

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 319, série II,
p. 535 à 541,
1994M. P., J.F. P. et N. P. : Laboratoire de
Glaciologie
et Géophysique de l'Environnement,
CNRS,
BP n° 96, 38402 Saint-Martin-d'Hères
Cedex, France ;P. M. : Mission ORSTOM, CP 9214, La
Paz, Bolivie ;J. A. : Universidad Mayor de San
Andrés,
CP 12198, La Paz, Bolivie ;D. W. : Centre ORSTOM, BP n° 1857,
Yaoundé, République du Cameroun.

Sédimentation récente dans le lac Titicaca (Bolivie)

Michel Pourchet, Philippe Mourguiart, Jean-François Pinglot, Nicolas Preiss, Jaime Argollo
et Denis Wirrmann

Résumé Sur l'ensemble du lac Titicaca, on a estimé la sédimentation actuelle, par la méthode du plomb-210, à 3,9 Mt.an⁻¹. Plus de 90 % du dépôt se produit à des profondeurs inférieures à 5 m. Les variations bathymétriques du lac entraînent parfois des hiatus dans cette zone littorale.

Mots-clés : Sédimentation, ²¹⁰Pb, Titicaca, Colombie.

Abstract Modern sedimentation of Lake Titicaca, Bolivia

Using the ²¹⁰Pb method, we have estimated the sedimentation rate of Lake Titicaca at 3.9 Mt.a⁻¹. More than 90% of deposits occur in the first 5 m water depth. In this littoral area hiatuses are sometimes caused by bathymetric variations.

Keywords : Sedimentation, ²¹⁰Pb, Titicaca, Columbia.

Abridged English Version

FOR this recent sedimentation rate study, we have selected Lake Titicaca (figure 1), located in the intertropical zone (15-17° Lat. S) and at high altitude (3,810 m). Measurements are conducted with the ²¹⁰Pb method using the constant rate of supply model (Goldberg, 1963; Robbins, 1978; Oldfield and Appleby, 1984). For the chemical extraction of ²¹⁰Po, we have followed the Hasänen method (1977).

Except for the deeper location (LK1), all sediment cores show a decrease of unsupported ²¹⁰Pb versus depth (figure 3) with an abrupt slope change corresponding to the Titicaca low level (Roche *et al.*, 1991) (figure 4). Lukurmata core profile (Binford *et al.*, 1991) is similar and we have reinterpreted this work in the light of our results.

In relation with water depth, these abrupt slopes are probably caused by hiatus sedimentation

or by considerable mixing induced by human activity, principally the mowing of totora (Levieil and Orlove, 1991).

Our first estimation of sedimentation rate (table II) is 1.3 Mt.a⁻¹ for Huinamarca Lake (small lake) and 2.6 Mt.a⁻¹ for Chucuito lake (great lake). More than 90% of deposits occur in the first 5 m water depth.

Comparison between flux calculated with the residual activity of unsupported ²¹⁰Pb, and flux calculated with the activity of ²¹⁰Pb in the water-sediment interface (table I), confirms a sedimentation hiatus in the first 5 m water depth and partial erosion in the two deeper stations (SJ1 and LK1).

For a long continuous palaeorecord, the prospection of the deeper area of Lake Titicaca : NW area of Huinamarca lake below 20 m depth, or area between 150 to 250 m depth for Chucuito lake, should be performed.

I. INTRODUCTION

Le lac Titicaca, à cheval sur la frontière entre le Pérou et la Bolivie (figure 1), a été choisi, dans le cadre de cette étude, pour sa situation géographique exceptionnelle. Il se

situe, en effet, dans la zone intertropicale entre 15 et 17° de latitude sud et entre 68°30' et 70° de longitude ouest à une altitude d'environ 3810 m, ce qui en fait le lac navigable le plus haut du monde. La sédimentation, qu'elle soit d'origine endogène ou exogène,

09 OCT. 1995

U.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 42(1832A)

Cote : B

Note

présentée par
Georges Pédro.remise le 18 avril 1994,
acceptée après révision
le 16 juin 1994.

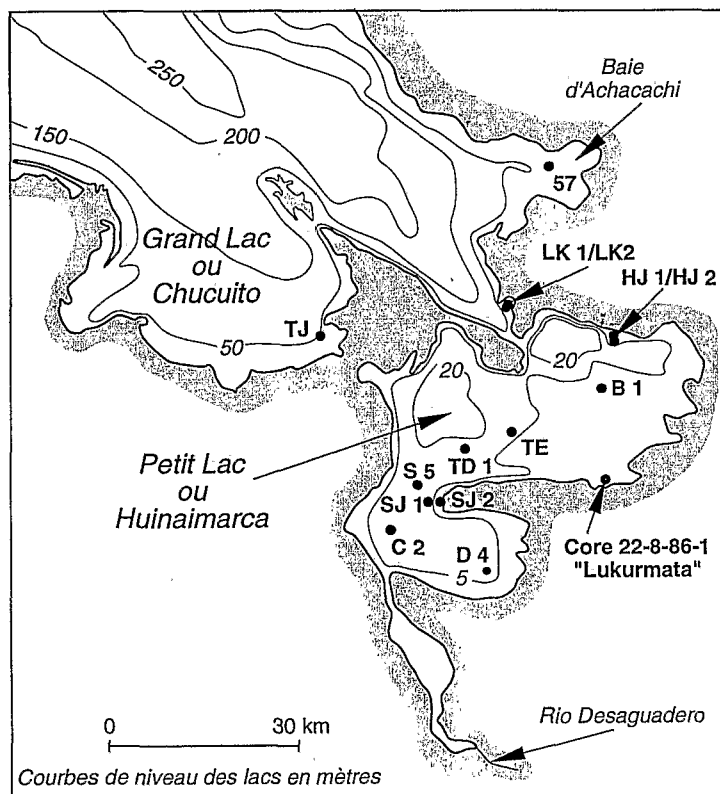
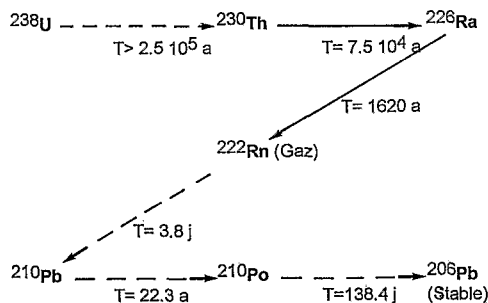


Figure 1 Localisation des sites étudiés dans la partie bolivienne du lac Titicaca.

Location of studied stations in the Bolivian part of Lake Titicaca.

Figure 2 Schéma simplifié de la famille de l'uranium-238.

Simplified decay scheme of uranium-238 family.



a fait l'objet d'études uniquement qualitatives (Boulangé *et al.*, 1981; Rodrigo et Wirrmann, 1991). Nous présentons des données quantitatives originales, obtenues à partir d'analyses radiométriques du plomb-210. En dehors de cas très particuliers, tels que les dépôts varvés, cette méthode semble être l'une des plus fiables et des plus précises pour estimer un taux d'accumulation sédimentaire (Sharma *et al.*, 1987; Orson *et al.*, 1990). Nous avons ici procédé à différents sondages en prenant en compte la hauteur d'eau et la topographie du bassin lacustre. Ainsi, quatre carottes sont lo-

calisées dans le lac Huinamarca, milieu caractérisé par de très faibles pentes; les deux autres proviennent du lac Chucuito dont les berges plongent abruptement jusqu'à des profondeurs pouvant largement dépasser la centaine de mètres (figure 1).

II. PRINCIPE ET MÉTHODES DE MESURE

Du radon-222 est émis en continu dans l'atmosphère à partir de la désintégration de l'uranium-238 contenu dans les sols et donne, par filiation radioactive, du plomb-210 (figure 2). Ce ^{210}Pb dit « non supporté » ($^{210}\text{Pb}_i$) se dépose et se retrouve partiellement entraîné et isolé dans les sédiments, où il décroît avec une période radioactive de 22,3 ans. Une contribution secondaire de ^{210}Pb se retrouve également dans les sédiments; il s'agit de ^{210}Pb formé *in situ* dans la matrice sédimentaire par filiation radioactive des parents à vie longue de l'uranium-238 qu'elle contient (^{238}U , ^{234}U , ^{234}Th ou ^{226}Ra). A l'échelle du siècle, l'activité de ce ^{210}Pb dit « supporté » ($^{210}\text{Pb}_s$) peut être considérée comme constante (Robbins, 1978). Pour les datations, elle est déduite de l'activité totale mesurée ($^{210}\text{Pb}_t$):

$$^{210}\text{Pb}_t = ^{210}\text{Pb}_i + ^{210}\text{Pb}_s$$

Elle est généralement estimée à partir des échantillons « assez vieux » pour que $^{210}\text{Pb}_i$ puisse être considéré comme négligeable par rapport à $^{210}\text{Pb}_s$ (environ 1 siècle); dans ce cas :

$$^{210}\text{Pb}_t \approx ^{210}\text{Pb}_s$$

Dans la présente étude, les carottes de sédiments ont été obtenues à l'aide d'un petit carottier à piston de 5,5 cm de diamètre et d'environ 80 cm de long. Dès leur sortie de l'eau, les carottes ont été découpées centimètre par centimètre et chaque échantillon a été conditionné dans des flacons polyéthylène étanches. Ils ont ensuite été séchés à l'étuve à 60 °C. Les taux de sédimentation ont été mesurés par la méthode du ^{210}Pb en utilisant le modèle *Constant Rate of Supply* (Goldberg, 1963; Robbins, 1978; Oldfield et Appleby, 1984). Les teneurs en ^{210}Pb ont été me-

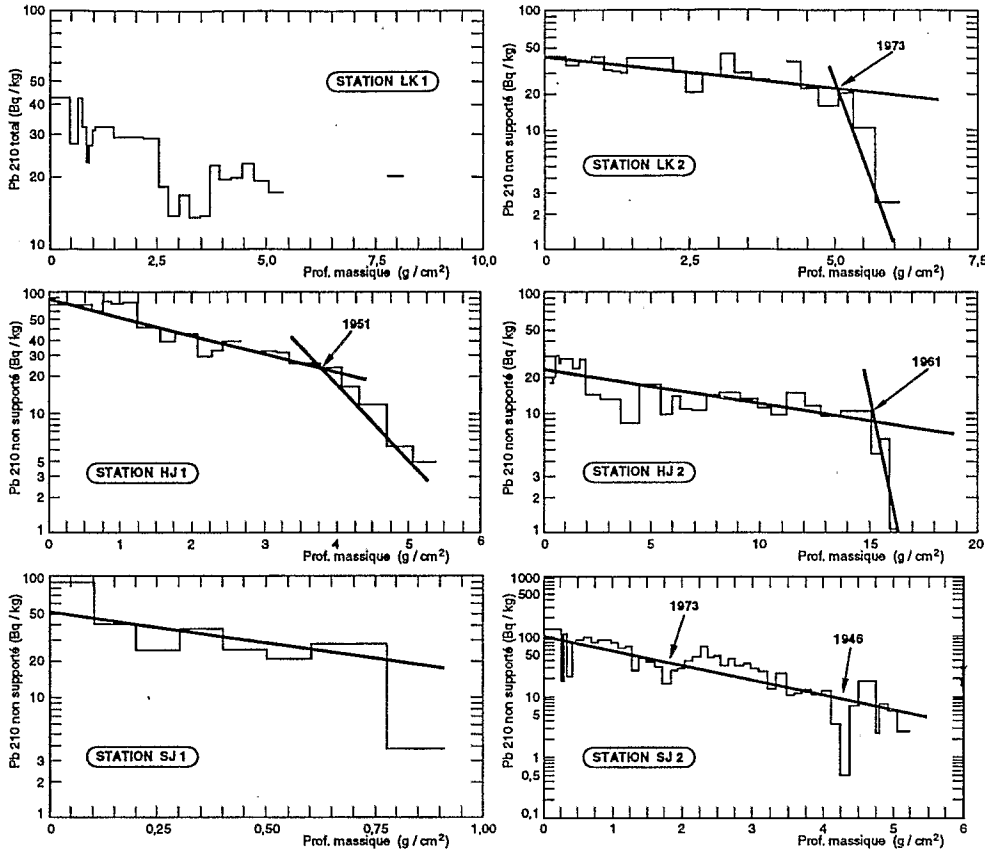


Figure 3 Variations du ^{210}Pb en fonction de la profondeur pour l'ensemble des stations étudiées.

^{210}Pb versus depth for all stations.

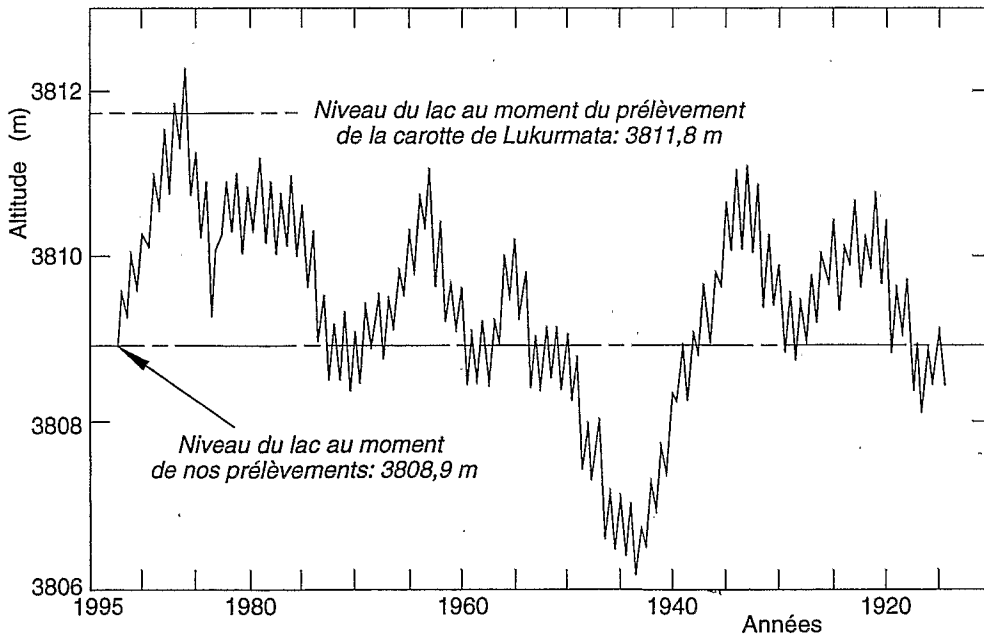


Figure 4 Variations du niveau du lac Titicaca au cours du xx^e siècle.

Variations of Titicaca level during the xxth century.

Figure 5 Variations des taux de sédimentation en fonction de la profondeur d'eau.

Figure 5

Sedimentation rate versus water depth.

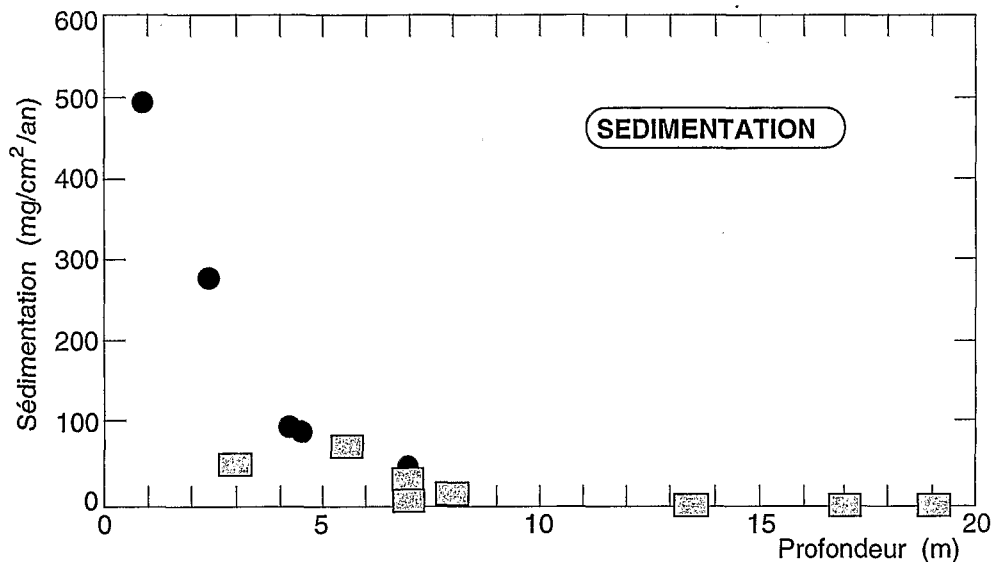


Tableau I Valeurs des taux de sédimentation pour les différentes carottes étudiées. Pour l'ensemble de nos stations ainsi que pour la carotte 22-VIII-86-1 de Lukurmata, les datations ont été obtenues par la méthode du ^{210}Pb ; dans les autres cas, nous avons utilisé les datations au ^{14}C pour les niveaux continus les plus récents. Dans la colonne indiquant les flux en ^{210}Pb , la première valeur correspond au flux calculé à partir de l'activité résiduelle; la seconde valeur, entre parenthèses, donne le flux calculé à partir de l'activité à l'interface eau-sédiment.

Sedimentation rate in studied cores. For our stations and for Lukurmata core, datings are obtained by the ^{210}Pb method. In the other cases we have used ^{14}C dating of the more recent levels. For ^{210}Pb flux, the first value corresponds to the flux calculated from the residual activity, the second value (in brackets) to the flux deduced from the activity at the water-sediment interface.

Stations	Profondeur (m)	Sédimentation (mg/cm².an)	Activité résiduelle en ^{210}Pb (Bq/m²)	Flux de ^{210}Pb (Bq/m².an)	Références
Grand Lac					
LK1.....	11,5	?	364	11 - (?)	Cette étude
LK2.....	2,4	278	1 761	55 - (111)	»
Petit Lac					
HJ1.....	4,3	96	2 145	73 - (96)	»
HJ2.....	0,9	493	2 193	69 - (148)	»
SJ1.....	7	28	292	9 - (25)	»
SJ2.....	4,5	90	1 958	62 - (96)	»
Lukurmata :					
57.....	< 3 (?)	50	1 500	47 - (90)	Binford <i>et al.</i>
TD1.....	7	15			Fontes <i>et al.</i>
TE.....	19	3			Mourguiart <i>et al.</i>
B1.....	8	15			»
D4.....	5,6	70			Wirrmann <i>et al.</i>
	7	9			(données non publiées)
C2.....	13,5	2,6			»
S5.....	17	2,7			»

surées en spectrométrie alpha, par l'intermédiaire du ^{210}Pb . L'incertitude sur nos déterminations d'âge est principalement liée à la statistique de comptage du ^{210}Po , dans notre cas on peut estimer l'écart-type à 5%. L'extraction du ^{210}Po a été faite en utilisant la méthode décrite par Hasänen (1977).

III. INTERPRÉTATION DES PROFILS DE SÉDIMENTATION

Exception faite de la carotte la plus profonde (LK1 prélevée par 11,5 m d'eau), tous les autres profils montrent une décroissance

Tableau II Estimation de la sédimentation annuelle par tranches de profondeurs, s1 et M1 se rapportent au petit lac, s2 et M2 au grand lac.

Estimation of the annual sedimentation by depth sections; s1, M1 and s2, M2 refer respectively to the small and great lake.

Plage bathymétrique (m)	Superficie (km ²)		Carottes utilisées	Vitesse moyenne de sédimentation (mg/cm ² .an)	Masses (kt/an)	
	s1	s2			M1	M2
0-5 m	599	1 210	LK2,HJ1,HJ2, SJ2, Lukurmata	201	1 204	2 432
5-10 m	334	151	SJ1, Achacachi, TE, B1, D4	27	90	41
10-20 m	267	288	TD1, C2, S5	3	8	9
>20 m	167	2 682		(≈5)	(≈8)	(≈134)
				Σ	1 310	2 616

de l'activité du ²¹⁰Pb non supporté en fonction de la profondeur (**figure 3**). Ces profils ne sont pas monotones mais présentent tous, à partir d'un certain niveau, une brusque variation de pente. En utilisant la première partie de la courbe, nous avons pu dater cette rupture. Dans tous les cas, elle correspond à un niveau bas du lac (Roche *et al.*, 1991), (**figure 4**). Suivant la profondeur de la carotte, ce niveau se situe en 1946, en 1961, ou en 1973. On peut observer que les deux carottes HJ1 et SJ2, prélevées à des profondeurs sensiblement égales, n'ont pas enregistré de manière similaire les mêmes événements hydrologiques. Une étude détaillée des conditions locales: étendue de la végétation aquatique, importance du faucardage, etc., au cours des 50 dernières années serait nécessaires pour amener d'éventuels éléments de réponses.

Le profil de la carotte de Lukurmata (Binford *et al.*, 1991) est identique; une réinterprétation de ce travail nous donne une rupture de pente qui se situe également vers 1970. Nous pensons que seule la première partie des courbes correspondant aux différents profils donne une valeur significative de la sédimentation et que, dans la plage de profondeur que nous avons étudiée, l'abrupte décroissance des profils après la rupture de pente est liée, soit à une absence de sédimentation lorsque le site n'est plus immergé, soit à un mixage important lié à l'activité humaine, lorsque la hauteur d'eau devient suffisamment faible pour permettre le faucardage de la végétation aquatique, principalement de la grande totora (Levieil et Orlove, 1991).

D'une manière générale, on observe une forte décroissance de la sédimentation en fonction de la profondeur (**figure 5**) et un bon accord avec l'ensemble des valeurs relevées dans la littérature (**tableau I**). En extrapolant tous les résultats disponibles sur l'ensemble du lac Titicaca, nous avons essayé d'estimer la masse annuelle de sédiments déposés par tranche de profondeur (**tableau II**). On peut observer que plus de 90 % du dépôt sédimentaire se fait entre 0 et 5 m d'eau et que la masse annuelle de sédiments déposés est de l'ordre de 1,3 Mt pour le lac Huinamarca (petit lac) contre 2,6 Mt pour le lac Chucuito (grand lac). Notre échantillonnage est insuffisant pour tenter une estimation de la part respective des constituants sédimentaires: carbonates détritiques, matières organiques, etc.

IV. LES FLUX DE ²¹⁰Pb

Le flux en ²¹⁰Pb (F) arrivant à la surface des sédiments peut être déduit des profils de ²¹⁰Pb non supporté. Si A est l'activité résiduelle en ²¹⁰Pb non supporté et k la constante radioactive du ²¹⁰Pb ($k = 0,03144 \text{ an}^{-1}$), on a la relation:

$$F = k A$$

Entre 0 et 5 m de profondeur, pour l'ensem-

ble de nos résultats (table I), on obtient un flux moyen de $63 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$, la valeur minimale étant de $55 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ et la valeur maximale de $73 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$. A partir des résultats de Binford et al. (1991) pour la carotte de Lukurmata, on aboutit à un flux du même ordre de grandeur ($47 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$). Ces valeurs sont sensiblement inférieures à celles que l'on peut déduire des activités du ^{210}Pb à l'interface eau-sédiment. En effet, si A_0 est l'activité à l'interface eau-sédiment et S le taux de sédimentation que nous avons déterminé pour chaque station, le flux F est donné par la relation :

$$F = A_0 S$$

Dans notre cas, entre 0 et 5 m de profondeur, on trouve un flux moyen de $110 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ avec comme valeurs extrêmes 96 et $148 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Le site de Lukurmata est sensiblement équivalent avec un flux de $90 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Ces écarts entre les flux estimés à partir de l'intégration des valeurs de ^{210}Pb résiduels ou de la valeur du flux en surface sont conformes à l'observation des courbes de sédimentation qui indiquent toutes une rupture du rythme de sédimentation pour des âges inférieurs à 50 ans. Ces hiatus de sédimentation entraînent un déficit du ^{210}Pb résiduel et, par voie de conséquence, du flux de ^{210}Pb estimé par cette méthode. Pour les deux sites situés au-delà de 5 m de profondeur, SJ1 et LK1, respectivement prélevés par 7 et 11,5 m d'eau, les flux de ^{210}Pb (9 et $11 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) sont nettement plus faibles que ceux des zones moins profondes. Ils demeurent très inférieurs au flux atmo-

sphérique régional (Pourchet et al., à paraître) et traduisent l'érosion partielle que subit cette tranche de profondeurs.

V. CONCLUSION

Pour l'ensemble du lac Titicaca, nous avons pu estimer la sédimentation annuelle à environ 3,9 Mt se répartissant en 1,3 Mt pour le lac Huinamarca et 2,6 Mt pour le lac Chucuito. Nous avons pu mettre en évidence que plus de 90 % de la sédimentation se fait entre 0 et 5 m de profondeur d'eau, mais que cette zone subit des hiatus importants en période de basses eaux. Dans cette tranche de hauteur d'eau, la sédimentation détritique est très fortement freinée par la végétation aquatique et principalement par la grande totora. Au-delà de cette zone et au moins jusqu'à une profondeur d'une vingtaine de mètres, on observe une érosion partielle des dépôts sédimentaires, érosion sans doute liée à l'action conjointe de la pente et des courants. Ces observations mettent en évidence la difficulté d'utiliser la sédimentation littorale comme support de paléoinformations. On doit en particulier s'attendre à des hiatus dans les séquences d'enregistrement. Une prospection des zones profondes serait certainement judicieuse afin d'obtenir de longues séquences continues, par exemple la zone NW du lac Huinamarca en dessous de 20 m et la zone comprise entre 150 et 250 m de profondeur pour le lac Chucuito, cette dernière zone couvrant environ 36 % de la surface de ce lac.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BINFORD, M. W., BRENNER, M. et ENGSTROM, D. R., 1991. Patrones de sedimentation temporal en la zona litoral del Huinamarca, *El Lago Titicaca*, DEJOUX, C. et ILTIS, A., éd., p. 47-56.
- BOULANGÉ, B., VARGAS, C. et RODRIGO, L. A., 1981. *Rev. Hydrobiol. Trop.*, 14, (4), p. 299-309.
- GOLDBERG, E. D., 1963. Radioactive dating, *Geochronology with lead 210*, IAEA, p. 121-131.
- FONTES, J. C., BOULANGÉ, B. et RODRIGO, L. A., 1981. Carbone 14, carbone 13 et oxygène 18 dans les sédiments carbonatés du lac Titicaca. Premières estimations des vitesses de sédimentation et essais de paléoclimatologie, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 293, série II, p. 53-56.
- HASÄNEN, E., 1977. Dating of sediments based on ^{210}Pb measurements, *Radiochemical Radioanalytical Letters*, 31, (45), p. 207-214.
- LEVIEIL, D. et ORLOVE, B. S., 1991. Importancia socio-economica de las macrofitas, *El Lago Titicaca*, DEJOUX, C. et ILTIS, A., éd., p. 509-516.
- MOURGUIART, Ph., WIRRMANN, D., FOURNIER, M. et SERVANT, M., 1992. Reconstruction quantitative des niveaux du petit lac Titicaca au cours de l'Holocène, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 315, série II, p. 875-880.

- OLDFIELD, R. et APPLEBY, P. G., 1984. *Lake sediments and environmental history*, HAWORTH, E. L. et LUND, J. W., éd., p. 93-124.
- ORSON, R. A., SIMPSON, R. L. et GOOD, R. E., 1990. *Journal of Sedimentary Petrology*, 60, (6), p. 859-869.
- POURCHET, M., MOURGUIART, Ph., PINGLOT, J. F., PREISS, N., ARGOLLO, J. et WIRRMANN, D. Sédimentation récente dans les lacs de la haute vallée de Jichhu Kota (Bolivie) (à paraître).
- ROBBINS, J. A., 1978. Geochemical and geophysical applications of radioactive Lead. *In* NRIAGU, éd., *The Biogeochemistry of Lead in the Environment*, p. 285-393.
- ROCHE, M. A., BOURGES, J., CORTES, J. et MATTOS, R., 1991. Climatología e hidrología de la cuenca del lago Titicaca, *El Lago Titicaca*, DEJOUX, C. et ILTIS, A., éd., p. 83-104.
- RODRIGO, L. A. et WIRRMANN, D., 1991. Aspecto general de la sedimentation actual, *El Lago Titicaca*, DEJOUX, C. et ILTIS, A., éd., p. 39-43.
- SHARMA, P., GARDNER, L. R., MOORE, W. S. et BOLLINGER, M. S., 1987. *Limnol. Oceanogr.*, 32, p. 313-326.
