

EVOLUTION PALEOHYDROLOGIQUE DU BASSIN DU LAC TITICACA AU COURS DE L'HOLOCENE

Ph. MOURGUIART¹, J. ARGOLLO² et D. WIRRMANN³

INTRODUCTION

Depuis quelques années, les études portant sur les reconstructions des paléoniveaux lacustres se sont multipliées dans la zone intertropicale. Classiquement, ces reconstructions s'appuient, soit sur des données géomorphologiques relatives à d'anciennes lignes de rivage, soit sur l'étude des sédiments lacustres. Au niveau de l'Altiplano de Bolivie, les 2 méthodologies ont été utilisées par différents auteurs depuis le début du siècle. Ainsi, les grandes tendances évolutives des lacs de l'Altiplano ont été définies pour le Pléistocène terminal (Steinmann *et al.*, 1904; Bowman, 1909; Servant et Fontes, 1978; Wirrmann *et al.*, 1992). Récemment, un nouvel axe de recherche a été testé sur les environnements lacustres du lac Titicaca au cours de l'Holocène. Il porte sur des reconstructions quantitatives réalisées à partir d'une fonction de transfert Ostracodes / Bathymétrie (Mourguiart et Roux, 1990; Mourguiart *et al.*, 1992; Mourguiart et Carbonel, 1994). Dans cet article, nous nous proposons, à partir de données anciennes et nouvelles, de donner une synthèse de l'évolution du lac Titicaca (lacs Chucuito et Huiñaimarca) depuis 8000 ans BP.

PRESENTATION GENERALE

L'Altiplano est un vaste ensemble andoréique (environ 190 000 km²) situé au coeur des Andes du Pérou, de la Bolivie et du Chili. Du point de vue climatique, c'est un système présentant un fort gradient Nord-Est/Sud-Ouest tant en ce qui concerne la température moyenne annuelle que les précipitations (Roche *et al.*, 1992). La distribution des précipitations (et de l'évaporation) explique, en particulier, que l'on trouve au Nord un grand lac permanent, le lac Titicaca, au centre un lac semi-permanent, le lac Poopó, et, au Sud des grands lacs saisonniers, les salars de Coipasa et de Uyuni. L'hydrosystème dans sa globalité apparaît comme étant très sensible aux variations interannuelles du climat: en 1983, le lac Poopó s'assèche alors qu'en 1986, seulement 3 ans plus tard, le même lac couvre une superficie d'environ 4000 km².

Au cours du Quaternaire, le climat de la Terre a connu une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires. L'Altiplano bolivien a gardé, dans ces dépôts sédimentaires, une mémoire de ces oscillations de grande amplitude. Faisant suite aux travaux de Steinmann *et al.* (1904) et de Bowman (1909), Servant et Fontes (1978) ont proposé un modèle d'évolution des grands systèmes lacustres couplé aux variations d'extension des glaciers de la cordillère orientale de Bolivie. Schématiquement, la fin du Quaternaire est marquée par 3 grandes oscillations positives des bilans en eau des lacs tant dans les bassins Nord (lac Titicaca) que dans les bassins Sud (lacs Poopó, Coipasa et Uyuni). Si la plus ancienne, la phase "Ballivian", n'est pas datée, les deux suivantes sont datées de > 27 000 ans BP pour la phase "Minchin" et de 12,5-10,5 ka BP pour la phase "Tauca" (Servant et Fontes, 1978). Pour ces auteurs, ces 3 phases lacustres majeures ont été alimentées par la fonte des glaciers correspondant aux glaciations Sorata, Choqueyapu I et Choqueyapu II, de la plus ancienne à la plus récente.

¹ ORSTOM, CP 9214, La Paz, Bolivie

² UMSA-IIG, CP 11152, La Paz, Bolivie

³ ORSTOM, BP 1857, Yaoundé, République du Cameroun

Ultérieurement, Hastenrath et Kutzbach (1985), Kessler (1988) et Seltzer (1992) ont remis en question cette hypothèse. En effet, selon ces auteurs, la fonte seule des glaciers ne peut être responsable de la création des immenses lacs Minchin et Tauca (63 000 km² et 43 000 km², respectivement, selon Hastenrath et Kutzbach, *op. cit.*). Leur affirmation est basée sur un calcul approché du volume de glaces, et par conséquent d'eaux, stocké dans les glaciers au maximum de leur avancée. L'apport majeur en eau correspondrait à une phase climatique humide ayant entraîné une augmentation des précipitations de l'ordre de 30% par rapport aux valeurs actuelles.

En revanche, les auteurs précédemment cités n'ont pas abordé les reconstitutions paléohydrologiques à l'Holocène. Des études sédimentologiques réalisées sur des carottes prélevées dans le lac Titicaca ont montré que l'Holocène était caractérisé par des niveaux lacustres inférieurs au niveau du plan d'eau actuel (Wirrmann et Oliveira Almeida, 1987; Wirrmann *et al.*, 1988, 1992). Dans le nord chilien, cette longue phase sèche a également été repérée (Messerli *et al.*, 1991; Grosjean, 1994).

Dans le présent article, nous nous proposons de faire le point sur les derniers résultats paléohydrologiques obtenus sur le lac Titicaca. Les reconstitutions proposées s'appuient sur des données établies à partir d'une fonction de transfert Ostracodes / Bathymétrie. Elles concernent 3 carottages prélevés dans les 3 grandes unités morphologiques du lac Titicaca: le lac Chucuito au Nord, le lac Huiñaimarca au Sud avec ses 2 bassins, la fosse de Chua au Nord-Est et la cuvette de Guaqui-Taraco au Sud-Ouest (Fig. 1).

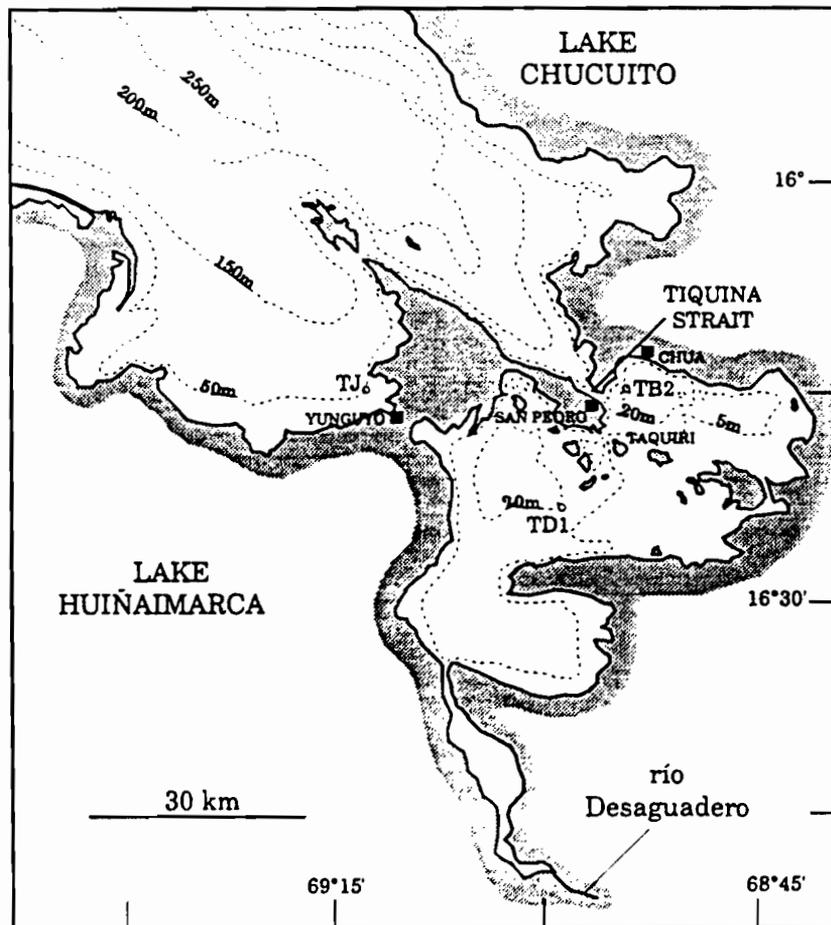


Fig. 1: Sites de carottage sur le lac Titicaca

LA FONCTION DE TRANSFERT OSTRACODES / BATHYMETRIE

Les faunes

Dans le lac Titicaca, les ostracodes benthiques et épiphytes ont une répartition très étroitement corrélée à la profondeur d'eau (Mourguiart, 1987; Mourguiart et Roux, 1990; Mourguiart et Carbonel, 1994). Cela s'explique, non seulement, par une couverture macrophytale dépendante de la hauteur d'eau (Collot *et al.*, 1983), mais aussi, par des niveaux d'énergie (donc par des natures de substrat variables), des taux d'oxygénation à l'interface eau-sédiment et des ressources alimentaires liés à ce même paramètre bathymétrique (Fig. 2).

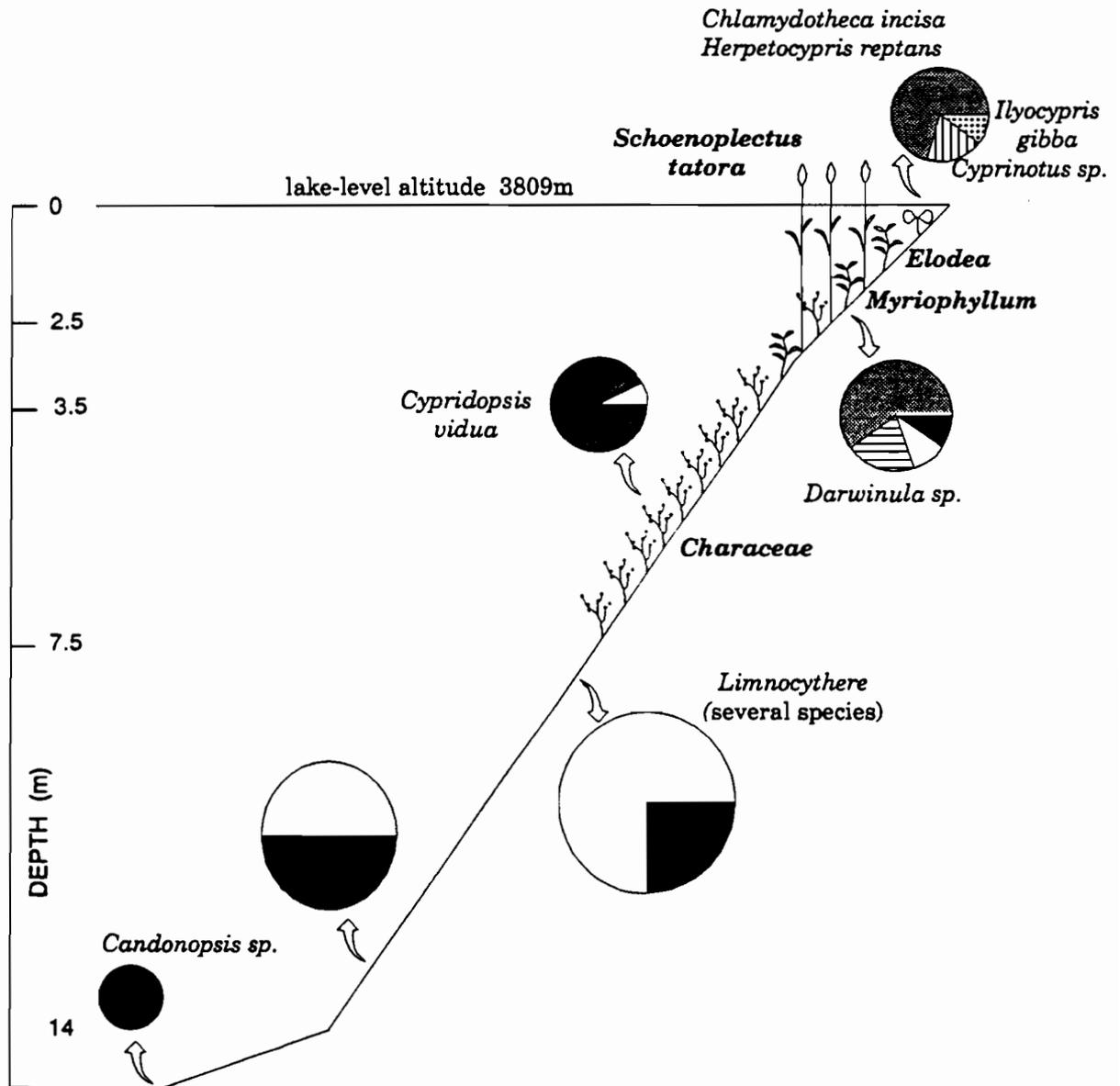


Fig. 2: Répartition bathymétrique des faunes d'ostracodes dans le lac Huiñaimarca

Des différences au niveau de la zonation bathymétrique des peuplements d'ostracodes existent entre le lac Huiñaimarca (bassin sud du lac Titicaca) et le lac Chucuito (bassin nord). Cela s'explique par des différences au niveau de la transparence des eaux entre les 2 bassins. Les eaux du lac Chucuito, plus claires, autorisent une colonisation plus profonde par les macrophytes et en particulier par les characées (Iltis et Mourguiart, 1992). Les associations d'ostracodes sont de ce fait décalées vers le bas par rapport à celles rencontrées dans le lac Huiñaimarca (Mourguiart, 1992). Les analyses statistiques effectuées sur les faunes d'ostracodes prennent en compte ces différences entre bassins.

Une analyse factorielle des correspondances (AFC) a été effectuée sur une base de 115 échantillons actuels renfermant au moins une espèce d'ostracodes. La répartition spatiale de cette référence est donnée par ailleurs (Mourguiart et Roux, 1990; Mourguiart et Carbonel, 1994). Cette base de données constitue un tableau de 28 lignes ou espèces et 17 colonnes ou classes environnementales. Ce fichier est soumis à une AFC après adjonction de deux tableaux supplémentaires traités en éléments passifs (*sensu* Benzécri, 1973) contenant l'ensemble des relevés faunistiques actuels (115 échantillons) et fossiles (nombre variable, égal à celui des échantillons prélevés dans chaque carottage et comportant au moins une espèce d'ostracode). Ce traitement statistique permet d'obtenir non seulement les coordonnées factorielles des classes environnementales dans un système d'axes à n dimensions mais aussi celles des échantillons actuels et fossiles dans le même espace vectoriel. Ce système de représentation est particulièrement commode. En effet, il permet de visualiser instantanément la position des échantillons fossiles par rapport aux relevés actuels ou, en d'autres termes, de vérifier l'existence, pour chaque association faunique fossilisée, d'au moins un analogue actuel. A titre d'illustration, nous donnons sur la figure 3 une projection dans le plan des deux premiers axes des assemblages actuels (Fig. 3a) et fossiles (Fig. 3b).

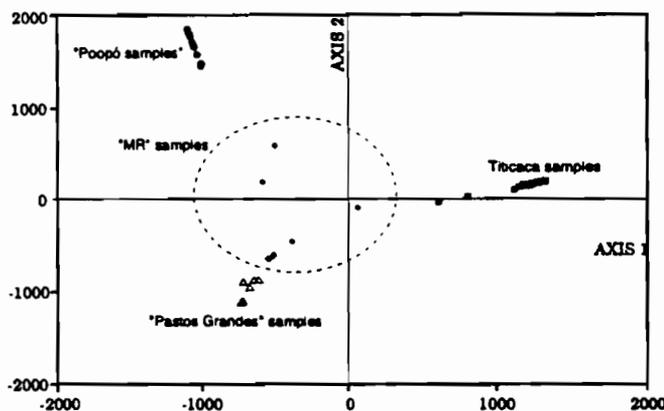
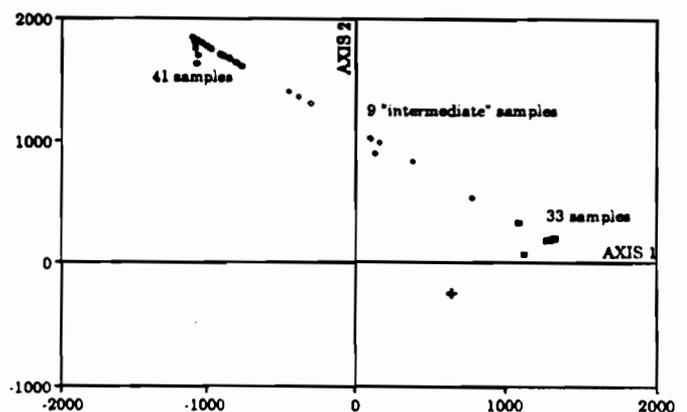


Fig. 3a: Projection sur les deux premiers axes de l'AFC des échantillons actuels.

Fig. 3b: Projection sur les deux premiers axes de l'AFC des échantillons de la corotte TD1.



A l'issue de cette AFC, une régression linéaire multiple est effectuée sur le paramètre environnemental pris en compte, ici, la hauteur d'eau (Fig. 4).

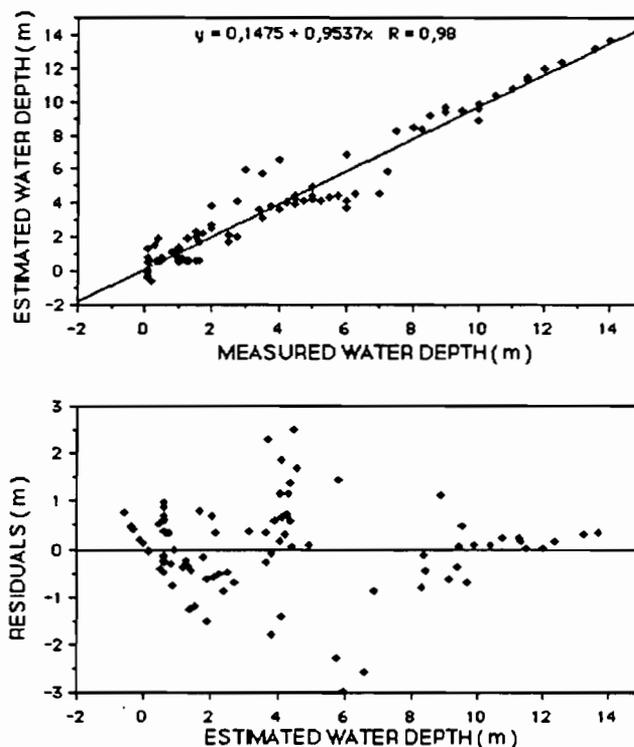


Fig. 4: La régression sur le paramètre profondeur

Les carottages

14 carottes, en majorité constituées de sédiments d'âge holocène, ont été prélevées dans le lac Titicaca à l'aide d'un carottier Mackereth. Trois carottes (TD1, TB2 et TJ) ont été étudiées et ont fait l'objet d'un traitement statistique. Deux sondages (TD1 et TB2) ont atteint le Pléistocène supérieur. Malheureusement, les sédiments les plus anciens ne renferment pas d'ostracodes. La plupart des espèces fossiles rencontrées vivent actuellement, soit dans le lac Titicaca lui-même, soit dans d'autres environnements lacustres comme le lac Poopó ou les innombrables lagunes jalonnant l'Altiplano bolivien (Mourguiart, 1987; Mourguiart et Roux, 1990; Mourguiart et Carbonel, 1994). Les 3 carottes ont été récoltées en 1983 dans les lacs Huiñaimarca et Chucuito dans leur partie bolivienne. La carotte TD1, longue de 5.50 m, a été prélevée à 19 m de profondeur au centre de la cuvette ouest (16°20'00"S et 68°57'45"W) du Petit Lac Titicaca (Fig.1). Seuls les 155 cm supérieurs contiennent des ostracodes (Mourguiart *et al.*, 1992). La carotte TB2 est longue de 481 cm mais seuls les 266cm supérieurs renferment des ostracodes. Elle a été prélevée au centre de la fosse de Chua (16°12'18"S et 68°46'36"W) par 39 m de hauteur d'eau (Fig. 1). La carotte TJ, longue de 4.06 m, a été prélevée par 50 m de hauteur d'eau dans la baie de Yunguyo (16°12'30"S et 69°07'00"W) au Sud-Ouest du Grand Lac Titicaca (Fig.1). Le sédiment, de type organo-carbonaté légèrement détritique, renferme une ostracofaune riche et diversifiée (Mourguiart, 1987) à l'exception des 12 cm les plus profonds (niveaux 406-394 cm) constitués d'un dépôt de gypse puis d'une passée sableuse et enfin d'un lit de spicules d'éponges.

La chronologie de ces trois sondages a été réalisée à partir de datations ^{14}C : 2 sur TD1 et 8 sur TJ et 3 sur TB2 (Tableau).

age ^{14}C	matériel daté	échantillon	sondage	n° laboratoire
4165 ± 75	C.O.T.	88-89 cm	TD1	Beta-32216
8100 ± 280	carbonates	157-158	(-19m)	Orsay
3870 ± 80	carbonates	20-21	TJ	Beta-32221
3930 ± 490	carbonates	32-39	(-50m)	OBDY-560
5300 ± 50	carbonates	77-83		OBDY-835
5350 ± 40	carbonates	83-90		OBDY-826
5970 ± 70	carbonates	152-157		OBDY-822
5890 ± 45	carbonates	195-200		OBDY-821
6360 ± 70	carbonates	295-300		OBDY-559
7710 ± 180	carbonates	390-393		OBDY-104
1240 ± 150	C.O.T.	107-112	TB2	OBDY-830
3330 ± 550	C.O.T.	172-175	(-39m)	OBDY-828
3840 ± 80	C.O.T.	244-250		OBDY-829

Tableau: Récapitulatif des âges obtenus sur carbonates ou sur le Carbone Organique Total (C.O.T.) pour les sondages TD1, TJ et TB2

RESULTATS

Pour vérifier la validité d'une fonction de transfert et son degré de fiabilité, les outils statistiques sont nombreux mais ont l'inconvénient de faire intervenir seulement les échantillons actuels introduits dans l'AFC en tant que tels (Fig. 4). Aussi, nous avons intégré onze échantillons actuels en tant qu'éléments passifs. La régression a donné pour dix d'entre eux une valeur inférieure à l'erreur standard sur le paramètre profondeur. Cependant ces tests ne rendent pas compte de l'applicabilité de la fonction de transfert à des faunes fossiles.

Un moyen de vérification indirect nous est fourni en comparant les résultats de plusieurs carottages. C'est ce que nous avons réalisé en introduisant dans l'AFC les faunes fossiles des 3 carottes TD1, TB2 et TJ (Fig. 5).

La comparaison des évolutions paléobathymétriques établies pour les 3 carottes indique clairement que les 3 grands bassins du lac Titicaca ont fonctionné de manière indépendante durant la quasi-totalité de l'Holocène (Mourguiart et Roux, 1990). Malgré cette difficulté, il est possible de mettre en parallèle les grandes tendances propres à chaque enregistrement. On remarque tout de suite qu'il y a convergence en plusieurs points et que la fonction de transfert autorise des corrélations. Par exemple, l'abrupte remontée des plans d'eau autour de 3900 ans BP est repérée au niveau des 3 séries mais aussi dans d'autres carottes comme la TE (Mourguiart *et al.*, 1992) et TG1 ou TH (données non publiées). Il en est de même de la phase sèche d'environ 2300 ans BP qui se traduit en terme de paléohydrologie par un très fort recul des plans d'eau, recul enregistré dans les carottes TD1 et TJ. Ces 2 enregistrements indiquent aussi une amélioration des bilans en eau autour de 8000 - 7500 ans BP.

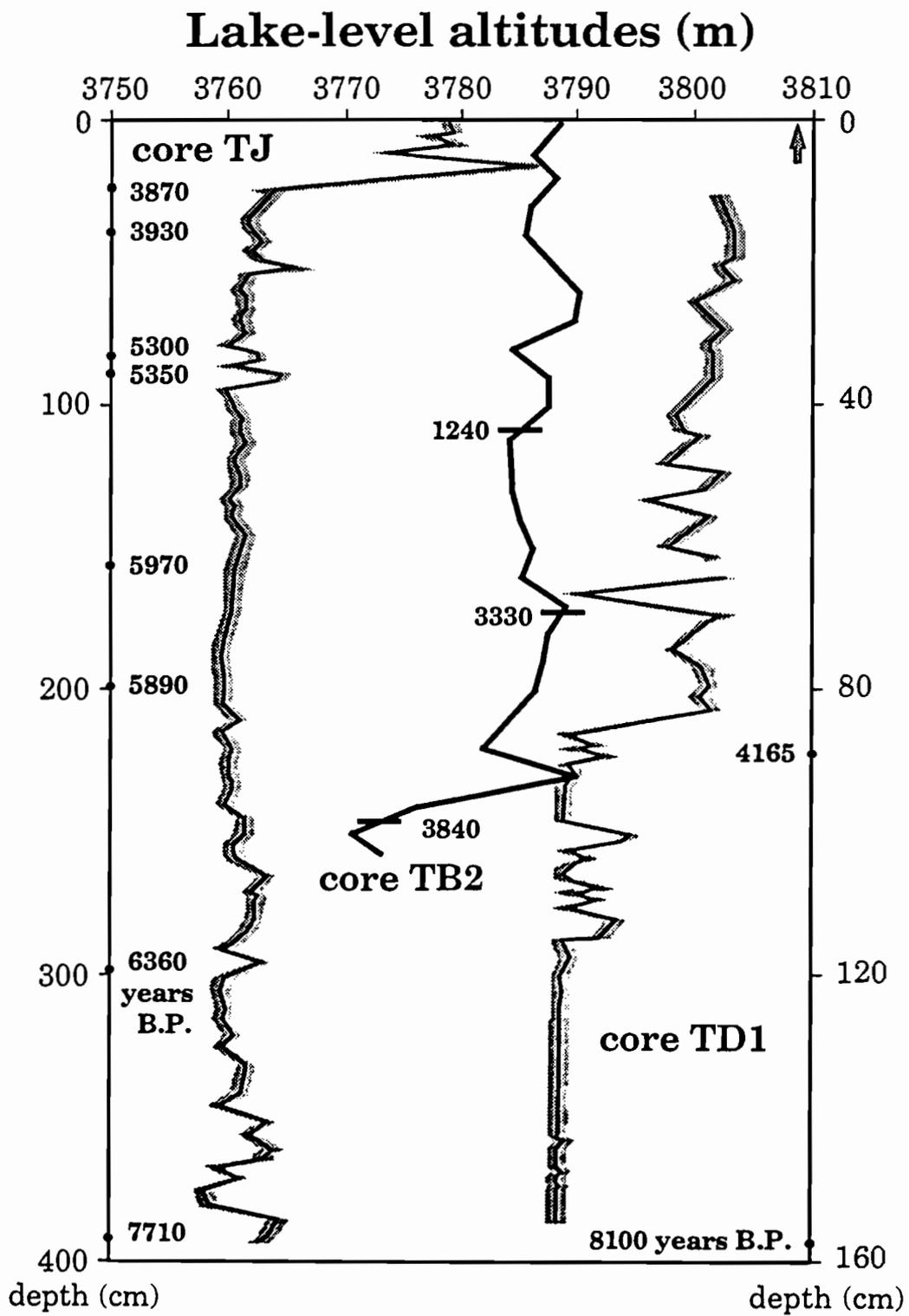


Fig. 5: Evolution paléobathymétrique des trois carottes TJ, TB2 et TD1 reconstruite par la fonction de transfert ostracodes bathymétrie

CONCLUSION

Une fonction de transfert a été développée à partir des faunes d'ostracodes rencontrées sur l'Altiplano bolivien. Il est possible de reconstruire avec précision l'évolution paléobathymétrique d'un système lacustre tel que le lac Titicaca au cours de l'Holocène. L'introduction, dans l'analyse factorielle des correspondances, de plusieurs carottes prélevées dans ce dernier milieu nous a permis de mettre en évidence une évolution complexe, essentiellement marquée par des niveaux de plans d'eau inférieurs à l'actuel. Nos données confirment l'occurrence de la phase climatique sèche de l'Holocène.

BIBLIOGRAPHIE

- ARGOLLO, J., GOUZE, Ph., SALIEGE, J. F. & SERVANT, M. 1987. Fluctuations des glaciers de Bolivie au Quaternaire récent. *Géodynamique*, 2 (2), 103-104.
- BILLS, B.G., de SILVA, S.L., CUREY, D.R., EMENGER, R.S., LILLQUIST, K.D., DONNELLAN, A. & WORDEN, B. 1994. Hydro-isostatic deflection and tectonic tilting in the central Andes: Initial results of a GPS survey of Lake Minchin shorelines. *Geophysical Research Letters*, 21 (4), 293-296.
- BOULANGE, B., VARGAS, C. & RODRIGO, L. A. 1981. La sédimentation actuelle dans le lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14 (4), 299-309.
- BOWMAN, I. 1909. The physiography of the Central Andes. *Amer. Journ. Sci.*, 4 (28), 373-402.
- CARMOUZE, J.P., ARZE, C. & QUINTANILLA, J. 1978. Circulación de materia (agua - sales disueltas) através del sistema fluvio-lacustre del Altiplano: la regulación hídrica é hidroquímica de los lagos Titicaca y Poopó). *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, 10 (1), 49-68.
- CLAPPERTON, C.M. 1993a. *The Quaternary Geology and Geomorphology of South America*. Elsevier, Amsterdam.
- CLAPPERTON, C.M. 1993b. Glacier readvance in the Andes at 12 500-10 000 yr BP: implications for mechanism of Late-glacial climatic change. *Journal of Quaternary Science*, 8 (3), 197-215.
- COLLOT, D., KORIYAMA, F. & GARCIA, E. 1983. Répartitions, biomasses et productions des macrophytes du lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 16 (3), 241-261.
- CURTIS, J.H., HODELL, D.A., BRENNER, M. & BINFORD, M.W. 1993. Little Ice Age Recorded in Sediments from Lake Titicaca, Bolivia. *Eos*, Fall meeting, 118-119.
- FRANCOU, B., MOURGUIART, Ph. & FOURNIER, M. 1995. Phase d'avancée des glaciers au Dryas récent dans les Andes du Pérou. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 320, série IIa, 593-599.
- GOUZE, Ph., ARGOLLO, J., SALIEGE, J. F. & SERVANT, M. 1986. Interprétation paléoclimatique des oscillations des glaciers au cours des 20 derniers millénaires dans les régions tropicales; exemple des Andes boliviennes. *C. R. Acad. Sc. Paris, Série II*, 303 (3), 219-224.
- GROSJEAN, M. 1994. Paleohydrology of the Laguna Lejía (north Chilean Altiplano) and climatic implications for late-glacial times. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 109, 89-100.
- HASTENRATH, S. & KUTZBACH, J. 1985. Late Pleistocene climate and water budget of the South American altiplano. *Quaternary Research*, 24, 249-256.
- ILTIS, A. & MOURGUIART, Ph. 1992. Higher plants: Distribution and biomass. In: C. Dejoux & A. Ilitis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge, Monogr. Biol.*, 68, 241-252, Kluwer Academic Publishers.
- KESSLER, A. 1988. Die Schwankungen des Wasserhaushaltes de südamerikanischen Altiplano and las Weltklima. *Jahrbuch der Geographischen Gesellschaft zu Hannover*, 139-159
- LAVENU, A. 1992. Formation and geological evolution. In: C. Dejoux & A. Ilitis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge, Monogr. Biol.*, 68, 3-15, Kluwer Academic Publishers.
- LAVENU, A., FORNARI, M. & SEBRIER, M. 1984. Existence de deux nouveaux épisodes lacustres quaternaires dans l'Altiplano péruvo-bolivien. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, 14 (1), 103-114.
- MOURGUIART Ph & CARBONEL P. 1994 - A quantitative method of palaeolake-level reconstructions using ostracod assemblages: an example from the Bolivian Altiplano. *Hydrobiologia*, 288: 183-193.

- MOURGUIART, Ph. & 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, Ph., WIRRMANN, D., FOURNIER, M. & SERVANT, M. 1992. Reconstruction quantitative des niveaux du petit lac Titicaca au cours de l'Holocène. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **315**, Série II, 875-880.
- RIBSTEIN, P., TIRIAU, E., FRANCOU, B. & SARAVIA, R. 1995. Tropical climate and glacier hydrology: a case study in Bolivia. *Journal of Hydrology*, **165**, 221-234.
- ROCHE, M. A., BOURGES, J., CORTES, J. & MATTOS, R. 1992. Climatology and hydrology of the Lake Titicaca basin. In: C. Dejoux & A. Iltis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge, Monogr. Biol.*, **68**, 63-88, Kluwer Academic Publishers.
- RODRIGO, L. A. & WIRRMANN, D. 1992. General aspects of present-day sedimentation. In: C. Dejoux & A. Iltis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge, Monogr. Biol.*, **68**, 23-28, Kluwer Academic Publishers.
- SELTZER, G. O. 1992. Late Quaternary glaciation of the Cordillera Real, Bolivia. *Journal of Quaternary Science*, **7**, 87-98.
- SELTZER, G. O. 1994. A lacustrine record of Late Pleistocene climatic change in the subtropical Andes. *Boreas*, **23**, 105-111.
- SERVANT, M. & FONTES, J. Ch. 1978. Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes Premières interprétations paléoclimatiques. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, **10** (1), 9-23.
- SERVANT, M. & FONTES, J. Ch. 1984. Les basses terrasses fluviales du quaternaire récent des Andes boliviennes. Datations par le ^{14}C . Interprétation paléoclimatique. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, **14** (1), 15-28.
- SERVANT, M., FOURNIER, M., ARGOLLO, J., SERVANT-VILDARY, S., SYLVESTRE, F., WIRRMANN, D. & YBERT, J.P. 1995. La dernière transition glaciaire/interglaciaire des Andes tropicales sud (Bolivie) d'après l'étude des variations des niveaux lacustres et des fluctuations glaciaires. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **320**, série IIa, 729-739.
- STEINMANN, G., HOK, H. & BISTRAM, A. 1904. Zür Geologie des suedestland Bolivien. *Zbl. Miner.*, **5**, 1-4.
- TALJAARD, J.J. 1972. Synoptic meteorology of the southern hemisphere. In: *Meteorology of the Southern Hemisphere*, Newton, C.W. (ed.), *Meteorol. Monogr.*, **13**, 139-213.
- THOMPSON, L.G., MOSLEY-THOMPSON, E.P., DANSGAARD, W. & GROOTES, P.M. 1986. The "Little Ice Age" as recorded in the stratigraphy of the Quelccaya ice cap. *Science*, **234**, 361-364.
- WIRRMANN D. & MOURGUIART Ph. (in press). Late Quaternary spatio-temporal limnological variations in the Altiplano (South America). *Quaternary Research* (1995).
- WIRRMANN, D., MOURGUIART, Ph. & de OLIVEIRA ALMEIDA, L. F. 1988. Holocene sedimentology and ostracodes repartition in Lake Titicaca. Paleohydrological interpretations. In: Rabassa, J. (ed.), *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, **6**, 89-127, Balkema, Rotterdam.
- WIRRMANN, D. & de OLIVEIRA ALMEIDA, L. F. 1987. Low Holocene level (7700 to 3650 years ago) of Lake Titicaca (Bolivia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **59**, 315-323.
- WIRRMANN, D., YBERT, J.P. & MOURGUIART, Ph. 1992. A 20,000 years paleohydrological record from Lake Titicaca. In: C. Dejoux & A. Iltis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge, Monogr. Biol.*, **68**, 40-48, Kluwer Academic Publishers.
- YBERT, J. P. 1992. Ancient lake environments as deduced from pollen analysis. In: C. Dejoux & A. Iltis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge, Monogr. Biol.*, **68**, 49-60, Kluwer Academic Publishers.