

Évaluation des vitesses de sédimentation récente dans les hautes vallées des Andes boliviennes. Son intérêt dans l'estimation des paléo-pollutions atmosphériques

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

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 320, série II a,
p. 477 à 482,
1995

Résumé Nous indiquons des vitesses de sédimentation récentes dans plusieurs lacs d'une haute vallée des Andes Boliviennes. Les mesures de ^{210}Pb et de ^{137}Cs indiquent que plusieurs de ces sites pourraient servir à la reconstitution des pollutions atmosphériques.

Mots-clés : Sédimentation, Altiplano, ^{210}Pb , ^{137}Cs , Flux atmosphérique.

M. 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.

Abstract Evaluation of modern sedimentation in the high valley of Bolivian Andes and its value for estimating past atmospheric pollution

We have estimated recent sedimentation rates in several lakes of a high valley of the Bolivian Andes. Measurements of ^{210}Pb and ^{137}Cs show that some of these lake sediments should be used for the palaeo-estimation of atmospheric pollution.

Keywords: Sedimentation, Altiplano, ^{210}Pb , ^{137}Cs , Atmospheric flux.

**Abridged
English
Version**

WE give recent sedimentation rates and ^{210}Pb fluxes in several lakes of the high valley of Jichhu Kota located in the Bolivian Andes (figure 1). Sedimentation rates have been determined by the ^{210}Pb method using the *Constant rate of supply model* (Goldberg, 1963). In three cores, the unsupported ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_i$) profiles (figure 2) show a positive sedimentation rate (table I). Two other cores (ik_3 and ik_4) contain only ^{210}Pb , which therefore indicate a zero or negative sedimentation rate (erosion).

From one site to another we observe a great spatial variation in the sedimentation rate but for each core a constant value for the last century.

The supported ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_s$) is smaller in the organic sediment of the Jichhu Kota peat than in the contiguous Kara Kota lake sediment

(respectively 9 and 112 Bq.kg^{-1}), where the detritic mineral contribution is more important.

For ik_1 and ik_2 , the high value of $^{210}\text{Pb}_i$ flux at the water-sediment interface is due to the contribution of catchment. On the contrary, for the Jichhu Kota peat, the sediment water flux of $^{210}\text{Pb}_i$ ($41 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$) is similar to the atmospheric flux observed at the same latitude. This observation is confirmed by ^{137}Cs measurement: the total ^{137}Cs content in sediment (table II) is 196 Bq.m^{-2} at the time of deposition, compared with 220 Bq.m^{-2} deduced from the atmospheric observations made in the nearby stations of La Paz and Chacaltaya.

Located at high altitude, Jichhu Kota peat is therefore a good observatory for the paleo-reconstruction of the circulation of atmospheric pollutants at this latitude and at least for the last century.

09 OCT. 1995

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

N° : 42485 ea
Cote : B

Note

présentée par
Georges Pédro.

remise le 11 juillet 1994,
acceptée après révision
le 5 janvier 1995.

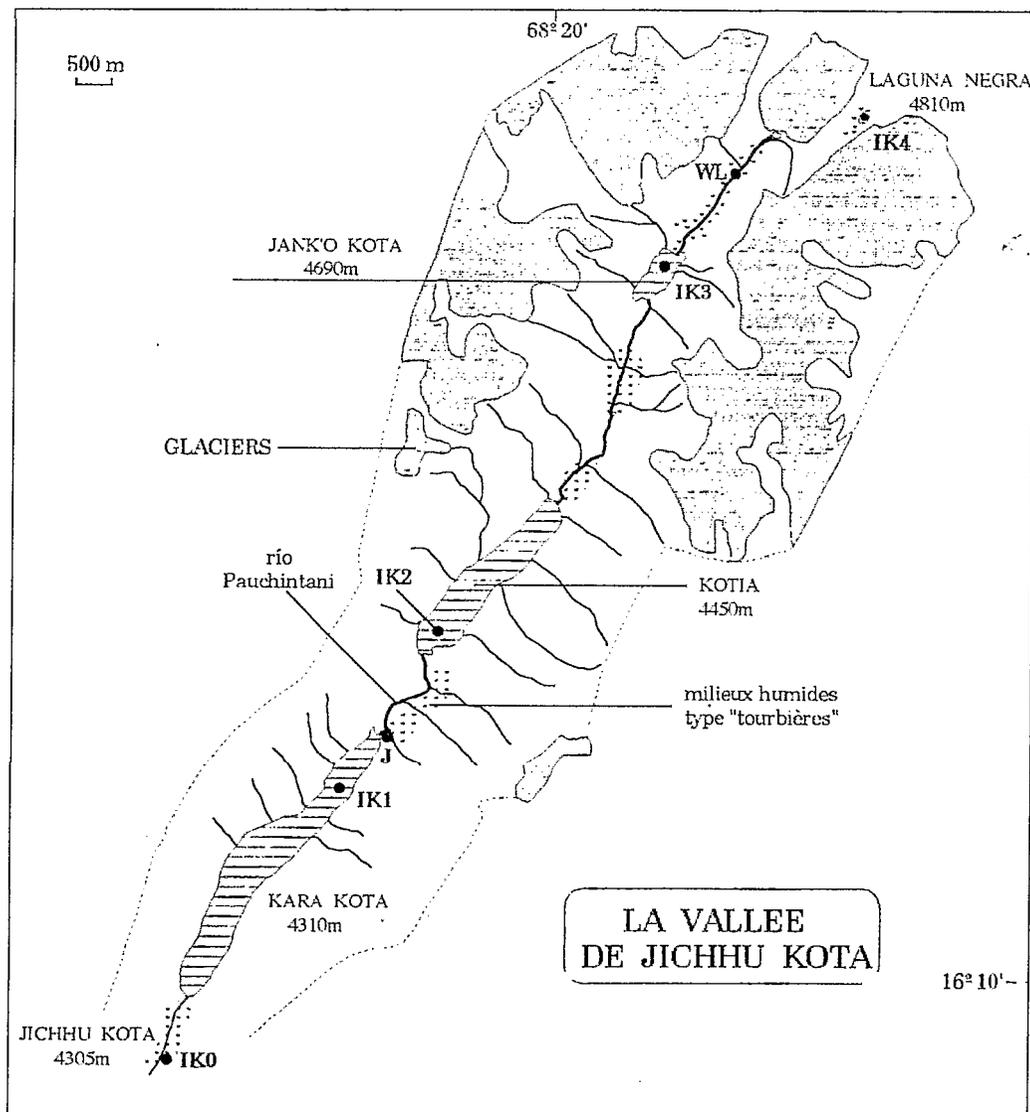
I. INTRODUCTION

La vallée de Jichhu Kota ($16^{\circ}10'$ lat. S et $68^{\circ}20'$ long. O), située au NE de La Paz dans la Cordillère Royale des Andes boliviennes, est une vallée d'origine glaciaire dont les bas-fonds sont occupés, soit par des lacs, soit par des milieux marécageux (Pierre et Wirrmann, 1986). Les trois lacs principaux ont pour noms : Kara Kota, Kotia et Jank'o Kota et se situent à des altitudes respectives de 4 310, 4 450 et 4 690 m. Un quatrième lac occupe une toute petite dépression, au pied d'un gla-

cier du versant est de la montagne, à 4 810 m d'altitude ; il a été nommé Laguna Negra (figure 1). A l'exception de la flore (Ostria, 1987 *b*), ces milieux aquatiques n'ont été que très peu étudiés. Il nous a paru intéressant d'effectuer des prélèvements tout au long de la vallée, dans ces lacs et milieux humides, afin de mieux comprendre les mécanismes de la sédimentation dans une vallée tropicale de haute altitude. Nous présentons ici les résultats obtenus à partir de la mesure du ^{210}Pb , et parfois du ^{137}Cs , sur les quatre principaux lacs et sur la « tourbière » de Jichhu Kota (figure 1).

Figure 1 Localisation des sites étudiés dans la vallée de Jichhu Kota.

Location of studied stations in the Jichhu Kota valley.



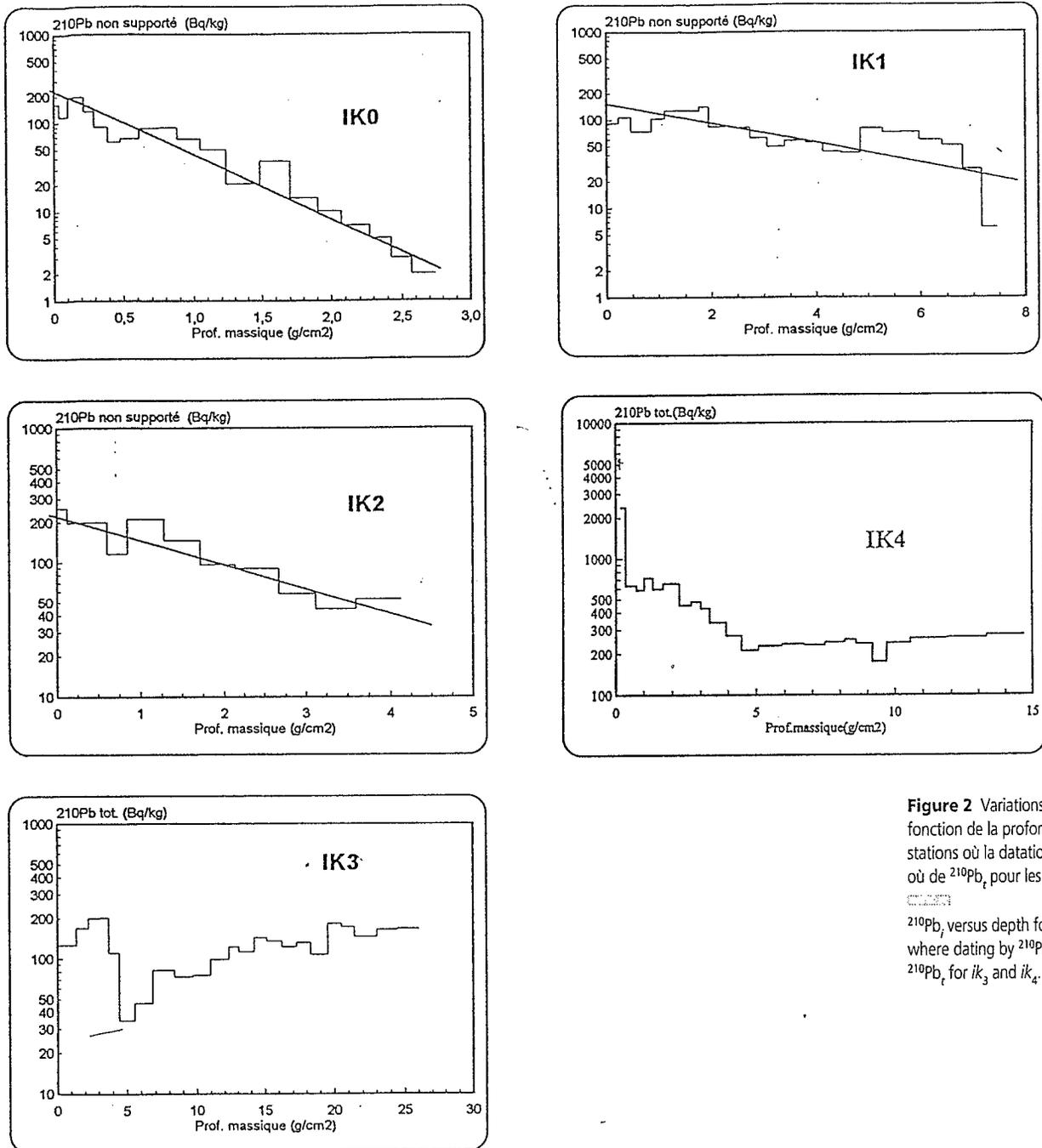


Figure 2 Variations du $^{210}\text{Pb}_f$ en fonction de la profondeur pour les stations où la datation a été possible, où de $^{210}\text{Pb}_f$ pour les stations ik_3 et ik_4 , $^{210}\text{Pb}_f$ versus depth for the stations where dating by ^{210}Pb is possible, or $^{210}\text{Pb}_f$ for ik_3 and ik_4 .

II. PRINCIPE ET MÉTHODES DE MESURE

Les méthodes utilisées sont décrites plus en détail par Pourchet *et al.* (1994). Succinctement, la datation par le ^{210}Pb est basée sur l'existence d'un flux atmosphérique continu

de ^{222}Rn qui, par filiation radioactive donne du ^{210}Pb . Par différents processus, ce plomb-210 dit « non supporté » ($^{210}\text{Pb}_f$) est incorporé aux sédiments où il est fixé définitivement dans la colonne de sédiments et où il décroît avec sa période radioactive de 22,3 ans. Une

Tableau I Valeurs des vitesses de sédimentation pour les différentes carottes étudiées. Ce tableau donne également les flux de ^{210}Pb non supporté ($^{210}\text{Pb}_i$) à l'interface eau-sédiment, et la concentration moyenne en ^{210}Pb supporté ($^{210}\text{Pb}_s$).

Sedimentation rates in studied cores. Also shown are the unsupported ^{210}Pb flux ($^{210}\text{Pb}_i$) and the mean concentration of supported ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_s$).

Sites	Vitesse de sédimentation (mg.cm ⁻² .an ⁻¹)	Flux de ^{210}Pb (Bq.m ⁻² .an ⁻¹)	^{210}Pb supporté (Bq.kg ⁻¹)
ik_0 Jichhu Kota	22	41	9
ik_1 Kara Kota	114	162	112
ik_2 Kotia	75	147	259
ik_3 Jank'o Kota	0	#0	#127
ik_4 Laguna Negra	#0	#0	238

contribution secondaire de plomb-210 dit « supporté » ($^{210}\text{Pb}_s$) est due à la formation, dans la matrice sédimentaire, de ^{210}Pb issu de parents à vie longue qu'elle contient (^{238}U , ^{234}U , ^{234}Th ou ^{226}Ra). A l'échelle du siècle, l'activité du ^{210}Pb de cette dernière contribution peut être considérée comme constante (Robbins, 1978). L'activité utilisable pour les datations est déduite de l'activité totale mesurée ($^{210}\text{Pb}_t$) :

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

On l'estime à partir d'échantillons assez vieux (environ 100 ans) pour que $^{210}\text{Pb}_i$ puisse être considéré comme négligeable :

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

Les carottes de sédiments ont été obtenues à l'aide d'un petit carottier à piston. Elles ont été découpées centimètre par centimètre dès leur sortie de l'eau et conditionnées individuellement dans des flacons polyéthylène étanches, avant d'être séchées à l'étuve à 60°C.

Les vitesses de sédimentation ont été déterminées à partir des profils de $^{210}\text{Pb}_i$ en utilisant le modèle *Constant Rate of Supply* (Goldberg, 1963).

Le ^{210}Pb a été mesuré en spectrométrie alpha par l'intermédiaire du ^{210}Po , suivant la méthode décrite par Hasänen (1977).

Le flux de $^{210}\text{Pb}_i$ à l'interface eau-sédiment (F , Bq.m⁻².an⁻¹) peut se déduire de l'activité totale (A , Bq.m⁻²) du $^{210}\text{Pb}_i$ contenu dans une colonne de sédiments de surface

unitaire, par l'équation : $A = F/\lambda$ où λ est la constante radioactive du ^{210}Pb . Dans notre cas, A représente pour chaque site la somme des activités par unité de surface du $^{210}\text{Pb}_i$ contenu dans chacun des échantillons : $A = \sum A_i$ où A_i est l'activité du $^{210}\text{Pb}_i$ dans la couche i .

Dans tous nos calculs, les épaisseurs réelles de sédiments ont été converties en profondeurs massiques correspondant au poids du sédiment sec déposé par unité de surface jusqu'à l'épaisseur considérée.

III. INTERPRÉTATION DES PROFILS DE SÉDIMENTATION

Trois carottes sur les cinq prélevées présentent des profils de ^{210}Pb non supporté (figure 2) indiquant une sédimentation positive (tableau I) ; les deux autres (ik_3 et ik_4) ne contiennent que du ^{210}Pb supporté, ce qui signifie qu'en ces deux sites, la sédimentation est nulle, voire négative (érosion).

Dans les trois lacs intermédiaires (Kara Kota, Kotia et Jank'o Kota), la sédimentation est très influencée par les nombreux émissaires qui arrivent dans ces lacs et dont les débits varient considérablement dans l'année. Ce phénomène génère une grande hétérogénéité spatiale des vitesses de sédimentation d'un lac à l'autre et, sans doute à l'intérieur même de chacun d'eux. Une confirmation de cette dispersion a été donnée pour le lac Kara Kota où une carotte

(J), voisine de notre site ik_1 a indiqué un âge de 3 150 ans à 150 cm, soit environ $27 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (Servant-Vildary et Roux, 1990). Par contre, l'allure régulière des courbes de $^{210}\text{Pb}_i$ indique qu'aux sites que nous avons étudiés, les vitesses sont restées sensiblement constantes au cours des 100 dernières années.

Aux extrémités de la vallée, la tourbière de Jichhu Kota et la Laguna Negra ont une alimentation sédimentaire beaucoup plus calme. Dans le premier site, le filtre végétal périphérique sert de régulateur ; dans le second, le bassin versant est constitué d'un glacier, dont le lac reçoit l'eau de fusion et, avec elle, les polluants qu'elle contient et qui s'étaient préalablement déposés sur le glacier.

A 4 800 m d'altitude, dans la tourbière de Wila Llojeta, C. Ostria (1987a) a déterminé pour les 1 000 dernières années des âges qui permettent de déduire une vitesse de sédimentation sur 1 000 ans d'environ $6 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$, ce qui est sensiblement plus faible que pour la tourbière de Jichhu Kota.

IV. LES FLUX DE ^{210}Pb

Dans la tourbière de Jichhu Kota, la fraction de ^{210}Pb supporté est bien plus faible que celle que nous avons mesurée dans les autres lacs de la vallée : 9 Bq.kg^{-1} contre 112 Bq.kg^{-1} pour le lac Kara Kota attendant. Cette différence s'explique aisément par la nature même des sédiments : dans le premier cas à dominante organique, et formé des végétaux même de la tourbière, dans le second cas, d'apports détritiques minéraux provenant de l'érosion des bassins versants.

Pour les sites ik_1 , et ik_2 , la valeur élevée du flux de ^{210}Pb non supporté est la conséquence de l'entraînement et du dépôt dans ces lacs d'une partie du ^{210}Pb provenant du bassin versant et fixé sur la matière détritique. Par opposition, la faible teneur observée sur la tourbière de Jichhu Kota indique, pour ce site, la faible influence du bassin versant comparé au flux direct arrivant à la surface du lac par l'atmosphère. Cette tourbière, avec une faible minéralisation de la matrice sédimentaire et une prépondérance des flux atmosphériques directs, apparaît comme un site particulière-

Tableau II Indique, pour la tourbière de Jichhu Kota, l'activité et le dépôt de ^{137}Cs en fonction de la profondeur exprimée en milligrammes de sédiment sec par centimètre carré.

Jichhu Kota peat: the activity and deposition of ^{137}Cs versus depth expressed, in milligrams of dry sediment by square centimetre.

Profondeur massique (mg.cm^{-2})	Activité du ^{137}Cs (Bq.kg^{-1})	Bilan du ^{137}Cs (Bq.m^{-2})
0-388	14,4	55,9
388-744	11,2	39,9
744-1 231	0	0

ment propice à l'étude des flux atmosphériques des polluants. La valeur de $^{210}\text{Pb}_i$ que nous en avons déduite ($41 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) est voisine des mesures directes de flux relevées à des latitudes voisines : $32 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ à Port Hedland (20° lat. Sud), $38 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ à Townville (19° lat. Sud) (Krishnaswami et Lal, 1978).

V. LE BILAN EN ^{137}Cs DE LA TOURBIÈRE DE JICHHU KOTA

La qualité de l'enregistrement en ^{210}Pb observé sur la carotte que nous avons prélevée ainsi que la forte présomption suggérée par les mesures du ^{210}Pb que ce site pourrait fournir de bonnes valeurs de flux atmosphériques pour cette latitude nous ont amené à vérifier cette hypothèse à partir de la mesure de la contamination radioactive introduite, via la stratosphère, par les essais thermonucléaires atmosphériques. La mesure du ^{137}Cs dans les échantillons de la tourbière de Jichhu Kota a été faite par spectrométrie gamma à très bas niveau (Pinglot et Pourchet, 1994). Les résultats obtenus (tableau II) nous indiquent un dépôt total de 96 Bq.m^{-2} au moment de la mesure (1992). Compte tenu de la période radioactive de cet élément ($T = 30,15$ ans), le bilan en ^{137}Cs ramené au moment du dépôt correspond à 196 Bq.m^{-2} . Pour les stations de La Paz et de Chacaltaya, très proches et d'altitudes comparables (respectivement 3 500 et 5 220 m), les mesures en continu du ^{90}Sr , effectuées entre 1960 et 1979 (HASL 329) et qui ont donc couvert pratiquement toute la période des essais thermonucléaires, indiquent un dépôt de 147 Bq.m^{-2} . Compte tenu du rapport $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ de 1,5, bien établi, on en déduit un

dépôt de ^{137}Cs de 220 Bq.m^{-2} , très voisin de ce que nous avons mesuré dans la tourbière. Ces observations confirment donc bien les mesures en ^{210}Pb et indiquent la potentialité d'utiliser cette tourbière pour les reconstitutions des circulations générales des polluants à cette latitude et pour au moins le dernier siècle.

VI. CONCLUSION

Dans le cas de la haute vallée glaciaire de Jichhu Kota, les dépôts sédimentaires de la

tourbière du même nom fournissent, sur au moins 1 siècle, un enregistrement très peu perturbé, avec des flux de radioéléments similaires aux flux atmosphériques relevés dans cette région. L'éloignement de cette tourbière de toute industrie pourrait en faire un site privilégié pour l'étude de la circulation à grande distance des contaminants atmosphériques, comme par exemple le ^{137}Cs issu des essais thermonucléaires atmosphériques ou plus généralement des polluants anthropogéniques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GOLDBERG, E. D., 1963. Radioactive dating. *Geochronology with lead 210*. IAEA, p. 121-131.
- HASÁNEN, E., 1977. Dating of sediments based on ^{210}Pb measurements. *Radiochemical Radioanalytical letters*, 31, (4-5), p. 207-214.
- HASL-329. Final tabulation of monthly ^{90}Sr fallout data: 1954-1976. UC-11, 1977. *US Energy Research and Development administration*, New York 10014.
- KRISHNASWAMI, S. et LAL, D., 1978. Radionuclide Limnology, *Lakes Chemistry, Geology, Physics*. Abraham Lerman, p. 153-177.
- OSTRIA, C., 1987a. Végétation actuelle et fossile de haute altitude (exemple d'une vallée glaciaire : Hichu Kkota, Cordillère Royale des Andes de Bolivie), *Géodynamique*, 2(2), p.109-113.
- OSTRIA, C., 1987b. Phytoécologie et paléoécologie d'une vallée glaciaire alto-andine, Hichu-Kkota (Cordillère Orientale Bolivie), *Bull. Soc. bot. Fr.*, *Lettres bot.*, 134, (4/5), p. 385-397.
- PIERRE, J. F. et WIRRMANN, D., 1986. Diatomées des sédiments holocènes du lac Khara-Kkota (Bolivie), *Géodynamique*, 1(2), p. 135-145.
- PINGLOT, J. F., POURCHET, M., 1994. Spectrométrie gamma à très bas niveau avec anti-Compton NaI (Ti), pour l'étude des glaciers et des sédiments, *Note CEA-N-2756*, ISSN 0429-3460, p. 291-296.
- POURCHET, M., MOURGUIART, P., PINGLOT, J. F., PREISS, N., ARGOLLO, J. et WIRRMANN, D., 1994. Sédimentation récente dans le lac Titicaca (Bolivie). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 319, série II, p. 535-541.
- ROBBINS, J. A., 1978. Dans NRIAGU, éd., *The Biogeochemistry of Lead in the Environment*, p. 285-393.
- SERVANT-VILDARY, S. et ROUX, M., 1990. Variations de température estimées à partir du déplacement en altitude des associations de diatomées dans une séquence holocène de la Cordillère Orientale de Bolivie, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 311, série II, p. 429-436.