces auteurs de 0.26 g·cm^{-2}·an^{-1}, et de la surface du plan d'eau (580.1 km^2), la masse de sédiment accumulée est de l'ordre de 1.5 Mt/an.

Un bilan de masse peut être construit en comparant ces résultats avec les flux de matière apportés par les affluents et par la formation endogène de matière particulaire (carbonatée, siliceuse et organique). En se basant sur les mesures de matière en suspension déterminées à la station fédérale de la Porte-du-Scex (5 km en amont de l'embouchure dans le lac) et sur la relation débit-concentration, Loizeau et Dominik (2000) ont estimé la charge en suspension après 1960 entre 1.0 et 2.5 Mt/an, avec une moyenne après 1975, date de l'érection du dernier grand barrage (Emosson) dans le bassin versant, de 1.86 Mt/an (moyenne 1976-1996). Une compilation des résultats de la CIPEL des 20 dernières années (rapports sur les apports au Léman, 1993 à 2012) montre un flux moyen de matières en suspension apportées par le Rhône de 1.11 Mt/an. La moyenne de ces deux estimations est de 1.49 Mt/an. A ces apports s'ajoutent ceux des autres rivières et des flux particulaires internes. Les autres rivières sont essentiellement la Dranse du Chablais (deuxième affluent du Léman en apport en eau) et les petites rivières de la côte suisse (p. ex. Veveyse, Venoge, Aubonne, Promenthouse). Pour la Dranse, Hubert et al. (1969) proposent une relation débit-concentration donnant un apport de

Tableau 2. Bilan de masse de la sédimentation récente dans le Léman (voir texte pour l'explication des sources des valeurs).

Entrées	Tonnes / an	Sorties	Tonnes / an
Rhône	1 490 000	Rhône	30 000
Dranse et autres rivières	100 000	Sédimentation	1 740 000
Précipitation carbonates	100 000		
Silice biogène	70 000		
Total entrées	**1 760 000**	**Total sorties**	**1 770 000**

l'ordre de 170 000 t/an, mais indiquent également qu'une crue exceptionnelle peut apporter 120 000 t en 2 jours. Par contre les données de la CIPEL donnent des apports de l'ordre de 23 000 t/an pour la Dranse et 45 000 t/an pour l'ensemble des autres rivières. On arrive donc au maximum à un total de 100 000 t/an pour l'apport des rivières autres que le Rhône. Les apports par la formation endogène de particules (précipitation de cristaux de calcite, matière organique autochtone) peuvent être estimés par les mesures de pièges à particules au centre du lac. Dominik et al. (1993) ont mesuré un flux annuel moyen de carbonates au fond du lac de 0.74 $g \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$. Afin d'estimer les flux endogènes de carbonates, seuls les flux de printemps et d'été sont pris en compte, correspondant à la période de précipitation de calcite autochtone, et auxquels on soustrait les flux moyens d'automne et d'hiver correspondant aux apports allochtones. Ainsi calculé, le flux annuel endogène est de 167 $g \cdot m^{-2} \cdot an^{-1}$, soit pour l'ensemble du lac un apport de 97 000 t de particules. Les frustules siliceuses de diatomées sont une autre source de particule. Gandais (1989) par des mesures de flux aux centre du Léman estime cet apport à 120 $g \cdot m^{-2} \cdot an^{-1}$, en retranchant les apports latéraux et les resuspensions, soit un apport annuel de 70 000 t. Une dernière source autochtone est la matière organique produite dans la colonne d'eau. En raison de la minéralisation importante de cette matière organique dans la colonne d'eau et les sédiments superficiels, cet apport est négligé dans ce bilan global.

Concernant les sorties du lac, on peut considérer la sédimentation sur le fond du lac comme une sortie, ainsi que les particules transportées par l'émissaire. Ces dernières sont essentiellement le phytoplancton produit dans la colonne d'eau, et les sédiments remis en suspension dans la zone de la rade de Genève lors d'épisode de fort vent du nord (Bise). Vernet et al. (1984) estiment ce flux à 30 000 t/an. Le Tableau 2 récapitule les entrées et les sorties de matière particulaire dans le lac. La somme des entrées est sensiblement identique à la somme des sorties et un bilan globalement équilibré est obtenu. Cependant de grandes incertitudes demeurent dans ce bilan; d'une part les valeurs des apports du Rhône, essentielles dans le bilan, varient de près de 50% selon les auteurs, et d'autre part les TAS des zones proches des embouchures ne sont pas validés par des mesures directes, ainsi que ceux de la zone sud du Haut-lac et de la baie de Villeneuve.

Conclusions

La répartition des taux d'accumulation des sédiments dans le Léman présente une tendance générale à la diminution avec l'éloignement à l'embouchure du Rhône, suivant une diminution logarithmique jusqu'au centre du lac, puis une stabilisation avec toutefois une variabilité importante entre les sites, qui est liée aux apports des rivières et aux divers événements sédimentaires (p. ex. turbidites, érosion). Par contre, aucune tendance de changement des flux de particules au cours des dernières décennies n'a pu être mise en évidence. Les changements environnementaux, climatiques et géologiques dans le bassin versant influençant les apports en particules (tels construction de barrages, recul des glaciers, changement d'utilisation des sols, reforestation) ne sont donc pas visibles pour la période de temps considérée (20e siècle). Toutefois, derrière cette stabilité apparente, il est possible que les actions de facteurs aux effets antagonistes, comme la présence des barrages dans le bassin versant (diminuant le transfert de sédiment grossier) et l'accélération de la fonte des glaciers alpins (augmentant les flux d'eau et de sédiment en été), aient pu se compenser, et donner une impression que la sédimentation lacustre n'est pas modifiée. Pour l'ensemble du lac, le bilan des apports montre une nette dominance des apports allochtones, issus de l'érosion du bassin versant, sur les apports endogènes, les apports autochtones ne comptant que pour 10% dans le bilan global. La proportion des apports endogènes sur le bilan total est toutefois nettement plus importante pour le Petit-lac que le Grand-lac, car ce bassin est peu influencé par les apports sédimentaires du Rhône. Ainsi une modification des apports autochtones du Léman, suivant par exemple les changements de l'état trophique du lac, n'aura qu'une importance marginale sur le bilan global des matières particulaires du bassin.

Remerciements

Nous remercions le réviseur anonyme pour ces remarques constructives, Robert Degli Agosti, rédacteur des Archives des Sciences, pour sa gestion efficace des aspects éditoriaux, et Neil Graham pour la relecture du résumé anglais.

Bibliographie

- **Appleby P.** 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. *In*: Last W, Smol JP (eds) Tracking Environmental Change Using Lake Sediments, vol 1. Kluwer, pp 171-203.
- **Arlaux Y.** 2010. Reconstruction historique des apports en uranium dans le Léman (Suisse-France). Master, Université de Genève, 93 p.
- **Baster I.** 2002. Holocene delta in western Lake Geneva and its palaeoenvironmental implications: seismic and sedimentological approach. Terre & Environnement, 38: 159 pp.
- **Benninger LK, Aller RC, Cochran JK, Turekian KK.** 1979. Effects of biological sediment mixing on the 210Pb chronology and trace metal distribution in a Long Island Sound sediment core. Earth and Planetary Science Letters, 43: 241-259.
- **Chateauneuf JJ, Fauconnier D.** 1977. Etude palynologique des sondages du lac Léman. Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire Supplément, 50: 371-412.
- **Creer KM, Molyneux L, Vernet JP, Wagner JJ.** 1975. Paleomagnetic dating of 1-metre cores of sediments from Lake Geneva. Earth and Planetary Science Letters, 28: 127-132.
- **Dominik, J, Burrus, D, Vernet, JP.** 1983. A preliminary investigation of the Rhone River plume in Eastern Lake Geneva. Journal of Sedimentary Petrology, 53: 159-163.
- **Dominik J, Dulinski M, Span D, Hofmann A, Favarger PY, Vernet J-P.** 1993. Transfert de matière et de radio-isotopes entre l'eau et les sédiments dans le Léman. Rapport CIPEL, campagne 1992: 163-188.
- **Dominik J, Loizeau J-L, Span D.** 1992. Radioisotopic evidence of perturbations of recent sedimentary record in lakes: a word of caution for climate studies. Climate Dynamics, 6: 145-152.
- **Dominik J, Schuler C, Santschi P.** 1989. Residence times of Th-234 and Be-7 in Lake Geneva. Earth and Planetary Science Letter, 93: 345-358.
- **Ebner I.** 2004. Evolution de la contamination métallique en Suisse au cours du XXe siècle: analyse de trois lacs. Master, Université de Genève, 88 pp.
- **Favarger PY, Vernet J-P.** 1979. L'isotope Cs-137 utilisé comme dateur de la pollution des sédiments lacustres. Archives des Sciences, Genève, 32: 25-42.
- **Flynn, WW.** 1968. Determination of low levels of Polonium-210 in environmental materials. Analytica Chimica Acta, 43: 221-227.
- **Forel F-A.** 1892. Le Léman - monographie limnologique, vol 1. Rouge, Lausanne, 543 pp.
- **Gandais V.** 1989. Origines et variations spatio-temporelles des flux de matière particuléaire au centre du Léman. Thèse de doctorat, Université de Genève, 112 pp.
- **Garcia Bravo A.** 2010. Mercury methylation and trophic transfer in contaminated freshwater systems. Thèse de doctorat, Université de Genève, 222 pp.
- **Giovanoli F.** 1990. Horizontal transport and sedimentation by interflows and turbidity currents in Lake Geneva. In: Tilzer M, Serruya C (eds) large lakes: ecological structure and function. Springer Verlag, Berlin, p. 197-195.
- **Girardclos S, Fiore J, Rachoud-Schneider A-M, Baster I, Wildi W.** 2005. Petit-Lac (western Lake Geneva) environment and climate history from deglaciation to the present: a synthesis. Boreas, 34: 417-433.
- **Girardclos S, Hilbe M, Corella JP, Loizeau J-L, Kremer K, Del Sontro T, Arantegui A, Moscariello A, Arlaud F, Akhtman Y, Anselmetti FS, Lemmin U.** 2012. Searching the Rhone delta channel in Lake Geneva since François-Alphonse Forel. Archives de sciences, Genève, 65: 103-118.
- **Hajdas I, Ivy SD, Beer J, Bonani G, Imboden D, Lotter AF, Sturm M, Suter M.** 1993. AMS radiocarbon dating and varve chronology of Lake Soppensee - 6000 to 12000 C-14 years BP. Climate Dynamics, 9: 107-116.
- **Haller L.** 2010. Microbial and geochemical characterization of a contaminated freshwater ecosystem (the case of Vidy Bay, Lake Geneva, Switzerland). Thèse de doctorat, Université de Genève, 186 pp.
- **Hubert P, Marin E, Meybeck M, Olive P, Siwertz E.** 1969. Aspects hydrologique, géochimique et sédimentologique de la crue exceptionnelle de la Dranse du Chablais du 22 septembre 1968. Archives des Sciences, Genève, 22: 581-604.
- **Jaccard T, Ariztegui D, Wilkinson KJ.** 2009. Assessing past changes in bioavailable zinc from a terrestrial (Zn/Si)(opal) record. Chemical Geology, 258: 362-367.
- **Krishnaswamy S, Lal D, Martin JM, Meybeck M.** 1971. Geochronology of lake sediments. Earth and Planetary Science Letters, 11: 407-414.
- **Lambert A, Giovanoli F.** 1988. Records of riverborne turbidity currents and indications of slope failures in the Rhone delta of Lake Geneva. Limnology and Oceanography, 33: 458-468.
- **Libby WF.** 1952. Radiocarbon dating. University of Chicago Press, Chicago.
- **Loizeau J-L.** 1991. La sédimentation récente dans le Delta du Rhône: processus et évolution. Thèse de doctorat, Université de Genève, 191 pp.
- **Loizeau J-L, Dominik J.** 2000. Evolution of the Upper Rhone River discharge and suspended sediment load during the last 80 years and some implications for Lake Geneva. Aquatic Sciences, 62: 54-67.
- **Loizeau J-L, Dominik J, Luzzi T, Vernet J-P.** 1997. Sediment core correlation and mapping of sediment accumulation rates in Lake Geneva (Switzerland, France) using Volume Magnetic Susceptibility. Journal of Great Lakes Research, 23: 391-402.
- **Loizeau J-L, Pardos M, Monna F, Peytremann C, Haller L, Dominik J.** 2004. The impact of a sewage treatment plant's effluent on sediment quality in a small bay in Lake Geneva (Switzerland–France). Part 2: Temporal evolution of heavy metals. Lakes & Reservoirs: Research and Management, 9: 53-63.

- **Loizeau J-L, Roze S, Peytremann C, Monna F, Dominik J.** 2003. Mapping sediment accumulation rate by using volume magnetic susceptibility core correlation in a contaminated bay (Lake Geneva, Switzerland). Eclogae Geologicae Helvetiae, 96: S73-S79.
- **Lüdi W.** 1939. Etudes sur la partie occidentale du Lac de Genève. Analyse pollinique des sédiments du Lac de Genève. Mém Soc Phys Hist Nat Genève, 41: 467-497.
- **Mangini A, Dominik J.** 1979. Late Quaternary Sapropel on the Mediterranean Ridge - U-Budget and Evidence for Low Sedimentation-Rates. Sedimentary Geology, 23: 113-125.
- **Meybeck M.** 1971. Bilan hydrochimique et géochimique du lac Léman. Paris VI, Paris, 245 pp.
- **Monna F, Dominik J, Loizeau J-L, Pardos M, Arpagaus P.** 1999. Origin and evolution of Pb in sediments of Lake Geneva (Switzerland-France). Establishing a stable Pb record. Environmental Science & Technology, 33: 2850-2857.
- **Moscariello A, Schneider AM, Filippi ML.** 1998. Late glacial and early Holocene palaeoenvironmental changes in Geneva Bay (Lake Geneva, Switzerland). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 140: 51-73.
- **Muller G, Dominik J, Mangini A.** 1979. Eutrophication changes sedimentation in part of Lake Constance. Naturwissenschaften, 66: 261-262.
- **Paréjas E.** 1929. L'épaisseur des varves dans le Haut-lac de Genève. 3e congrès du Rhône, Genève: 207-211.
- **Pennington W, Tutin PG, Cambray RS, Fisher EM.** 1973. Observations on lake sediments using fallout Cs-137 as a tracer. Nature, 242: 324-326.
- **Pote J, Haller L, Loizeau J-L, Bravo AG, Sastre V, Wildi W.** 2008. Effects of a sewage treatment plant outlet pipe extension on the distribution of contaminants in the sediments of the Bay of Vidy, Lake Geneva, Switzerland. Bioresource Technology, 99: 7122-7131.
- **Rapin F, Dominik J, Giovanoli F, Elghobary H, Favarger P-Y, Vernet J-P.** 1985. Evolution du phosphore dans l'eau interstitielle et dans les sédiments – chronologie de la pollution. Rapport CIPEL campagne 1984: 81-96.
- **Ritchie JC, Hawks PH, Gill AC, McHenry JR.** 1972. Fallout Cs-137 in reservoir sediment. Health Physics, 22: 96-98.
- **Ritchie JC, McHenry JR, Gill AC.** 1973. Dating recent reservoir sediments. Limnology and Oceanography, 18: 254-263.
- **Rozé S.** 2001. Evaluation des processus sédimentaires et du transport des sédiments contaminés dans la baie de Vidy. Master, Université de Genève, 89 pp.
- **Sastre V.** 2003. Enregistrement sédimentaire de l'évolution de la fréquence des courants de densité originaires du Rhône dans le Léman (France-Suisse) et impact sur la réoxygénation des eaux profondes. Master, Université de Genève, 100 pp.
- **Savichtcheva O, Debroas D, Kurmayer R, Villar C, Jenny JP, Arnaud F, Perga ME, Domaizon I.** 2011. Quantitative PCR Enumeration of Total/Toxic Planktothrix rubescens and Total Cyanobacteria in Preserved DNA Isolated from Lake Sediments. Applied and Environmental Microbiology, 77: 8744-8753.
- **Span D, Favarger P-Y, Dominik J, Gallerini B, Vernet J-P.** 1990. Evolution du phosphore dans l'eau interstitielle et dans les sédiments - Evolution de la pollution métallique. Rapport CIPEL, Lausanne: 115-135.
- **Thevenon F, Graham ND, Chiaradia M, Arpagaus P, Wildi W, Poté J.** 2011. Local to regional scale industrial heavy metal pollution recorded in sediments of large freshwater lakes in central Europe (lakes Geneva and Lucerne) over the last centuries. Science of the Total Environment, 412-413: 239-247.
- **Vernet J-P.** 1977. Chronologie récente de la pollution des sédiments. Rapport CIPEL campagne 1976: 312-321.
- **Vernet J-P, Dominik J, Favarger P-Y.** 1984. Texture and sedimentation rates in Lake Geneva. Environmental Geology, 5: 143-149.
- **Vernet J-P, Favarger P-Y.** 1982. Climatic and anthropogenic effects on sedimentation and geochemistry of lakes Bourget, Annecy and Léman. Hydrobiologia, 91-2: 643-650.
- **Wang ZJ, Elghobary H, Giovanoli F, Favarger P-Y.** 1986. Interpretation of metal profiles in a sediment core from Lake Geneva - metal mobility of pollution. Schweizerische Zeitschrift Fur Hydrologie-Swiss Journal of Hydrology, 48: 1-17.
- **Wildi W.** 2009. Bathymétrie et analyse de la qualité des sédiments lacustres du Léman au large de la Commune de Pully, rapport interne Institut F.-A. Forel, 20 pp.