

Le dernier maximum glaciaire (21 000–17 000 ¹⁴C ans B.P.) dans les Andes tropicales de Bolivie d'après l'étude des diatomées

The last glacial maximum (21 000–17 000 ¹⁴C yr B.P.) in the southern tropical Andes (Bolivia) based on diatom studies

Florence Sylvestre^a, Simone Servant-Vildary^b, Michel Servant^c

^a Université d'Angers, laboratoire de géologie, 2, bd Lavoisier, 49045 Angers cedex, France

^b Laboratoire de géologie, Orstom-MNHN-Esa 7073, 43, rue Buffon, 75005 Paris, France

^c Orstom, UR11, 32, av. Henri-Varagnat, 93140 Bondy cedex, France

Abstract—A diatom study, carried out on a core recovered in the Southern Altiplano (Coipasa salt lake 19°S, 68°W) currently almost completely dry, shows that during the last glacial maximum the Coipasa salar was entirely occupied by a large shallow lake. Available data for the northern Altiplano (Lake Titicaca, 16°S, 69°W) indicate a water level 17 m lower than today. This opposition is explained by decreased tropical precipitations whose effects registered by Lake Titicaca were obliterated in the Coipasa salar by increased winter precipitation. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

Quaternary / last glacial maximum / tropics / Bolivian Andes / diatoms / palaeoenvironment

Résumé — L'étude des diatomées d'une carotte prélevée dans le Sud de l'Altiplano bolivien (Salar de Coipasa, 19°S, 68°W) révèle un niveau lacustre plus élevé qu'actuellement entre 21 000 et 17 000 ¹⁴C ans B.P. Les données disponibles dans le Nord de l'Altiplano (lac Titicaca, 16°S, 69°W) indiquent au contraire un niveau lacustre plus bas qu'actuellement. Cette opposition peut s'expliquer par une diminution des précipitations tropicales, dont les effets ont été enregistrés par le lac Titicaca, alors qu'ils ont été oblitérés dans le Salar de Coipasa par un renforcement des précipitations d'hiver. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

Quaternaire / dernier maximum glaciaire / tropiques / Andes boliviennes / diatomées / paléoenvironnement

Abridged version

The response of the South American tropics during the last glacial maximum is not clearly evidenced. In south-eastern Amazonia, where precipitation is today relatively low, two cores are characterised, between ca. 20 000 and 13 000¹⁴C yr B.P., by a hiatus considered as a drying event (Absy et al., 1991; Sifeddine et al., 1994). In central Amazonia, where precipitation is presently high, a palynological record shows that conditions were humid enough to maintain the rain forest (Colinvaux et al., 1996). In central Brazil, a lacustrine core

presents a hiatus of sedimentation between ca. 28 000 and 17 000 ¹⁴C yr B.P. suggesting drier conditions (Ledru, 1993). In Lake Titicaca, the palynological data show that the level of the lake was 17 m below its outlet between ca. 21 000 and 18 000 ¹⁴C yr B.P. (Ybert, 1992). In the tropical highlands, an increase in dust concentration in an ice-core collected in the north-central Andes of Peru indicates a reduction in atmospheric humidity (Thompson et al., 1995). Thus, were the South American tropics wet or dry during the last glacial

Note présentée par Claude Lorius.

Noté remise le 6 mai 1998; acceptée après révision le 28 septembre 1998.



maximum? The study of a core collected in the south Bolivian Altiplano shows that a shallow lake covered Coipasa salar, which is currently dry, between ca. 21 000 and 17 000 ^{14}C yr B.P.

The Bolivian Altiplano, located between the western and the eastern Andes Cordillera (15° – 23°S) at above 3 800 m altitude is presently occupied from north to south by the freshwater Lake Titicaca, Poopó salt lake and large salt flats, the salars of Coipasa and of Uyuni (figure 1). The regional climate is of mountain tropical type, characterised by a short rainy season (December–February) and a long dry season (April–November). Precipitation is fed by water vapour from the Atlantic Ocean and Amazonia (Ronchail, 1988). Some precipitation may occur during the austral winter in relation with meridional air mass exchanges between low and high latitudes (Vuille and Baumgartner, 1998).

A five-metre-long core (CO_2) recovered in the southern part of the Coipasa basin shows a continuous lacustrine organic-rich sequence (figure 1). Seven AMS radiocarbon ages performed on bulk organic matter situated this lacustrine sequence between $20\,940 \pm 90$ and $17\,870 \pm 70$ ^{14}C yr B.P. (table 1). We have identified 207 diatom taxa in 79 samples. A cluster analysis (CA) was applied to the data set in order to separate groups of samples based on the relative abundance of diatoms (Ward, 1963). The CA yielded 10 groups (table II, figure 2). The VARGAR program is used to determine the dominant and accompanying species for each group (table II). The palaeoecological interpretations are based on 58 modern samples collected in the southern basins of the Bolivian Altiplano. When no modern references were found, we used the literature. For lake level reconstruction, we considered the relative variations of the diatoms based on their living conditions (figure 2). The planktonic species are indicators of deep-water conditions; the periphytic forms of shallow lake, and the fresh tychoplanktonic species of water inputs into the basin.

Diatom assemblages along the core evidenced four major hydrological phases:

1. Between ca. 21 000 and 20 700 ^{14}C yr B.P., the diatom assemblages are dominated by periphytic forms, indicative of a shallow lake. The assemblages, however, change in each sample, except at 455 and 463 cm which contain the same diatom species. This is probably due to fluctuations in salinity.

2. At ca. 20 700 ^{14}C yr B.P., the level of the lake increased (*Chaetoceros* sp.), whereas the salinity decreased (33 – 39 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). After ca. 20 700 ^{14}C yr B.P., the alternation between assemblages I (*Achnanthes delicatula*) and II (*Chaetoceros* sp.) suggests fresh water inputs into a deeper salt lake.

3. Between ca. 19 500 and 18 680 ^{14}C yr B.P., the alternation between assemblage II (*Chaetoceros* sp.) and III (*Amphora coffeaeformis*) suggests stronger lake level fluctuations than during episode 2.

4. Between ca. 18 680 and 17 750 ^{14}C yr B.P., the laminated sediments are characterised by a great variability of the diatom assemblages (I, II, III, IV, V, VI) suggesting strong fluctuations in the hydrological conditions. The waters of the lake have probably oscillated between high and very low levels. In addition, these changes in diatom assemblages imply salinity variations ranging from 10 and 50 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

These results give rise to two major conclusions. 1. Between ca. 21 000 and 17 000 ^{14}C yr B.P., a shallow lake entirely covered the Coipasa basin whereas today a small shallow lake occupies only the northern part. 2. This lake has undergone short term fluctuations of depth and salinity.

A palynological study in Lake Titicaca shows that the level of the lake was at 17 m below its outlet (Ybert, 1992), it had not overflowed into Lake Coipasa. Lake Titicaca basin was thus characterised by a low water level and Coipasa basin by higher water level than today, they have known opposite hydrological conditions. Although this opposition may be partly explained by peculiar local hydrological conditions (e.g. major glacier extension in the northern Bolivian Andes), available data on South America suggest that this opposition reflects general climatic evolution at southern tropical latitudes. The low Titicaca water level is synchronous with a dry phase identified in south-east Amazonia (Carajas) and in Central Brazil (Salitre). As this dry phase was not registered in the Coipasa salar, we suggest that its effects have been obliterated by the increased precipitation which now takes place episodically during the austral winter. This interpretation is in agreement with global climate simulations with a coupled ocean-atmosphere model (Ganopolski et al., 1998) which foresees weaker summer precipitation and some stronger winter precipitation in the southern tropical zones.

1. Introduction

La réponse des régions intertropicales de l'Amérique du Sud au dernier Pléniglaciaire fait l'objet de discussions. En Amazonie, deux carottes, prélevées dans des lacs peu profonds de la région de Carajas dans le Sud-Est du massif forestier, ont révélé une régression de la végétation arborée un peu avant ca. 20 000 ^{14}C ans B.P. (Absy et al., 1991) et un assèchement marqué par un hiatus de sédimentation entre ca. 20 000 et 13 000 ^{14}C ans B.P. (Sifeddine et al., 1994). Par contre, une carotte lacustre provenant du Nord-Ouest de l'Amazonie brésilienne indique

que la forêt dense s'est maintenue dans la région durant le Pléniglaciaire (Colinvaux et al., 1996). Dans les Andes centrales du Pérou, la carotte de glace de Huascarán montre une augmentation de la concentration en poussières attribuée au dernier maximum glaciaire (Thompson et al., 1995). Dans le Brésil central, une carotte provenant d'une dépression marécageuse montre un hiatus de sédimentation entre ca. 28 000 et 17 000 ^{14}C ans B.P., suggérant des conditions climatiques sèches (Ledru, 1993). Dans le Nord de l'Altiplano des Andes boliviennes, deux carottes du lac Titicaca indiquent un bas niveau lacustre entre ca. 21 000 et 18 000 ^{14}C ans B.P. (Ybert, 1992).

Nous montrerons ici, d'après l'étude d'une carotte prélevée dans le Sud de l'Altiplano bolivien, qu'une nappe d'eau peu profonde recouvrait le salar de Coipasa, aujourd'hui presque complètement asséché. Cela met en évidence que le Nord et le Sud de l'Altiplano étaient caractérisés par des situations hydrologiques opposées.

2. Site d'étude

L'Altiplano bolivien se situe entre les Cordillères occidentale et orientale des Andes (15–23°S) à environ 3 800 m d'altitude (figure 1). Ce plateau est soumis à un climat de type tropical montagnard, caractérisé par une longue saison sèche (avril–novembre), et une courte saison humide (décembre–mars). Les précipitations sont alimentées par de la vapeur d'eau issue de l'Atlantique et de l'Amazonie (Ronchail, 1988). Durant l'été austral, cette vapeur d'eau est transportée par les alizés de l'hémisphère nord, ayant une direction approximativement nord–sud après avoir traversé l'équateur. Les précipitations diminuent d'environ 800 $\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$, au nord-est de l'Altiplano, à 100 $\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$ au sud-est. Durant l'hiver austral, les alizés de l'hémisphère sud dominent la circulation des basses couches de l'atmosphère à l'est des Andes. Ils sont alors surmontés par les vents d'ouest de l'hémisphère sud. Ces vents d'ouest sont dominants aux hautes altitudes de l'Altiplano. De rares précipitations ont lieu durant l'hiver austral dans les Andes de Bolivie et du Nord du Chili (Vuille et Baumgartner, 1998).

L'Altiplano bolivien correspond à un vaste bassin endoréique occupé, du nord au sud, par un lac d'eau douce, le lac Titicaca (3 815 m), un lac salé, le lac Poopó (3 686 m) et par de vastes lacs asséchés, les salars de Coipasa (3 657 m) et de Uyuni (3 656 m). Le déversement des eaux du lac Titicaca dans le Rio Desaguadero contribue à l'alimentation du lac Poopó et celui-ci participe à son tour à l'alimentation du salar de Coipasa, durant les années les plus humides. Des dépôts lacustres affleurent sur les bordures de ce salar. Ils correspondent à trois phases de hauts niveaux d'eau : la phase « Minchin » est attribuée à la dernière époque glaciaire, tandis que sa partie supérieure se situerait vers 27 000 ^{14}C ans B.P. (Servant et Fontes, 1978) ; la phase « Taucas » est attribuée au Tardiglaciaire et a culminé entre 13 000 et 12 000 ^{14}C ans B.P. (Servant et al., 1995 ; Sylvestre et al., sous presse) ; la phase « Coipasa » est datée de 9 000–8 000 ^{14}C ans B.P. par la méthode U/Th, les âges radiocarbone (11 400–10 500 ans B.P.) sur carbonates apparaissant plus anciens, en raison d'un effet réservoir de l'ordre de 2 000 ans (Sylvestre et al., sous presse).

3. Matériel d'étude et datations par le radiocarbone

La carotte CO2 a été prélevée dans le Sud-Est du salar de Coipasa (figure 1). Elle montre, entre 490 et 45 cm, des sédiments dont la composition minéralogique est homo-

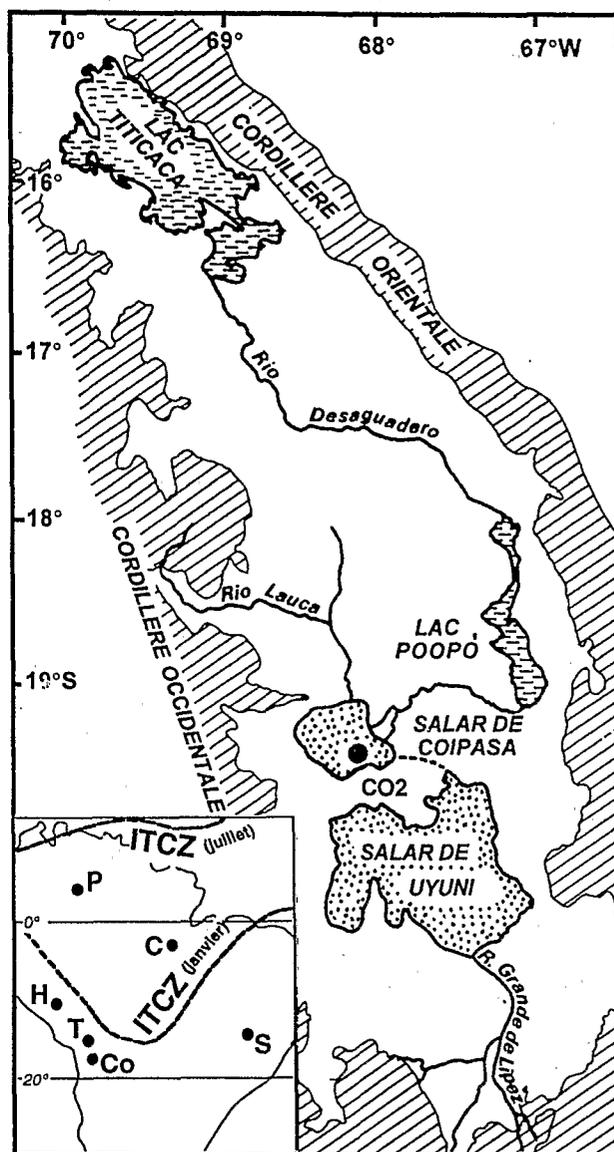


Figure 1. Schéma de l'Altiplano bolivien et localisation des sites d'Amérique du Sud mentionnés dans le texte. P : Pata (0°16'N, 66°41'W) ; C : Carajas (6°20'S, 50°25'W) ; S : Salitre (19°00'S, 46°50'W) ; H : Huascarán (9°06'S, 77°36'W) ; T : Titicaca (15°13'S, 70°02'W) ; CO : Coipasa (19°03'S, 68°30'W).

The Bolivian Altiplano and location of the sites cited in the text. P : Pata (0°16'N, 66°41'W) ; C : Carajas (6°20'S, 50°25'W) ; S : Salitre (19°00'S, 46°50'W) ; H : Huascarán (9°06'S, 77°36'W) ; T : Titicaca (15°13'S, 70°02'W) ; CO : Coipasa (19°03'S, 68°30'W).

gène. L'analyse de 35 échantillons par diffractométrie des rayons X indique des teneurs moyennes de 55,8 % en argiles, 23,7 % en quartz et 18,2 % en feldspaths. Les dépôts sont finement laminés entre 222 et 62 cm et épisodiquement entre 297,5 et 62 cm (figure 2). Sept datations radiocarbone AMS (Beta Analytic, Miami) sur matière organique totale non figurée situent ces dépôts entre 20 940 ± 90 ans B.P. (474,5–476,5 cm) et 17 750 ± 70 ans B.P. (40–42 cm) (tableau 1). Les dépôts précédents sont surmontés par une croûte calcaire ayant été disloquée au moment du carottage. L'âge de 11 130 ± 50 ^{14}C ans

Tableau I. Datations radiocarbone (AMS, à l'exception de l'âge 11 130 ± 50).

Radiocarbon ages (AMS, except 11 130 ± 50).

Profondeur (cm)	Matériel	n° de laboratoire	Âge ^{14}C conventionnel	$\delta^{13}\text{C}/\text{PDB}$
23–36	croûte calcaire	OBDY 1360	11 130 ± 50	1,9
40–42	matière organique	Beta 86766	17 750 ± 90	– 24,9
124,5–126,5	matière organique	Beta 73074	17 870 ± 70	– 22,8
179–181	matière organique	Beta 73075	18 850 ± 100	– 22,4
200–203	matière organique	Beta 73076	18 680 ± 110	– 22,5
227–230	matière organique	Beta 73077	18 420 ± 80	– 22,9
410,5–412,5	matière organique	Beta 73078	20 300 ± 90	– 25,8
476,5–478,5	matière organique	Beta 73079	20 940 ± 90	– 19,4

B.P. obtenu sur cette croûte calcaire suggère qu'elle se rattache à la phase lacustre Coipasa, dont les croûtes calcaires affleurent sur la bordure sud du salar. Cela implique que les dépôts de la phase Tauca ne sont pas représentés dans la carotte CO2 et qu'ils ont disparu par érosion éolienne. Les 23 premiers centimètres sont composés de sédiments argilo-sableux contenant des cristaux de gypse. La croûte de halite qui recouvre le fond du salar n'est pas représentée sur la *figure 2*.

4. Méthodes

La carotte a été échantillonnée en continu avec des cubes de 2 cm de côté. Les diatomées ont été analysées sur la totalité de la tranche du cube dans le sens de la profondeur, afin d'obtenir une moyenne de la flore sur 2 cm d'épaisseur. L'étude des diatomées ne tient pas compte des lamines, car celles-ci, d'épaisseur infra-millimétrique, n'ont pu être prélevées par les techniques classiques d'échantillonnage. La résolution d'échantillonnage obtenue est en moyenne d'un prélèvement tous les 6 cm. Dans 100 à 500 mg de sédiment, un minimum de 500 individus a été compté pour chaque échantillon. Les données ont fait l'objet d'une classification ascendante hiérarchique (CAH), afin de grouper les échantillons sur la base des abondances des espèces de diatomées (Ward, 1963). Pour déterminer les espèces caractérisant chaque classe, nous avons utilisé un programme statistique VARCAR, réalisé par M. Roux. Les interprétations paléocéologiques reposent sur l'étude de 58 échantillons actuels prélevés dans le lac Poopó (Servant-Vildary, 1978), sur la bordure du salar de Uyuni (Sylvestre, 1997) et dans des lacs salés de la région du Lipez, située au sud de la région étudiée (Servant-Vildary et Roux, 1990 ; Sylvestre, 1997). Lorsque les diatomées n'ont pas d'analogues actuels, nous

avons pris des références dans la littérature (Frenguelli, 1929, 1936 ; Bourrelly et Manguin, 1952 ; Hendey, 1964 ; Schoeman, 1973 ; Germain, 1981). Une reconstitution des variations relatives du plan d'eau est obtenue en utilisant les variations relatives des diatomées en fonction de leur habitat (*figure 2*). Les espèces planctoniques sont considérées comme indicatrices de haut niveau lacustre et/ou de surface d'eau libre ; les espèces périphytiques caractérisent des milieux très peu profonds et/ou des nappes d'eau pelliculaires ; les espèces tychoplanctoniques d'eau douce, soit vivant en pleine eau, soit fixées à un substrat, sont considérées comme indicatrices d'apports en eau dans le lac.

5. Résultats

Deux-cent-sept taxons ont été déterminés dans 79 échantillons. La détermination spécifique des diatomées n'a pas été effectuée pour les échantillons situés au-dessus de 77 cm, car les frustules présentent un état avancé de dissolution chimique. La flore est représentée par une abondante flore périphytique, qui présente une grande diversité spécifique (190 espèces). Les formes tychoplanctoniques (12 espèces) et planctoniques (5 espèces) sont plus faiblement représentées (*figure 2*). La classification ascendante hiérarchique (CAH) et le programme VarcAR ont été réalisés sur un ensemble *i* de 207 espèces de diatomées, définies par leur abondance dans un ensemble *j* de 79 échantillons. Le *tableau II* résume les résultats obtenus. La *figure 2* montre, d'une part, la répartition des classes hiérarchiques mises en évidence par la CAH, auxquelles sont associées les espèces dominantes caractéristiques et, d'autre part les variations relatives des espèces périphytiques, tychoplanctoniques et planctoniques. Ces résultats mettent en évidence quatre grandes phases.

Figure 2. Carotte CO2 (3 657 m) : a) datations radiocarbone (* âge estimé à partir des taux de sédimentation) ; b) lithologie simplifiée ; c) classes hiérarchiques (I à X) et distribution des espèces dominantes caractéristiques de chaque classe hiérarchique définies par VARCAR ; d, e, f) variations du pourcentage par échantillon des diatomées périphytiques, tychoplanctoniques et planctoniques.

Core CO2 (3 657 m): a) radiocarbon ages, (* inferred age); b) simplified lithology; c) hierarchical classes (I to X), and distribution of dominant species of each class defined by VARCAR; d, e, f) variations of the percentage for each sample of periphytic, tycho planktonic and planktonic diatoms.

Tableau II. Résultats des analyses statistiques multivariées : a) numéro des classes d'échantillons définies par la classification ascendante hiérarchique (CAH) ; b) numéros des échantillons regroupés par classe hiérarchique ; c) assemblages des diatomées dominantes et des sous-dominantes, définies par le programme VARCAR.

Results of the multivariate analyses: a) number of sample groups defined by the cluster analysis; b) number of samples included in each group; c) dominant and accompanying diatom species defined by the VARCAR program.

a	b	c	
CAH	Échantillons (n° en cm)	Assemblages de diatomées	
		espèces dominantes	espèces accompagnatrices
I	77 151 158 160 176 182 192 292 322 331 345 351 361 367 374 384 433 439	<i>Achnanthes delicatula</i>	<i>Fragilaria pinnata</i> <i>Fragilaria sp.</i> <i>Gyrosigma spencerii</i>
II	103 109 113 119 123 125 188 206 212 216 226 230 242 248 284 288 316 329 341 402 409 415 421 427 445 449	<i>Chaetoceros sp.</i>	<i>Nitzschia frustulum</i>
III	83 127 131 141 147 172 186 234 254 258 262 264 268 272 276 280 299 305 314 479	<i>Amphora coffeaeformis</i> <i>Navicula cincta</i>	<i>Cocconeis placentula</i> <i>Entomoneis paludosa</i>
IV	164 455 463	<i>Navicula salinicola</i>	<i>Nitzschia pusilla</i>
V	81	<i>Cyclotella stelligera</i>	<i>Fragilaria construens subsalina</i>
VI	97 135 145 202	<i>Nitzschia liebetruithii</i>	
VII	89 93 129	<i>Nitzschia compressa compressa</i>	<i>Amphora atacamae</i> <i>Surirella wetzellii</i>
VIII	85	<i>Nitzschia hungarica</i>	<i>Amphora veneta</i> <i>Nitzschia communis</i>
IX	471	<i>Navicula cryptotenella</i>	<i>Amphora atacamana minor</i> <i>Amphora atacamana</i> <i>Navicula carvajalana</i> <i>Denticula subtilis</i>
X	87 783	<i>Navicula subinflatoïdes</i> <i>Navicula phyllepta</i>	<i>Navicula pseudolanceolata</i>

1. Entre environ 21 000 et 20 700 ¹⁴C ans B.P. (487,5–449 cm), la composition des assemblages de diatomées se modifie à chaque profondeur étudiée, à l'exception des relevés situés à 463 et 455 cm. À 483 cm, l'assemblage X est dominé par *Navicula subinflatoïdes* et *N. phyllepta*. Ces diatomées périphtiques couvrent actuellement une large gamme de salinité comprise entre 8 et 267 g·L⁻¹. À 479 cm, l'assemblage III (*Amphora coffeaeformis*, *Navicula cincta*) indique des eaux très peu profondes poly-eurysalines (20 à 40 g·L⁻¹). À 471 cm, l'espèce périphtique oligo-mésosaline *N. cryptotenella* domine l'assemblage IX. Entre 463 et 455 cm, *N. salinicola*, accompagnée de *Nitzschia pusilla* (assemblage IV), indique un milieu hypersalin et très peu profond. Cette succession floristique suggère qu'entre environ 21 000 et 20 700 ¹⁴C ans B.P., le bassin de Coipasa était occupé par une nappe d'eau peu profonde. Les modifications des assemblages de diatomées peuvent s'expliquer par des variations de salinité.

2. À partir d'environ 20 700 ¹⁴C ans B.P. (449 cm), le sédiment contient un pourcentage élevé (82,5 %) de l'espèce planctonique *Chaetoceros sp.* (assemblage II), indi-

quant une élévation du plan d'eau par rapport à la phase précédente. À partir de 445 cm, les dépôts lacustres sont caractérisés par l'alternance de deux assemblages : l'assemblage I, composé par un mélange d'espèces périphtiques (*Achnanthes delicatula*, *Gyrosigma spencerii*) et tychoplanctoniques (*Fragilaria pinnata* et *F. sp.*), caractérise des eaux oligo-mésosalines (0,5 à 20 g·L⁻¹) ; l'assemblage II est dominé par l'espèce *Chaetoceros sp.* Cette alternance suggère des phases d'apports en eau dans le lac (I), se traduisant par une légère diminution de la salinité, suivies par une légère élévation du plan d'eau (II).

3. D'environ 19 500 à 18 680 ¹⁴C ans B.P. (320–206 cm), l'assemblage II (*Chaetoceros sp.*) alterne avec l'assemblage III (*Amphora coffeaeformis*). Cette succession traduit une alternance entre des sédiments mis en place dans un lac pelliculaire (III) ou un lac plus profond (II).

4. À partir d'environ 18 680 ¹⁴C ans B.P. (206 cm), les sédiments sont finement laminés. Bien que les diatomées n'aient pas été étudiées au niveau de chaque lamine, la maille de l'échantillonnage est suffisante pour mettre en évidence une grande variabilité dans la succession des

assemblages VI, I, II, IV, III et V. Cette variabilité indique des modifications rapides de la profondeur et de la salinité, celle-ci étant comprise entre 10 et 50 g·L⁻¹.

6. Discussion et conclusion

Notre étude débouche sur deux observations principales : 1) entre environ 21 000 et 17 800 ¹⁴C ans B.P., un lac peu profond s'étendait sur toute la surface du salar de Coipasa, alors qu'aujourd'hui seule sa partie nord est occupée par une petite nappe d'eau pelliculaire ; 2) ce lac peu profond a connu des fluctuations à court terme du plan d'eau et de la salinité, particulièrement bien marquées avant ca. 20 700 ¹⁴C ans B.P. et entre ca. 18 680 et 17 500 ¹⁴C ans B.P.

Des études antérieures (Ybert, 1992) ont montré que le niveau du lac Titicaca était plus bas qu'actuellement entre ca. 21 000 et 18 000 ¹⁴C ans B.P. et qu'il oscillait durant cette époque autour d'une position moyenne à 17 m en dessous de l'altitude (3 804 m) de l'exutoire. Cela implique que le lac Titicaca ne participait pas à l'alimentation des bassins du Sud de l'Altiplano, contrairement à ce que l'on observe de nos jours. Le bassin du lac Titicaca, caractérisé par un bas niveau d'eau, et le bassin de Coipasa, caractérisé par un niveau d'eau un peu plus élevé qu'actuellement, connaissent des situations hydrologiques opposées.

Les données disponibles en Amérique du Sud suggèrent fortement que cette opposition reflète l'évolution générale du climat aux latitudes tropicales sud du continent. Le bas niveau du lac Titicaca est synchrone d'une phase sèche ayant été identifiée dans le Sud-Est de l'Amazonie (Carajas), de même qu'au Brésil central (Salitre). Cette phase sèche n'ayant pas été enregistrée dans le bassin de Coipasa, nous pensons que ses effets ont été oblitérés dans le

Sud de l'Altiplano par un renforcement des précipitations ayant lieu aujourd'hui épisodiquement durant l'hiver austral. Ces précipitations ont probablement connu d'importantes variations à court terme, qui ont entraîné les changements rapides du niveau d'eau et de la salinité mis en évidence par les assemblages de diatomées. Ces interprétations paléoclimatiques sont en accord avec la simulation du climat global par des modèles couplés océan-atmosphère, qui prennent en compte l'insolation, les teneurs en CO₂ de l'atmosphère et l'extension des glaces continentales (Ganopolski et al., 1998). Ces modèles prévoient un affaiblissement modéré des précipitations de l'été austral et un faible renforcement des précipitations de l'hiver austral aux latitudes tropicales sud.

Les conditions hydrologiques propres à chaque bassin pourraient aussi avoir joué un rôle dans les évolutions respectives du lac Titicaca et du lac Coipasa. L'abaissement du niveau du lac Titicaca a peut-être été renforcé par l'immobilisation des eaux météoriques dans les glaciers, alors largement développés dans le Nord des Andes boliviennes. Cet effet de stockage a été moins marqué dans le Sud, où les glaciers étaient plus petits (Seltzer, 1990). La présence, dans le bassin de Coipasa, d'une nappe d'eau très étendue par rapport à sa profondeur pourrait avoir été facilitée par des températures plus basses qu'actuellement, ayant entraîné une diminution de l'évaporation.

En conclusion, les données disponibles dans le Sud-Est de l'Amazonie, au Brésil central et dans le Nord de l'Altiplano indiquent une diminution des précipitations durant le dernier maximum glaciaire aux latitudes tropicales sud. Cette diminution a probablement été assez faible car la forêt s'est maintenue au cœur du massif forestier amazonien. Ses effets dans le Sud de la Bolivie ont probablement été oblitérés par un renforcement des précipitations d'hiver.

Remerciements. Nous remercions l'université San Andrés de La Paz (UMSA) et l'Orstom pour avoir soutenu la réalisation de cette étude.

7. Références

- Absy M.L., Cleef A., Fournier M., Martin L., Servant M., Sifeddine A., Ferreira da Silva M., Soubies F., Suguio K., Turcq B. et Van der Hammen T. 1991. Mise en évidence de quatre phases d'ouverture de la forêt dense dans le Sud-Est de l'Amazonie au cours des 60 000 dernières années. Première comparaison avec d'autres régions tropicales, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 312, série II, 673–678
- Bourrelly P. et Manguin E. 1952. Algues d'eau douce de la Guadeloupe, Éditions Sedes, France. 276 p.
- Colinvaux P.A., De Oliveira P.E., Moreno J.E., Mille M.C. et Bush M.B. 1996. A long pollen record from lowland Amazonia: forest and cooling in Glacial times, *Science*, 274, 85–88
- Freguelli J. 1929. Diatomées fossiles de la conche saline del deserto cileno-boliviano, *Boll. Soc. Geol. Ital.*, 47, 185–236
- Freguelli J. 1936. Diatomées de la caliza de la Cuenca de Calama, *Rev. Mus. La Plata, secc. Paleontol.*, 1, 3–120
- Ganopolski A., Rahmstorf S., Petoukhov V. et Claussen M. 1998. Simulation of modern and glacial climates with a coupled global model of intermediate complexity, *Nature*, 391, 351–356
- Germain H. 1981. *Flore des diatomées*, Coll. « Faunes et Flores actuelles », Soc. Nouv. Éd. Boubée, Paris, 444 p.
- Hendey N.I. 1964. Bacillariophyceae (Diatoms), in: An introductory account of the smaller algae of British coastal waters, Fishery Investigations, HMSO, London, 4, 317 p.
- Ledru M.P. 1993. Late Quaternary environmental and climatic changes in Central Brazil, *Quat. Res.*, 39, 90–98
- Ronchail J. 1988. Variabilidad del tiempo en Bolivia. La anomalía climática del invierno 1988, *Informe Phicab, Orstom, Senamhi, LMD, IHH*, 15 p.
- Schoeman F.R. 1973. *Systematical and ecological study of the diatom flora of Lesotho with special reference to water quality*, V & R Printers, Pretoria, 355 p.
- Seltzer G.O. 1990. Recent glacial history and paleoclimate of the Peruvian-Bolivian Andes, *Quat. Sci. Rev.*, 9, 137–152
- Servant M. et Fontes J.-C. 1978. Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes et de leurs piedmonts amazoniens au Quaternaire, *Cah. Orstom, sér. Géol.*, 10 (1), 9–23

Servant M., Fournier M., Argollo J., Servant-Vildary S., Sylvestre F., Wirrmann D. et 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, 729–736

Servant-Vildary S. 1978. Les diatomées des sédiments superficiels d'un lac salé, chloruré, sulfaté sodique de l'Altiplano bolivien, le lac Poopò, *Cah. Orstom, sér. Géol.*, 10 (1), 79–90

Servant-Vildary S. et Roux M. 1990. Multivariate analysis of diatoms and water chemistry in Bolivian saline lakes, *Hydrobiologia*, 197, 267–290

Sifeddine A., Fröhlich F., Fournier M., Martin L., Servant M., Soubiès F., Turcq B., Suguio K. et Volkmer-Ribeiro C. 1994. La sédimentation lacustre indicateur de changements des paléoenvironnements au cours des 30 000 dernières années (Carajas, Amazonie, Brésil), *C. R. Acad. Sci. Paris*, 318, série II, 1645–1652

Sylvestre F. 1997. La dernière transition glaciaire–interglaciaire (18 000–8 000 ^{14}C ans B.P.) dans les Andes tropicales sud (Bolivie) d'après l'étude des diatomées. *Thèse*, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, 314 p.

Sylvestre F., Servant M., Servant-Vildary S., Causse C. et Fournier M. Lake-level chronology in the south Bolivian Altiplano (18–23°S) during Late-Glacial and Early Holocene times based on radiocarbon, U/Th ages and diatom studies, *Quat. Res.*, sous presse

Thompson L.G., Mosley-Thompson E., Davis M.E., Lin P.N., Henderson K.A., Cole-Dai J., Bolzan J.F. et Liu K. 1995. Late Glacial Stage and Holocene tropical ice core records from Huascarán, Peru, *Science*, 269, 46–50

Vuille M. et Baumgartner M.F. 1998. Monitoring the regional and temporal variability of winter snowfall in the arid Andes using digital NOAA/AVHRR data, *Geocarto. International*, 13, 59–67

Ward J.H. 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function, *J. Am. Stat. Assoc.*, 58, 236–244

Ybert J.-P. 1992. Ancient lake environments as deduced from pollen analysis, in : Dejoux C. et Iltis A. (éds), *Lake Titicaca, a Synthesis of Limnological Knowledge*, Kluwer Acad. Pub., 49–62