

# Changements limnologiques et climatologiques dans le bassin du lac Titicaca (Bolivie), depuis 30 000 ans

## *Limnological and climatological changes in the Lake Titicaca basin (Bolivia) during the last 30 millennia*

Philippe MOURGUIART<sup>1\*</sup>, Jaime ARGOLLO,<sup>2</sup> Thierry CORRÈGE,<sup>3</sup> Louis MARTIN,<sup>4</sup> Maria Eugenia MONTENEGRO,<sup>3</sup> Abdelfettah SIFEDDINE<sup>3</sup> et Denis WIRRMANN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Département de géologie et océanographie, Université de Bordeaux I, ORSTOM-URA CNRS 197, av. des Facultés, F-33405 Talence cedex, France ;

<sup>2</sup> Universidad Mayor de San Andrés, Instituto de Investigaciones Geológicas, CP 12198, La Paz, Bolivie ;

<sup>3</sup> Centre ORSTOM d'Ile-de-France, 32, av. Henri-Varagnat, 93143 Bondy cedex, France ;

<sup>4</sup> Laboratório de Estudos Costeiros, Programa de Pós Graduação em Geologia, ORSTOM, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Bahia, Rua Caelano Moura 123, 40210-340 Salvador, Brésil

### RÉSUMÉ

Une approche multidisciplinaire a permis la reconstruction des fluctuations du lac Titicaca durant le Pléistocène terminal et à l'Holocène. Trois hauts niveaux lacustres (avant 25/28 ka BP, entre 14–10,5 ka BP et après 0,4 ka BP) et deux baisses importantes (25/28–14 ka BP and 10,5–0,4 ka BP) sont les caractéristiques hydrologiques principales de l'évolution du lac Titicaca.

**Mots clés :** Paléolimnologie, Paléoclimatologie, Lac Titicaca, Quaternaire terminal

### ABSTRACT

*A multidisciplinary approach has allowed the reconstruction of Late Pleistocene and Holocene lake fluctuations in the Lake Titicaca basin. Three high lake levels (prior to 25/28 kyr BP, between 14 and 10.5 kyr BP and from 0.4 kyr BP) and two severe droughts (25/28 and 14 kyr BP and 10.5 and 0.4 kyr BP) are the main paleohydrological characteristics of the Lake Titicaca evolution.*

**Keywords:** Paleolimnology, Paleoclimatology, Lake Titicaca, Late Quaternary

Abridged version (see p. 145)

## I. Introduction

Le Dernier Maximum Glaciaire et l'Interglaciaire actuel comptent, sans nul doute, parmi les périodes les plus étudiées et les mieux connues de l'histoire de notre planète (voir par exemple Wright et al., 1993). En revanche, en Amérique du Sud, pour les Andes tropicales, très peu de données sont disponibles sur cette tranche de temps (Markgraf, 1989).

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : B\*11782 Ex : 1

Pour la région sud-équatoriale, une période d'enregistrement supérieure à 20 000 ans BP n'est documentée que par cinq sites. Il s'agit du sondage de Junín au Pérou (Hansen et al., 1984 ; figure 1), en Bolivie, des carottes TD1 et TB2 du lac Titicaca (Wirrmann et al., 1992 ; figure 1) et celles de La Siberia (Sifeddine et al., 1996 ; figure 1), et au Brésil en Amazonie orientale, des carottes de Carajás (Sifeddine et al., 1994 a et b). Dans cette note, à la faveur de données

Note présentée par Georges Pédro

Note remise le 27 janvier 1997, acceptée après révision le 7 avril 1997

\* E-mail : mourguiart@geocean.u-bordeaux.fr

Fonds Documentaire ORSTOM



010011782

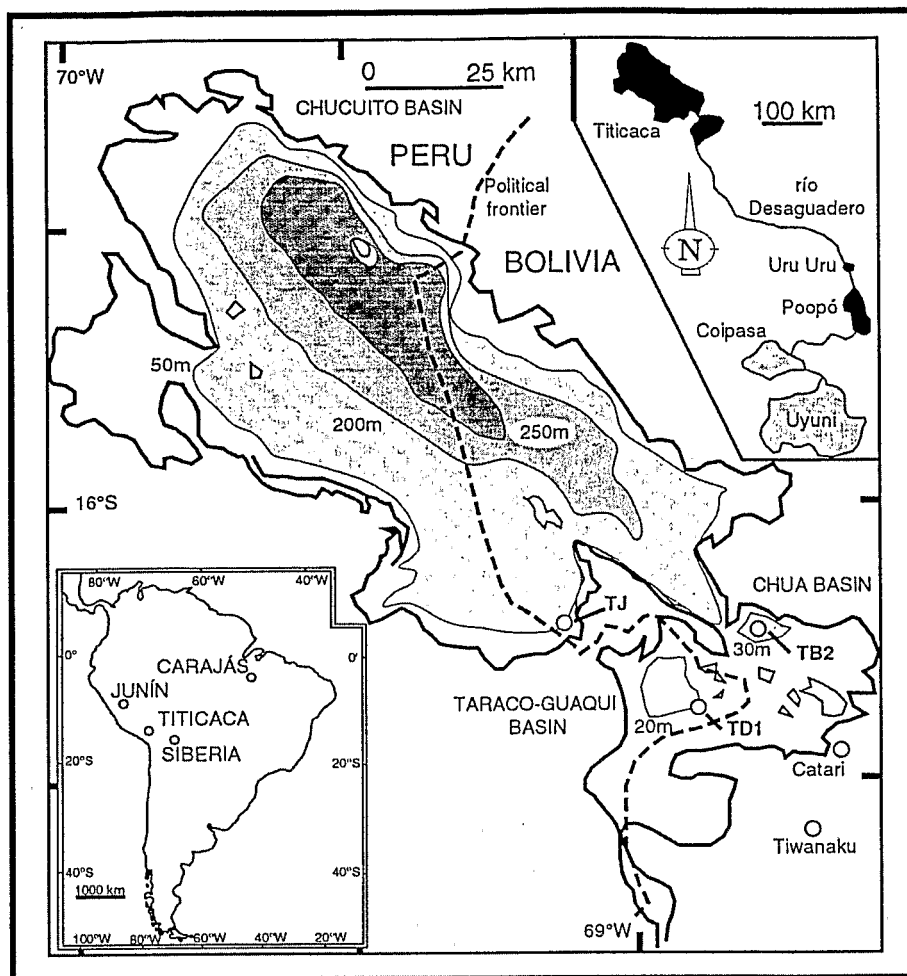


Figure 1. Bathymétrie simplifiée du lac Titicaca mettant en évidence les trois principaux bassins lacustres. Localisation des sites, carottes et affleurements étudiés.

Bathymetric map of Lake Titicaca showing the three main lacustrine basins. Location of places, coring sites and outcrops mentioned in the text.

récemment exploitées, nous nous proposons de faire le point sur les informations paléohydrologiques et paléoclimatiques obtenues dans la région du lac Titicaca depuis environ 30 000 ans BP. Une discussion sera finalement proposée en comparant nos données avec celles obtenues dans la région de Junín et en Amazonie brésilienne.

## II. Cadre général

L'Altiplano est situé au cœur des Andes centrales (66-71° de longitude ouest ; 14-22° de latitude sud), à une altitude comprise entre 3 650 et 3 900 m. Trois immenses bassins lacustres occupent cette dépression (figure 1) : le lac Titicaca au nord (8 563 km<sup>2</sup>), celui du lac Poopó au centre (2 530 km<sup>2</sup>) et plus au sud, ceux des « salars » de Coipasa et de Uyuni (11 000 km<sup>2</sup>). Le lac Titicaca est un lac profond (max. 285 m) d'eaux douces ; le lac Poopó est très peu profond et de type méso- à polyhalin (il s'est asséché en 1995) ; les salars de Coipasa et de Uyuni sont des lacs saisonniers hyperhalins. Cette répartition latitudinale est le reflet du gradient pluviométrique qui existe entre le nord et

le sud de la zone. Les précipitations moyennes annuelles passent de plus de 800 mm autour du lac Titicaca à moins de 200 mm à l'extrémité sud du bassin. L'évaporation moyenne sur l'ensemble de la zone est estimée à plus de 1 500 mm an<sup>-1</sup> (Roche et al., 1992). Ce gradient climatique est la conséquence du déplacement en latitude de l'équateur météorologique qui atteint les Andes centrales durant l'été austral, entre les mois de novembre et avril.

Dans le passé, ces milieux ont connu des variations climatiques très importantes. Géologues et géomorphologues (voir en particulier Clapperton, 1993 et les références contenues dans cet ouvrage) se sont intéressés depuis longtemps aux manifestations évidentes des fluctuations importantes de l'environnement (paléolignes de rivages, encroûtements algaires, moraines, ...). Servant et Fontes (1978) ont proposé un schéma d'évolution des variations des niveaux lacustres en fonction de leur âge supposé, du plus ancien au plus récent : les paléolacs de l'Altiplano auraient connu des extensions de plus en plus réduites. Des données récentes (Bills et al., 1994) indiquent que le dernier grand épisode lacustre (phase Tauca *sensu* Servant

et Fontes, 1978) daté aux alentours de 13 800 ans BP serait en réalité l'un des plus importants. Nous apportons, dans cette note, des éléments nouveaux concernant les deux derniers épisodes humides (phases Minchín et Tauca) dans le bassin du lac Titicaca.

### III. Méthodes

Les données utilisées pour appuyer la reconstruction de l'évolution paléohydrologique du lac Titicaca ont été obtenues au moyen d'analyses multidisciplinaires et sur des outils variés.

Une série de carottes a été prélevée à l'aide d'un carottier Mackereth (Wirrmann, 1987). La carotte TD1 (figure 1) a, en particulier, atteint le Pleistocène supérieur (environ 25 000 ans BP). La sédimentologie, la palynologie et l'étude des ostracodes ont fourni le support interprétatif. Cet enregistrement nous servira de référence. Pour les autres carottes, seules des analyses sédimentologiques et micropaléontologiques (ostracodes) ont été obtenues en complément de 33 âges  $^{14}\text{C}$  qui permettent de préciser la chronologie des changements hydrologiques observés. De façon schématique, les différents faciès sédimentaires se répartissent en fonction de la profondeur d'eau (Boulangé et al., 1981 ; Rodrigo et Wirrmann, 1992). Il en est de même des pollens, spores et ostracodes. Cette zonation est résumée sur la figure 2. Pour un complément d'information, on peut se référer à une série d'articles publiés dans chaque spécialité : en sédimentologie (Wirrmann, 1988 ; Wirrmann et Oliveira Almeida, 1987 ; Wirrmann et al., 1992 ; Wirrmann et Mourguiart, 1995) ; en palynologie (Ybert, 1988, 1992), en ostracodologie (Mourguiart et Roux, 1990 ; Mourguiart et al., 1992 ; Mourguiart et Carbonel, 1994 ; Mourguiart et al., 1995a ; Wirrmann et Mourguiart, 1995).

Sur le pourtour du lac, de petites terrasses étagées, témoins d'anciens niveaux lacustres élevés, sont encore visibles. Deux de ces affleurements (Catari et Tiwanaku) situés au S-SE du lac Huiñaimarca (figure 1) ont été datés par la méthode du radiocarbone.

Pour compléter l'information déduite des registres sédimentaires, il a été fait appel à des données historiques.

### IV. Résultats

Les résultats obtenus à partir de l'analyse des pollens/spores et des ostracodes de la carotte TD1 sont présentés sous forme synthétique et mis en parallèle avec une lithologie simplifiée (figure 3). Il est à noter que seuls les 155 cm supérieurs contiennent des ostracodes. La répartition des algues au long de la carotte (Ybert, 1988, 1992) met en évidence trois phases de hauts niveaux lacustres : avant 21 000 ans BP, autour de 13 180 ans BP, et après 4 165 ans BP. Pour la plus ancienne, le moindre pourcentage d'algues comme *Botryococcus* et celui plus élevé de plantes de milieux humides (Cyperaceae, Junaceae et *Fungi*) indiquent qu'il s'agit d'une phase lacustre

d'amplitude inférieure à celle des deux suivantes. Cette phase est corrélée à la fin de l'épisode Minchín (Mourguiart et al., 1995b). Les deux événements lacustres les plus récents correspondent à la phase Tauca et à la situation actuelle. Concernant l'événement Minchín, des informations complémentaires et inédites ont été obtenues à partir des niveaux datés de la zone de Tiwanaku et de Catari (figure 1). Ces petites terrasses lacustres se situent à une altitude approximative de 3 860 m, soit 51 m au-dessus du niveau actuel du lac Titicaca. Les niveaux datés sont carbonatés ; ils renferment des coquilles de mollusques et d'ostracodes et de très nombreux débris de Characeae. Les datations  $^{14}\text{C}$  ont été effectuées sur des coquilles de mollusques au laboratoire de géochimie isotopique de Bondy (ORSTOM). Trois âges ont été obtenus : deux sur deux espèces différentes de gastéropodes de l'échantillon de la terrasse Catari : 28 230  $\pm$  100 ans BP (OBDY 1459 sur *Littoridina* sp.) et 24 040  $\pm$  100 (OBDY 1475 sur *Taphius* sp.) et un sur la terrasse Tiwanaku : 30 510  $\pm$  80 ans BP (OBDY 943 sur *Littoridina* sp.). Malgré l'absence de données relatives à un possible effet réservoir et bien que l'affleurement Catari soit, par sa situation, susceptible d'être drainé par des eaux d'infiltration, nous considérons ces âges comme valides, car ils sont cohérents avec ceux obtenus pour d'autres sites de l'Altiplano (Servant et Fontes, 1984).

L'Holocène est connu avec davantage de précision. Un très bas niveau lacustre est souligné par la présence d'un dépôt de gypse (figure 3). De plus, une fonction de transfert ostracodes/bathymétrie a permis de reconstruire précisément les variations des différents plans d'eau (Mourguiart et al., 1995a et b). L'époque subactuelle (le dernier millénaire) n'a pu être conservée lors des campagnes de carottages (Mourguiart et al., 1992). Cependant, des informations faisant référence à un haut niveau du lac Titicaca aux XVI-XVII<sup>e</sup> siècles, ont pu être obtenues grâce à l'étude de documents historiques (Ramón Gavilan, 1976, cité par Wirrmann, 1988).

Les informations paléobathymétriques déduites des différentes méthodologies utilisées sont reportées en fonction des âges mesurés et de ceux interpolés pour les niveaux intermédiaires (figure 4).

### V. Discussion

Notre reconstruction de la paléohydrologie du lac Titicaca depuis environ 30 000 ans BP (figure 4) met en évidence trois phases hydrologiques à bilan excédentaire majeures : la phase Minchín connue depuis longtemps dans l'Altiplano central et sud (région des lacs Poopó, Coipasa et Uyuni ; Steinmann et al., 1904), dont l'âge estimé par Servant et Fontes (1978) serait antérieur à 26–27 000 ans BP ; la phase Tauca, connue également dans les bassins sud, a été identifiée et datée par Servant et Fontes (1978) ; la période actuelle présentant un niveau maximum aux XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles (Wirrmann, 1988) corrélé au paroxysme de la période humide du Petit Age de la Glace (Thompson et al., 1986). En ce qui concerne la phase Minchín, nous

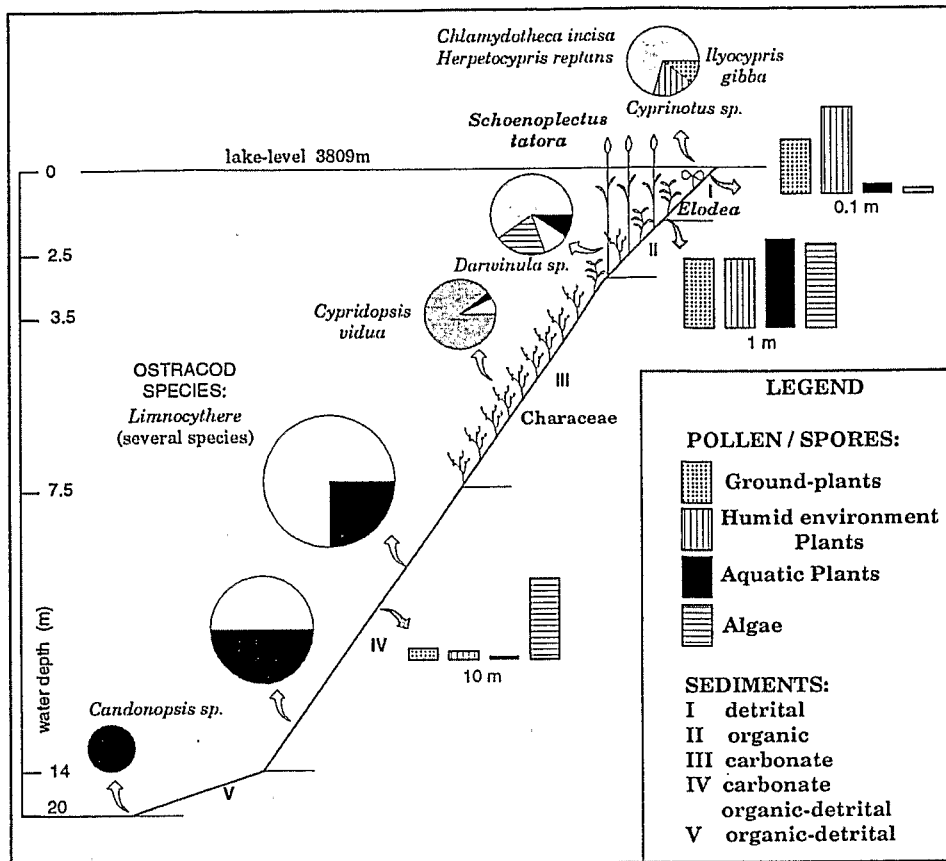


Figure 2. Répartition bathymétrique schématisée des macrophytes, des ostracodes, des sédiments, ainsi que des pollens, dans le lac Titicaca.

Scheme of Lake Titicaca environments versus water depth showing distribution of macrophytes, ostracodes, sediments and pollen.

apportons pour la première fois des informations relatives au bassin du lac Titicaca. Son extension (minimum 3 860 m ; figure 4) a amplement dépassé les hypothèses émises par Servant et Fontes (1978), qui plaçaient le niveau maximum autour de 3 825 m. Pour la phase Tauca, ces derniers auteurs attribuaient à cet événement une terrasse lacustre située à 3 815 m d'altitude (environ 6 m au-dessus du niveau du lac actuel), bien que ce rattachement ne repose sur aucun argument stratigraphique, ni sur aucune datation. La palynologie ne permettant pas de préciser l'altitude du plan d'eau à ce moment-là (Mourguiart et al., 1995b), nous ne pouvons apporter plus de précisions quant au niveau maximum atteint par le lac Titicaca durant l'épisode Tauca. Il est cependant permis de supposer que le lac a atteint un niveau au moins équivalent à l'actuel, car les vitesses de sédimentation sont excessivement faibles autour de 13 180 ans BP. C'est là une des caractéristiques de la sédimentation en zones profondes (Pourchet et al., 1994). Entre ces phases lacustres majeures, le lac Titicaca a connu de longues phases de sécheresse avec des niveaux d'eau parfois très inférieurs à l'actuel, en particulier autour de 8 000 ans BP (dépôt de gypse ; figures 3 et 4). En résumé, notre reconstitution de la paléohydrologie du lac Titicaca depuis environ 30 000 ans BP suggère une évolution complexe et, par conséquent, des situations paléoclimatiques variées.

Parmi les autres sites sud-américains qui fournissent un enregistrement sédimentaire des 30 000 dernières années (voir *supra*), ce sont ceux de la laguna Junín au Pérou (11°3'S, 76°7'W, 4 100 m d'altitude) et de Carajás au Brésil (6°S, 51°W, 800 m d'altitude), datés avec suffisamment de précision qui permettront une comparaison avec nos données en provenance du lac Titicaca.

L'interprétation effectuée à partir des données palynologiques de la laguna Junín (Hansen et al., 1984 ; figure 5) ne fournit que peu de renseignements d'ordre paléoclimatique. Pour la même période de temps, les informations en provenance du lac Titicaca sont beaucoup plus complètes. A cela, il y a une explication possible. Le site Junín se situe nettement à l'intérieur de la zone balayée saisonnièrement par la « mousson » alors que le lac Titicaca se trouve à la limite de son extension méridionale (Taborga et Campos, 1995). Une variation latitudinale de la position de l'équateur météorologique en été austral entraînera des changements importants au niveau des bilans du lac Titicaca : un glissement vers le sud entraînera un renforcement de la saison des pluies, alors qu'à un déplacement septentrional sera associée une sécheresse sur l'Altiplano. Toutefois, si ce déplacement reste modéré, il n'entraînera que peu ou pas de variations au niveau de la région de la laguna Junín et l'on peut alors supposer que la végétation locale n'enregistrera pas ces variations mineures.

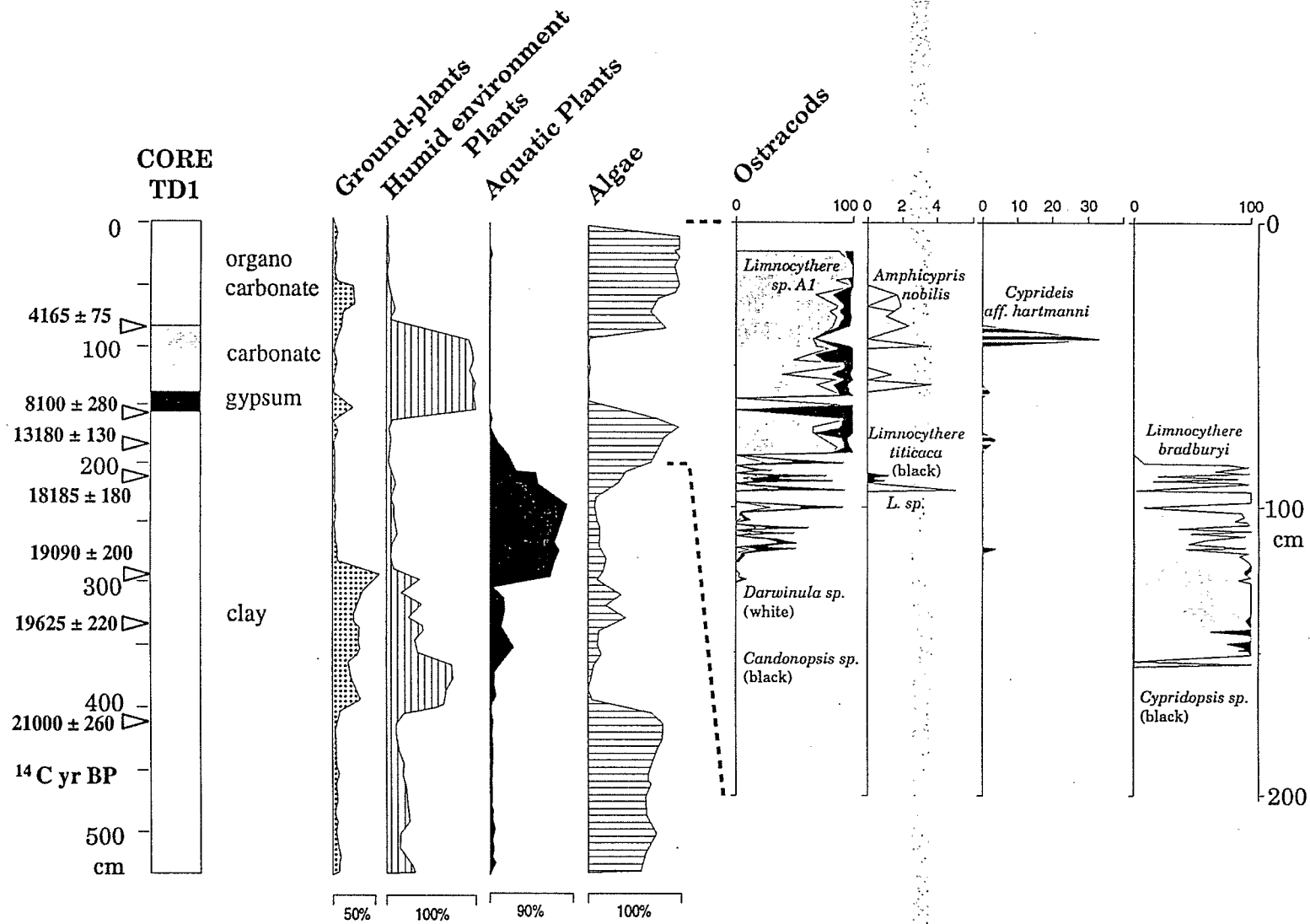


Figure 3. Spectre sporo-pollinique simplifié, lithologie sommaire et répartition des ostracodes de la carotte TD1 (adapté de Ybert, 1992 et de Wirrmann et Mourguiart, 1995).

139-146

Lithology, pollen/spores and ostracode chronology for core TD1 (after Ybert, 1992 and Wirrmann and Mourguiart, 1995).

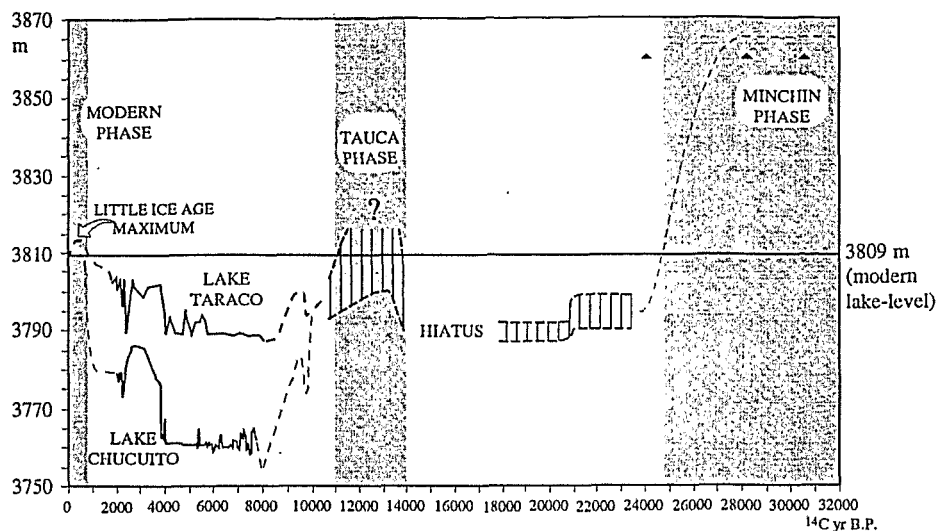


Figure 4. Évolution paléobathymétrique du lac Titicaca depuis environ 30 000 ans BP. Cette reconstruction est établie à partir de sources diverses : les triangles représentent les niveaux des terrasses datés ; les parties hachurées correspondent aux données issues de l'analyse pollinique ; les traits pleins sont issus de la fonction de transfert ostracodes/hauteur d'eau (carottes TD1 et TJ pour les lacs Taraco-Guaqui et Chucuito respectivement ; l'erreur moyenne relative est comprise entre 0,81 et 2 m approximativement) ; les pointillés correspondent à des informations ponctuelles historiques ou déduites de certains enregistrements. Sont soulignées en grisé les trois principales phases hydrologiques excédentaires identifiées.

Lake Titicaca level fluctuations during the last 30 000 years compiled from references discussed in the text. Triangles represent dated samples from lacustrine terraces; vertical lines represent results from the pollen analysis; the full line represents results from the transfer function on ostracods (cores TD1 and TJ) from lakes Taraco-Guaqui and Chucuito, respectively; standard error of 0.81 and 2 m approximately; the intermittent line represents historical data. High lake-levels are highlighted with shaded bands.

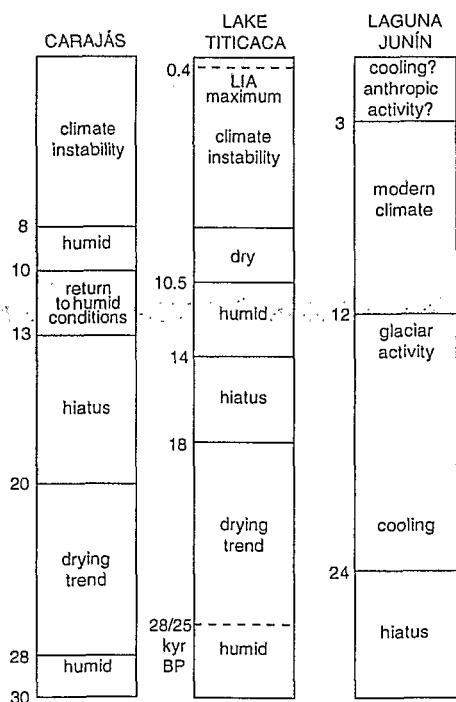


Figure 5. Comparaison entre les données paléoclimatologiques de Carajás (d'après Sifeddine et al., 1994 a et b), du lac Titicaca (cette étude) et de la laguna Junín (d'après Hansen et al., 1984).

Chart showing correlation between the paleoclimatological reconstructions at Carajás (after Sifeddine et al., 1994a, b), Lake Titicaca (this study) and Laguna Junín (after Hansen et al., 1984).

En revanche, notre enregistrement présente de grandes similitudes avec celui de Carajás, situé en Amazonie orientale brésilienne (Sifeddine et al., 1994 a et b ; figure 5). Cela n'est pas surprenant, étant donné que les précipitations enregistrées sur l'Altiplano ont toujours une origine amazonienne (Aravena et al., 1989 ; Grootes, 1993).

A l'exception de problèmes d'âges aux limites et de la période 10,5-8 ka BP, l'analogie entre les données de Carajás et celles du lac Titicaca est notable. L'intervalle 10,5-8 ka BP est en moyenne apparemment sec dans la région du lac Titicaca, alors que la forêt amazonienne connaît son plein développement. Une discussion sur les mécanismes permettant d'expliquer cette divergence est donnée dans un autre article (Martin et al., 1997).

## VI. Conclusion

Une approche multidisciplinaire a permis de reconstruire la paléohydrologie du lac Titicaca depuis environ 30 000 ans BP. Cette histoire apparaît comme étant complexe, marquée par trois phases majeures à bilan positif (avant 28/25 ka BP, entre 14 et 10,5 ka BP et, enfin, la période actuelle post-XV<sup>e</sup> siècle) et des périodes déficitaires : la première débutant durant le Dernier Maximum Glaciaire pour s'achever vers 14 ka BP, la seconde englobant la quasi-totalité de l'Holocène et culminant autour de 8 ka BP. Dans un futur proche, la chronologie de ces événements devra être précisée. Pour cela, il conviendra d'étudier plus en détail les différentes terrasses lacustres qui surplombent le lac Titicaca actuel. La comparaison avec

d'autres sites (laguna Junín dans les Andes péruviennes et Carajás en Amazonie brésilienne) a permis de mettre en évidence l'intérêt de disposer de sites situés en zones sensibles d'un point de vue climatique. L'étude du site de

la Siberia situé sur le versant est de la cordillère orientale devrait également nous permettre de mieux comprendre la paléoclimatologie de cette zone.

## ABRIDGED VERSION

During the past 30 years, considerable attention has been given to the Last Glacial Maximum (around 18 000 yr BP) climatic history (Wright et al., 1993). However, there is little information on the South American tropical belt, south of the equator (Markgraf, 1989). In this area, Lake Titicaca is without doubt one of the most interesting sites to study.

Lake Titicaca is a large lake located at a latitude of 16°S in the northern part of a mountainous region called the Altiplano (figure 1). The area shows a pronounced gradient of precipitation due to the decreasing influence of the South American "monsoon" from northeast to southwest (Roche et al., 1992; Tabořga and Campos, 1995). The amount of rainfall varies from north (Lake Titicaca basin, figure 1) to south (Salar of Uyuni basin, figure 1) between 800 and 200 mm yr<sup>-1</sup>. Most of the precipitations occur during the rainy season (November–April).

Previous studies identified several former periods when lake levels were higher than today, as a consequence of paleoclimatic variations (see Clapperton, 1993 and references therein). For the last 30 000 years, two high-level phases were recognized in the central and southern parts of the Bolivian Altiplano by Servant and Fontes (1978): the Minchín phase prior to 26–27 kyr BP and the Tauca phase between 13 and 10.5 kyr BP. Here, we report the main results of a multidisciplinary study (sedimentology, palynology, <sup>14</sup>C chronology and ostracods) of Late Quaternary sediments from Lake Titicaca.

In modern Lake Titicaca sediments (figure 2), the distribution of pollen/spores and ostracods is closely related to water depth and/or factors associated with water depth, such as macrophyte cover, substrate or energy level (Boulangé et al., 1981; Mourguiart and Roux, 1990; Rodrigo and Wirmann, 1992; Wirmann, 1987, 1988; Wirmann et al., 1992; Wirmann and Oliveira Almeida, 1987; Ybert, 198, 1992). Models based on micropaleontological content of core sediments were developed to infer lake-level variations. In particular, multivariate statistical techniques can help correlate the modern ostracod distribution to water depth, and were used to derive transfer functions for quantitative reconstructions of water level from fossil remains (Mourguiart et al., 1992, 1995a; Mourguiart and Carbonel, 1994; Wirmann and Mourguiart, 1995). For core TD1, results are shown in figure 3. Three algal blooms are indicated: before 21 000 yr BP, around 13 180 yr BP and during the last millennia. Furthermore, former littoral sediments docu-

ment rises in the level of Lake Titicaca during the Late Pleistocene. We have dated these shoreline features at two points on the flanks of Lake Titicaca (figure 1). The <sup>14</sup>C dates obtained are: 28 230 ± 100 yr BP (OBDY 1459 on gastropod *Littoridina* sp.) and 24 040 ± 100 yr BP (OBDY 1475 on gastropod *Taphius* sp.) in the Catari area; 30 510 ± 80 yr BP (OBDY 943 on *Littoridina* sp.) in the Tiwanaku area. These dates permit correlation on a regional basis with the Minchín event previously described in the south (Steinmann et al., 1904; Servant and Fontes, 1978, 1984). For the second period of high lake level, the absolute water level is uncertain (Mourguiart et al., 1995b). Very low sedimentation rates argue for lake levels equivalent to or higher than the present one (Pourchet et al., 1994). In the south, new data (Bills et al., 1994) suggest that Lake Tauca has reached very high altitudes at ca. 13 800 yr BP. For the last 500 years, our data were completed by historical records of high Lake Titicaca levels (Wirmann, 1988, from original information in Ramon Gavilan, 1976).

The chronology of Late Pleistocene and Holocene lake fluctuations in the Lake Titicaca basin is summarized in figure 4. The general results demonstrate a high hydrology variability for the last 30 kyr BP. Three high-stands are recognized: before 28/25 kyr BP (Minchín phase), between 14 and 10.5 kyr BP (Tauca phase) and the modern level, which has culminated during the Little Ice Age (Thompson et al., 1986; Wirmann, 1988). Severe droughts are recorded between 28/25 and 14 kyr BP and between 10.5 and 0.4 kyr BP.

Our results correlate better (except for the period 10.5–8 kyr BP, Martin et al., 1997) with data obtained in a small lake situated in the Amazon region (Serra dos Carajás, 6°S; Sifeddine et al., 1994a, b; figure 5) than with those recorded from Laguna Junín (Peruvian Andes 11°S; Hansen et al., 1984; figure 5). This results from the fact that the Lake Titicaca area and the entire Altiplano receive moisture from a single oceanic (Atlantic) source, via the Amazon Basin (Aravena et al., 1984; Grootes, 1993). Lake Titicaca is surely more sensitive than the Laguna Junín area because the former lies on the present southern limit of the South American monsoon influence. Further studies on other core sites (e.g. La Siberia, eastern Cordillera, Sifeddine et al., 1996) and a good chronology of the residual lacustrine beds that crop out along the Lake Titicaca periphery are still necessary to understand better the paleoclimatological evolution in the region.

**Remerciements :** Ces résultats ont été obtenus dans le cadre du programme AIMPACT (ORSTOM-UR 12), grâce à une convention entre l'ORSTOM et l'Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. Nous remercions Pierre Carbonel pour ses remarques constructives.

## RÉFÉRENCES

- Aravena R., Peña H., Grilli A., Suzuki O. et Mordeckal M. 1989. Evolución isotópica de las lluvias y origen de las masas de aire en el Altiplano chileno, *IAEA-TECDOC-502*, 129-142
- Bills B.G., de Silva S.L., Currey D.R., Emerger R.S., Lillquist K.D., Donnellan A. et Worden B. 1994. Hydro-isostatic deflection and tectonic tilting in the central Andes: Initial results of a GPS survey of Lake Minchin shorelines, *Geophys. Res. Lett.*, 21 (4), 293-296
- Boulangé B., Vargas C. et Rodrigo L.A. 1981. La sédimentation actuelle dans le lac Titicaca., *Rev. Hydrobiol. Trop.*, 14 (4), 299-309
- Clapperton C.M. 1993. *The Quaternary geology and geomorphology of South America*, Elsevier, Amsterdam, 779 p.
- Grootes P.M. 1993. Interpreting continental oxygen isotope records, In: Swart P.K., Lohmann K.C., McKenzie J. et Savin S. (eds), *Climate change in continental isotopic records*, Geophys. Monogr. 78, 37-46
- Hansen B.C.S., Wright H.E. Jr. et Bradbury J.P. 1984. Pollen studies in the Junin area, central Peruvian Andes, *Bull. Geol. Soc. Am.*, 95, 1454-1465
- Markgraf V. 1989. Paleoclimates in Central and South America since 18,000 BP based on pollen and lake-level records, *Quat. Sci. Rev.*, 8, 1-24
- Martin L., Bertaux J., Corrège T., Ledru M.-P., Mourguiart P., Sifeddine A., Soubiès F., Wirrmann D., Sugulo K. et Turcq B., 1997. Astronomical forcing of contrasting rainfall changes in tropical South America between 12,400 and 8800 cal yr B.P., *Quat. Res.*, 47, 117-122
- Mourguiart P., Argollo J. et Wirrmann D. 1995a. Evolución paleohidrológica de la cuenca del lago Titicaca durante el Holoceno, *Bull. Inst. Fr. Etudes Andines*, 24 (3), 573-583
- Mourguiart P., Argollo J. et Wirrmann D. 1995b. Evolución del lago Titicaca desde 25 000 años BP, In: *Climas cuaternarios en América del Sur*, Argollo J. et Mourguiart Ph. (eds), La Paz, Bolivia, 157-171
- Mourguiart Ph. et Carbonel P. 1994. A quantitative method of palaeolake-level reconstructions using ostracod assemblages: an example from the Bolivian Altiplano, *Hydrobiologia*, 288, 183-193
- Mourguiart P. et Roux M. 1990. Une approche nouvelle du problème posé par les reconstructions des paléoniveaux lacustres : utilisation d'une fonction de transfert basée sur les faunes d'ostracodes, *Géodynamique*, 5 (2), 151-165
- Mourguiart P., 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, série II*, 315, 875-880
- 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, série IIa*, 319, 535-541
- Roche M.A., Fernandez Jauregui C., Aliaga Rivera A., Peña Mendez J., Salas Rada E. et Montaña Vargas J. 1992. Balance hídrico superficial de Bolivia, *Publ. ORSTOM/UNESCO-ORCYT*, 29 p.
- Rodrigo L.A. et Wirrmann D. 1992. General aspects of present day sedimentation, In: Dejoux C. et Iltis A. (eds), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge*, Monogr. Biol., 68, Kluwer Academic Publ., Dordrecht, 23-28
- Servant M. et Fontes J.-C. 1978. Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes ; premières interprétations paléoclimatiques, *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, 10 (1), 9-23
- Servant M. et Fontes J.-C. 1984. Les basses terrasses fluviales du Quaternaire récent des Andes boliviennes. Interprétation paléoclimatique, *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, 14 (1), 15-28
- Sifeddine A., Bertaux J., Martin L., Mourguiart P., Disnar J.-R., Laggoun-Défarge F., Lalliers-Vergés E. et Courty M.-A. 1996. Premiers résultats de l'étude de la sédimentation lacustre d'un site de forêt d'altitude des Andes centrales. Implications paléoclimatiques, *XVI<sup>e</sup> Réunion des Sciences de la Terre*, Orléans, 10-12 avril 1996, p. 15
- Sifeddine A., Bertrand P., Fournier M., Martin L., Servant M., Soubiès F., Sugulo K. et Turcq B., 1994a. La sédimentation organique lacustre en milieu tropical humide (Carajás, Amazonie orientale, Brésil) : relation avec les changements climatiques au cours des 60 000 dernières années, *Bull. Soc. géol. France*, 165 (6), 613-621
- Sifeddine A., Fröhlich F., Fournier M., Martin L., Servant M., Soubiès F., Turcq B., Sugulo K. et Volkmer-Ribeiro C. 1994b. La sédimentation lacustre indicateur de changements des paléoenvironnements au cours des 30 000 dernières années (Carajás, Amazonie, Brésil), *C. R. Acad. Sci. Paris, série II*, 1645-1652
- Steinmann G., Hok H. et Bistram A. 1904. Zür Geologie des suedöstlichen Bolivien. *Zbl. Min.*, 5, 1-4
- Taborga J. et Campos J. 1995. Recursos hídricos en los Andes : Lago Titicaca, *Bull. Inst. Fr. Etudes Andines*, 24 (3), 441-448
- Thompson L.G., Mosley-Thompson E.P., Dansgaard W. et Grootes P.M. 1986. The « Little Ice Age » as recorded in the stratigraphy of the Quelccaya Ice Cap, Peru, *Science*, 234, 361-364
- Wirrmann D. 1987. El lago Titicaca : sedimentología y paleohidrología durante el Holoceno (10 000 años BP - Actual), *Informe UMSA-ORSTOM*, La Paz, 6, 61 p.
- Wirrmann D. 1988. Paleohidrología del lago Titicaca durante el Holoceno, *Memoria de la Sociedad de Ciencias Naturales La Salle*, XLVIII, Supl. 2, 57-67
- Wirrmann D. et Mourguiart P. 1995. Late Quaternary spatio-temporal limnological variations in the Altiplano of Bolivia and Peru, *Quat. Res.*, 43, 344-354
- Wirrmann D. et de Oliveira Almeida L.F. 1987. Low Holocene level (7700 to 3650 years ago) of Lake Titicaca (Bolivia), *Palaeogeog. Palaeoclim. Palaeoecol.*, 59, 315-323
- Wirrmann D., Ybert J.-P. et Mourguiart P. 1992. A 20 000 years paleohydrological record from Lake Titicaca, In: Dejoux, C. et Iltis, A. (eds), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge*, Monogr. Biol., 68, Kluwer Academic Publ., Dordrecht, 40-48
- Wright H.E. Jr., Kutzbach J.E., Webb III T., Ruddiman W.F., Street-Perrott F.A. et Bartlein P.J. Eds, 1993. *Global Climates since the Last Glacial Maximum*, University of Minnesota Press, Minneapolis, London, 569 p.
- Ybert J.-P. 1988. Apports de la palynologie à la connaissance de l'histoire du lac Titicaca (Bolivie-Pérou) au cours du Quaternaire récent, *Inst. fr. Pondichery, Trav. sec. sci. techn.*, 25, 139-150
- Ybert J.-P. 1992. Ancient lake environments as deduced from pollen analysis, In: Dejoux C. et Iltis A. Eds, *Lake Titicaca. A Synthesis of Limnological Knowledge*, Monogr. Biol., 66, Kluwer Academic Publ., Dordrecht, 49-60