

## Reconstruction quantitative des niveaux du petit lac Titicaca au cours de l'Holocène

Philippe MOURGUIART, Denis WIRRMANN, Marc FOURNIER et Michel SERVANT

**Résumé** – L'utilisation d'une fonction de transfert ostracodes/bathymétrie a permis, à partir des résultats de 2 sondages, de reconstruire l'histoire du lac Titicaca. Entre environ 7 700 et 3 900 ans B.P., le lac Huiñaimarca, asséché auparavant, est réduit à un écosystème d'extension et de profondeur très faibles. Trois changements hydrologiques abrupts (ca. 3 900, 2 400 et 1 500 ans B.P.) sont identifiés par la suite.

### Quantitative reconstruction of Lake Titicaca levels during the Holocene

**Abstract** – A transfer function was used to estimate past waterdepth of Lake Titicaca during the Holocene. The results obtained on 2 cores reveal a complex evolution: drastic dryness before 7,700 yr B.P., very low lake-levels (18-20 m below the modern one) between ca. 7,700 and 3,900 yr B.P. and three rapid changes in the Evaporation/Precipitation balance around 3,900, 2,400 and 1,500 yr B.P.

**Abridged English Version** – Variations in the volume of a lake can be considered to represent the response of a basin's hydrologic system to climate change [1]. Fluctuations in closed basins, which are particularly sensitive to changes in the Evaporation/Precipitation balance, have provided qualitative or semi-quantitative records of variations in regional water-budget [2]. The quantitative approach developed in this paper consists in applying the transfer function method to lake-level variations. The study site chosen for the application of the method is Lake Titicaca which can be considered as an endorheic system during the middle Holocene period (7,700-3,650 yr B.P. [3]).

Lake Titicaca which covers an 8,500 km<sup>2</sup> area, is located in the heart of Andes highlands. These high plateaus are the result of an endorheic collapse of Quaternary basins on which are presently found the lakes Titicaca and Poopó connected by the Desaguadero river, excepted during dry periods (e.g. 1970 to 1972 [6]). The main Lake Titicaca is divided in two parts: the northern lake called Chucuito and the southern called Huiñaimarca (Fig. 1). The Lake Titicaca levels are highly fluctuating from year to year: 3,804.3 m in 1943 and 3,810.65 m in 1986, with a mean lake-level at 3,808 m above sea level during the last 80 years ([4] and unpublished data from Servicio Nacional de Meteorología de Bolivia).

Surface sediment ostracods from several lakes in the Altiplano basin were studied to examine the relationship with lake-level. The relative abundance of ostracod species of the 115 modern samples was found to be closely related to water depth. Therefore a transfer function was developed to infer lake-levels using multiple linear regressions on water depth preference categories ([9] to [11]). Among the model examined here, the correlation coefficient is  $r=0.98$  and the standard error is  $SE=0.82$  m. The equations obtained were applied to fossil ostracod assemblages from two piston cores, called TD 1 and TE (Fig. 1; [3]). Two radiocarbon dates were obtained on the core TD 1, five on the core TE and a eighth on the core 86-435 located in the same area than core TD 1 (Fig. 1). The time scales have been built by linear interpolation between dates with respect to lithological and/or faunal limits (Fig. 2) but errors on ages are possible because of variable sedimentation rates in each sequence. Correlations between the two cores are based on remarkable hydrological events (Fig. 2): (a) the bottom of core TE corresponds to the increasing level after 4,165 yr B.P.

Note présentée par Claude LORIUS.

on core TD 1 and (b) the hiatus between 2,600 and 2,270 yr B.P. on the first core is synchronous of a very low water level on core TD 1. A model of lake-level chronology for Lake Huiñaimarca based on the transfer function data is shown in Figure 3. Results on cores TD 1 and TE (Fig. 3) indicate that Lake Huiñaimarca (1) was dry between ca. 8,100 and 7,700 yr B.P., (2) was extremely shallow and even sometimes dry from 7,700 to 5,500 yr B.P., (3) was highly fluctuating around a low level at ca. 3,789 m a.s.l. from 5,500 to 3,900 yr B.P., (4) was 3 to 5 metres below the modern lake-level between 3,900 and ca. 1,500 yr B.P. and (5) rose to the modern one at 3,808 m a.s.l. after 1,500 yr B.P. Three conclusions command attention: (a) during the major part of the Holocene, Lake Titicaca can be considered as an endorheic system; (b) the crossings from state 3 to 4 and from stage 4 to 5 have been very drastic and (c) a two hundred year dry event took place around 2,300-2,500 yr B.P. The important dryness during the Holocene, identified on Lake Titicaca records, has been seen in other South American sites, especially in the Amazonian forest [12] and in Central Brazil [13].

I. INTRODUCTION. — En milieu continental, les études paléoclimatiques s'appuient largement sur les reconstitutions des variations des niveaux lacustres au cours du temps [1]. Ces variations sont évaluées, dans chaque bassin, le plus souvent de manière relative par rapport au niveau actuel [2]. Les données quantifiées sont rares et correspondent en général à d'anciennes lignes de rivage donc à des épisodes plus ou moins longs de stabilité du plan d'eau. Nous montrerons ici que des évaluations précises peuvent être dégagées par l'étude de la microfaune des sédiments lacustres. Les résultats ont été obtenus en associant l'analyse de la distribution actuelle des ostracodes en fonction de la bathymétrie et celle des ostracodes fossiles de deux sondages réalisés dans le lac Titicaca avec un carottier à piston. Ils permettent de préciser et de quantifier les observations qualitatives qui ont été réalisées par les méthodes classiques de la micropaléontologie et de la sédimentologie [3].

II. LE SITE D'ÉTUDE. — Le lac Titicaca (8 500 km<sup>2</sup>) occupe une grande dépression tectonique du Nord de l'Altiplano des Andes de Bolivie. Il se subdivise en deux bassins principaux, le lac Chucuito au NW et le lac Huiñaimarca au SE, qui communiquent par le détroit de Tiquina. Un exutoire, au Sud du lac Huiñaimarca, participe à l'alimentation du rio Desaguadero (fig. 1). Depuis le début du siècle, le plan d'eau oscille autour d'une altitude moyenne de 3 808 m entre deux extrêmes : 3 804,30 m en 1943 [4] et 3 810,65 m en 1986 (données inédites, Servicio Nacional de Meteorología de Bolivia). Lors d'années exceptionnellement sèches, le niveau du lac s'abaisse de quelques décimètres en dessous de l'exutoire. Le Desaguadero s'écoule alors en sens inverse, comme cela a été le cas de 1970 à 1972 [5].

III. MÉTHODE. — Il a souvent été observé que les organismes lacustres benthiques ont une répartition spatiale liée à la profondeur d'eau ([6], [7]), ce qui est une conséquence directe de l'écologie propre à chaque groupe (présence de nourriture et de zones de refuge, nature du substrat, qualité de l'oxygénation, ...). Afin de vérifier cette observation générale, nous avons procédé à une analyse statistique sur les faunes d'ostracodes des sédiments actuels. Les prélèvements sur le terrain ont été faits au moyen d'un carottier léger à gravité [8].

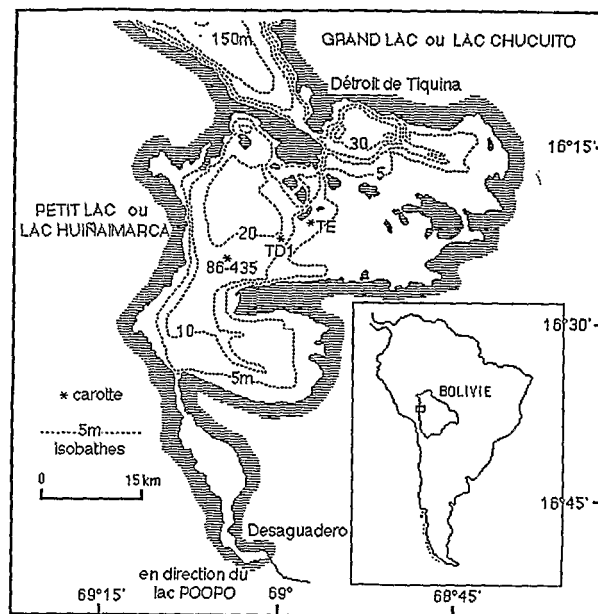


Fig. 1. — Site d'études et localisation des sondages carottés.

Fig. 1. — Study site and location of the cores.

Une analyse factorielle des correspondances a été effectuée sur une base de 115 échantillons contenant au moins une espèce. Il résulte de la comparaison des résultats de cette AFC avec les données environnementales correspondantes (ici, la hauteur d'eau) que le regroupement des points n'est pas dû au hasard [9]. Une fonction de transfert peut donc être envisagée. Son principe est simple : on suppose qu'une association actuelle retrouvée morte à l'interface eau-sédiment à une profondeur  $x$  s'est toujours sédimentée à cette même profondeur.

La création de la base de données actuelles, étape majeure dans l'établissement d'une fonction de transfert a été faite selon les modalités décrites par Servant-Vildary et Roux [10]. Nous avons créé un tableau comportant 28 lignes (espèces) et 5 colonnes (classes bathymétriques dont les bornes sont déterminées en prenant en compte le regroupement des échantillons à l'issue de la première AFC). Ce tableau est ensuite soumis à une nouvelle AFC après adjonction de deux tableaux supplémentaires traités en éléments passifs (*sensu* Benzécri, 1973) contenant l'ensemble des relevés actuels (115 au total) et fossiles (nombre variable, égal à celui des échantillons prélevés dans chaque carotte). Le traitement permet d'obtenir non seulement les coordonnées factorielles des classes bathymétriques dans un système d'axes à  $n$  dimensions mais aussi celles des échantillons actuels et fossiles dans le même système d'axes. Ce système de représentation permet de vérifier instantanément la position des relevés fossiles par rapport aux échantillons actuels ou en d'autres termes l'existence pour chaque élément fossile d'au moins un analogue actuel, condition *sine qua non* à une régression. Ce point particulier vérifié, une régression linéaire multiple est alors effectuée sur le paramètre considéré. Les résultats obtenus vont attester la qualité de la fonction définie et, par conséquent, la validité de la fonction de transfert. Le coefficient de corrélation entre la valeur réelle mesurée *in situ* et l'estimation par la fonction est égal à 0,98; l'erreur standard sur l'estimation est de 0,82 m. Une vérification supplémentaire indépendante a été réalisée en intégrant dans

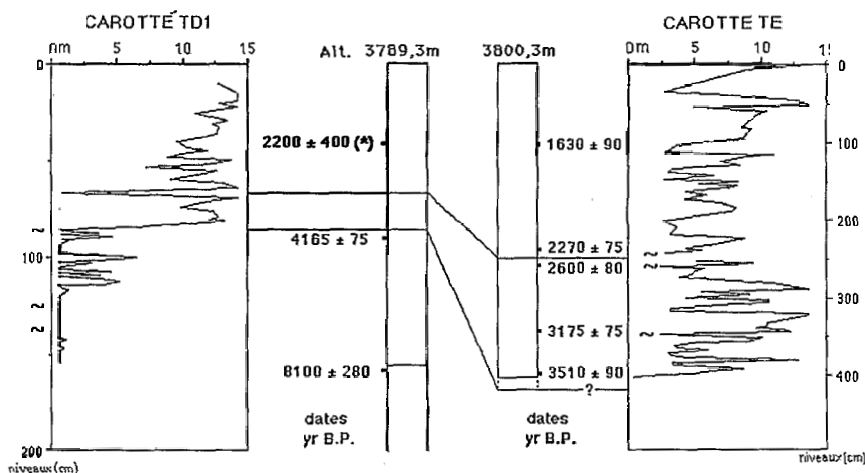


Fig. 2. — Résultats bruts (profondeurs d'eaux estimées par la régression en fonction de la localisation en centimètres de l'échantillon dans le sondage) et corrélations entre les carottes TD 1 et TE. Les datations par le radiocarbone (laboratoires ORSTOM-Bondy et Beta Analytic) sont exprimés en âges normalisés par le  $^{13}\text{C}$ ; (\*) l'âge radiocarbone de 2 200 ans B.P. a été obtenu sur la carotte 86-435.

Fig. 2. — Results of the transfer function on core TD 1 and TE samples and hydrological correlations between the two cores; the adjusted  $^{13}\text{C}$  dates are from the ORSTOM-Bondy or Beta Analytic laboratories, (\*) radiocarbon date from core 86-435.

l'AFC onze échantillons actuels en tant qu'éléments passifs (ou « fossiles »). Les différences obtenues entre les profondeurs calculées et les profondeurs réelles sont, pour dix d'entre eux, inférieures à l'erreur standard.

IV. RÉSULTATS. — Les échantillons fossiles de deux sondages effectués dans le lac Huiñaimarca par 19 et 8 m de fond (carottes TD 1 et TE; fig. 1) ont été introduits dans l'AFC. L'altitude du plan d'eau lors de la campagne de carottages était de 3 808,3 m.

1. *Données brutes et corrélations.* — L'ensemble de la carotte TE (403,5 cm) contient des ostracodes, alors que seuls les 155 cm supérieurs de la carotte TD 1 en sont pourvus. A de très rares exceptions près, correspondant à des mélanges de faunes, lors du prélèvement de l'échantillon [9], les relevés fossiles ont des analogues actuels très proches. Les résultats bruts obtenus à l'issue de la régression sont donnés sur la figure 2. On constate que les sédiments de la partie inférieure de la carotte TD 1 (niveaux 155 à 85 cm) se sont déposés sous une tranche d'eau de beaucoup inférieure à l'actuelle. La période de bas niveau lacustre s'est achevée un peu après 4 165 ans B.P., ainsi que l'indique la datation par le radiocarbone du niveau 87-88 cm. Le plan d'eau ne pouvait pas alors atteindre le lieu de prélèvement de la carotte TE, puisque celui-ci se trouve à une altitude supérieure. Ici, la sédimentation débute vers 3 510 ans B.P. Dans cette même carotte, les observations sédimentologiques et les datations par le radiocarbone (2 600 et 2 270 ans B.P.) indiquent une lacune de sédimentation vers le niveau 245 cm. L'assèchement que suggère ce hiatus peut être corrélé avec une phase d'abaissement du plan d'eau au niveau 65 cm de la carotte TD 1.

Au total, nous disposons de 5 datations  $^{14}\text{C}$  sur le sondage TE et de 2 datations  $^{14}\text{C}$  sur TD 1 (fig. 2). Pour estimer l'âge des sédiments entre deux niveaux datés, nous avons eu recours à une interpolation linéaire en respectant les limites lithologiques et les grands changements faunistiques. Cette méthode nous permet de calculer un taux moyen de sédimentation par intervalle, à l'exception de l'intervalle 65-9 cm de la carotte TD 1.

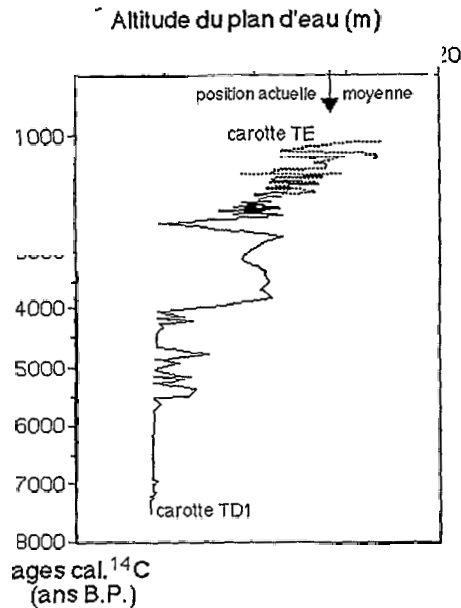


Fig. 3. — Synthèse de l'évolution paléobathymétrique du lac Huiñaimarca entre environ 7 700 et 1 000 ans B.P. Le trait plein correspond à la carotte TD 1, le discontinu à la carotte TE. La flèche indique l'altitude moyenne du plan d'eau actuel.

Fig. 3. — Water level variation chronology for Lake Huiñaimarca between ca. 7,700 and ca. 1,000 yr B.P. (full line for core TD 1 and dashed line for core TE). The arrow indicates the modern lake-level.

Pour ce dernier, nous avons utilisé une datation obtenue sur un troisième sondage réalisé dans la même région par 18 m de hauteur d'eau; le niveau 42,5-44,5 cm de la carotte 86-435 est comparable au niveau 40-41 cm de la carotte TD 1. Tous deux se singularisent par leurs faunes particulières (présence de *Cyprideis hartmanni* Ramirez 1967).

D'autre part, nous pensons que les parties sommitales de tous les sondages longs prélevés dans le lac Titicaca sont manquantes, vraisemblablement « chassées » lors de la pénétration du carottier à piston dans le sédiment. Ainsi, le sommet de la carotte TE (niveau 0 cm) est estimé, par extrapolation du taux de sédimentation de l'intervalle précédent, à 1 150 ans B.P., le niveau 9 cm de la carotte TD 1 à 2 000 ans B.P. (de 9 à 0 cm, il n'y a pas de faune).

2. *Commentaires des résultats.* — L'évolution hydrologique du lac Huiñaimarca au cours des 7 500 dernières années a pu être reconstituée, exception faite du dernier millénaire, en synthétisant les informations obtenues à partir des résultats bruts des deux sondages (fig. 3). De 7 700 à 5 500 ans B.P., le centre du bassin est occupé par un lac de très faible profondeur d'eau. Plusieurs niveaux fossiles, caractérisés par des débris de Characées et d'ostracodes et par des grains de quartz éolisés, indiquent un milieu proche du rivage, probablement épisodiquement asséché. De 5 500 à 3 900 ans B.P., de fréquentes et importantes variations du niveau lacustre sont enregistrées autour d'une cote moyenne toujours basse (altitude 3 788-3 789 m). De 3 900 ans B.P. à ca. 1 500 ans B.P., le lac fluctue autour d'une cote moyenne située à 3 804-3 805 m soit quelque 14 m au-dessus du niveau précédent. A cette altitude, il ennoie les vastes étendues planes où nous avons prélevé la carotte TE. Après 1 500 ans B.P., le Lac Huiñaimarca monte de nouveau de quelques mètres et fluctue ensuite autour de sa position actuelle.

V. CONCLUSIONS. — Une fonction de transfert ostracodes/bathymétrie a été établie et a permis de reconstituer l'évolution des paléoniveaux du lac Titicaca.

1. Le lac Huiñaimarca a fonctionné comme un système endorhéique durant la majeure partie de l'Holocène. Ce système a été affecté par deux événements hydrologiques majeurs :

- une remontée brusque du plan d'eau vers 3 900 ans B.P.;
- une brève phase d'abaissement du niveau vers 2 400 ans B.P.

2. Le dernier changement hydrologique majeur, après 1 500 ans B.P., a amené le plan d'eau au niveau du rio Desaguadero; son enregistrement a été atténué par un effet d'écrêtement des crues dû à l'individualisation de l'exutoire.

3. Ces résultats sont en bon accord avec les données obtenues dans d'autres régions d'Amérique sud-équatoriale. Ils montrent que la sécheresse holocène déjà identifiée en basse altitude au Brésil ([12] à [14]) s'est également produite en haute altitude dans les Andes centrales. Cela confirme les scénarios paléoclimatiques récemment proposés en Amérique du Sud [15]. Nos résultats montrent, de plus, que de brusques changements paléohydrologiques et paléoclimatiques, encore inexpliqués, ont eu lieu durant l'Holocène en Bolivie et que les conditions actuelles ne se sont installées sur l'Altiplano qu'à une date très récente, après 1 500 ans B.P.

Note remise le 4 juin 1992, acceptée après révision le 18 août 1992.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] F. A. STREET-PERROTT et S. P. HARRISON, *Climate Processes and Climate Sensitivity*, J. E. HANSEN et T. TAKAHASHI éd., M. Ewing, 1984, p. 118-129.
- [2] F. A. STREET-PERROTT et S. P. HARRISON, *Paleoclimate Data and Modeling*, A. D. HECHT éd., Wiley, New York, 1985, p. 291-340.
- [3] D. WIRRMANN et L. F. DE OLIVEIRA ALMEIDA, *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.*, 59, 1987, p. 315-323.
- [4] A. KESSLER, *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, sér. B, 18, 1970, p. 239-252.
- [5] J. P. CARMOUZE et E. AQUIZE JAEN, *Rev. Hydrobiol. Trop.*, 14 (4), 1991, p. 311-328.
- [6] P. M. JÓNASSON, *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 20, 1978, p. 13-37.
- [7] A. S. COHEN, *J. Paleont.*, 58, (2), 1984, p. 499-510.
- [8] D. L. DANIELOPOL, L. CASALE, B. ROGULJ, J. STROBL et K. MAIER, *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, 47, 1990, p. 139-165.
- [9] P. MOURGUIART et M. ROUX, *Géodynamique*, 5, (2), 1990, p. 57-71.
- [10] S. SERVANT-VILDARY et M. ROUX, *Hydrobiologia*, 197, 1990, p. 267-290.
- [11] J. P. BENZECRI, *L'Analyse des Données*, 2, Dunod, Paris, 1973.
- [12] M. L. ABSY, A. M. CLEEF, M. FOURNIER, L. MARTIN, M. SERVANT, A. SIFEDDINE, M. F. F. SILVA, F. SOUBIES, K. SUGUIO, B. TURCQ et T. VAN DER HAMMEN, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 312, série II, 1991, p. 673-678.
- [13] M. P. LEDRU, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 314, série II, 1992, p. 117-123.
- [14] M. SERVANT, J. MALEY, B. TURCQ, M. L. ABSY, P. BRENAC, M. FOURNIER et M. P. LEDRU, *Global and Planetary Changes* (sous presse).
- [15] L. MARTIN, M. L. ABSY, J. M. FLEXOR, M. FOURNIER, P. MOURGUIART, A. SIFEDDINE et B. TURCQ, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 315, série II, 1992, p. 97-102.

M. F. et M. S. : ORSTOM, 70-74, route d'Aulnay, 93143 Bondy Cedex;

P. M. : Mission ORSTOM, C.P. n° 9214, 00095 La Paz Bolivie;

D. W. : Centre ORSTOM, B.P. 1857, Yaoundé, République du Cameroun.