

La dernière transition glaciaire/interglaciaire des Andes tropicales sud (Bolivie) d'après l'étude des variations des niveaux lacustres et des fluctuations glaciaires

Michel Servant, Marc Fournier, Jaime Argollo, Simone Servant-Vildary, Florence Sylvestre,
Denis Wirmann et Jean-Pierre Ybert

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 320, série II a,
p. 729 à 736,
1995

Résumé Une comparaison entre les variations des niveaux lacustres dans le bassin de Uyuni-Coipasa et les fluctuations glaciaires dans la Cordillère Orientale montre que les lacs et les glaciers ont simultanément enregistré les changements des précipitations. Un intense maximum lacustre (~ 13-12 ¹⁴C ka BP) a eu lieu aux latitudes tropicales sud de la Bolivie, 4 000 à 6 000 ans avant le maximum lacustre de l'Afrique nord-équatoriale.

Mots-clés : Andes, Bolivie, Tardiglaciaire, Niveaux lacustres, Glaciers.

M. S. et M. F. : ORSTOM,
72, route d'Aulnay,
93143 Bondy Cedex, France ;

J. A. : Facultad de Geología, UMSA,
Casilla 8653, La Paz, Bolivia ;

S. S-V et F. S. : Antenne ORSTOM,
Laboratoire de Géologie, MNHN,
43, rue Buffon, 75005 Paris, France ;

D. W. : Mission ORSTOM, BP 1857,
Yaoundé, Cameroun ;

J-P. Y. : Instituto de Biologia, UFR,
CEP 21941, Rio de Janeiro, Brésil.

Abstract **The last glacial/interglacial transition in the South Tropical Andes (Bolivia) based on comparisons of lacustrine and glacial fluctuations**

Comparisons between lake level variations in the Uyuni-Coipasa basin and the glacial fluctuations in the Eastern Cordillera show that lakes and glaciers have simultaneously registered changes in precipitation. The strong lacustrine maximum (~13-12 ¹⁴C ka BP) appeared 4-6,000 years before the highest lake levels in North Africa.

Keywords: Andes, Bolivia, Late Glacial, Lake-levels, Glaciers.

Abridged English Version **INTRODUCTION**

PREVIOUS studies on the Late Quaternary in the Bolivian Andes (Servant and Fontes, 1978) revealed important lake level rise (Tauca phase) during the last glacial/interglacial transition. The Tauca phase has a regional significance: it extends from ~ 23°S, in Northern Chile (Messerli *et al.*, 1993), to ~ 16°S in the Titicaca basin (Wirmann *et al.*, 1992; Ybert, 1992). Our objective is to establish a detailed chronology for the Tauca phase. Lake and glacier response to climatic changes is discussed by comparing lake level and glacial fluctuations. The Bolivian Andes are composed of the Western and the Eastern Cordilleras, separated by a large endoreic basin (figure 1). The catchment area of

the northern part of the basin is occupied by large glaciers, water drainage into Lake Titicaca and flows out through the Desaguadero river. The southern part is occupied by Lake Poopó and by the Uyuni-Coipasa salars. They are fed by the Desaguadero River and by the drainage of the southern catchment area.

LACUSTRINE FLUCTUATIONS

The Tauca deposits were studied on seven new outcrops located on the margin of the Uyuni-Coipasa basin (figure 1). At 3,657 ± 3 m altitude, sections PJ and T are composed of three units which are successively from the base to the top : 1) clay and diatomites (T), 2) fluviatile sands (F) and 3) calcareous crust with algal bioherms (C). At 3,690 ± 5 m, unit T

Note

présentée par
Claude Lorius.

remise le 8 décembre 1994,
acceptée après révision
le 13 février 1995.

is the only one represented : at the base it is composed of laminated diatomites (TI/TII) with a diatom flora of shallow water-level. On the top it is composed of diatomites (TIII) with planktonic diatoms indicating increasing water-level. Unit TIII is widespread in several other sites (CA for example) until about 3,735 m altitude. 39 radiocarbon dates are interpreted, taking into account the regional geological context, the isotopic and mineralogical composition of the carbonates and the consistency with the local stratigraphy. Only 6 samples are suspected to have been contaminated by more recent inorganic carbon. The transgressive layers of the Tauca deposits were dated at different altitudes on several outcrops. Radiocarbon ages are successively younger as distance from the salar floor and altitude increase : 15.4 ka BP at 3,657 ± 3 m, 13.5 ka BP at 3,690 ± 5 m, 13.0 ka BP at 3,735 ± 5 m and 12.2 ka BP at 3,745 ± 5 m elevation (figure 2 B). They very coherently mark out the successive steps of increasing water levels, the uppermost one indicated by bioherms at 3,740-3,760 m. The maximum lacustrine extension is characterized by synsedimentary reworkings containing a mixture of planktonic diatoms and shallow water flora (Characeae debris). The 21 radiocarbon ages for this maximum lacustrine episode are confined to a short time interval (13-11.8 ka BP). The fluvatile sands (F) indicate a water level drop of 100 m to at least 3,660 m elevation. Non-reworked Gastropod shells in the sands are dated 11.9 ka BP. The lacustrine crust with bioherms (C) containing shallow water diatoms indicates a moderate elevation of the lake between 11.3-10.4 ka BP. We assume that the lake dried after 10.4 ka BP because Lake Titicaca was low before 9.6 ka BP (Ybert, 1992).

GLACIAL FLUCTUATIONS

The glacial valleys of the Eastern Cordillera have a series of terminal moraines M1, M2 and M3, respectively located at 15, 9 and 6 km average from the present glaciers (Gouze *et al.* 1986). These moraines were also observed in the same morphological positions in Southern Peru (Mercer *in Seltzer*, 1990). The moraines M1 represent the last period of the maximum extension of the glaciers, overlying organic deposits dated 23 ka BP (Herail, 1991). In the

Rio Kollpaña (17°18'S; 65°45'N) there is new evidence for a temporary glacial retreat within the period M1. The retreat is dated 18.2 to 15.2 ka BP (Servant *et al.* in progress). Thus the last glacial maximum (M1) can be divided into two glacial readvances (M1a and M1b). In southern Peru, peat deposits located behind the moraines M1 indicate that the last glacial maximum is older than 14.5 ka BP. The moraines M2 and M3 indicate that two glacier readvances were superimposed on a general trend of glacier retreat (figure 2 C). They are not dated in Bolivia, but by comparison with southern Peru they are dated respectively a little after 13.9 and 11 ka BP. A peat deposit (9.9 ka BP), located near the present day glacier indicates a strong glacial retreat near the Pleistocene/Holocene boundary.

DISCUSSION AND CONCLUSION

The glacial advances M1b, M2 and M3 correspond with increasing lake level steps I, II/III and V respectively (figure 2). These results corroborate the scenario of Hastenrath and Kutzbach (1985) which relates glacial advances and lacustrine phases to enhanced precipitation. The glacier retreat at 18.2 ka BP coincides with Titicaca low water levels.

Lake fluctuations in Bolivia are different from North Africa but are comparable with Southwestern USA (Lahontan basin). In Africa, lake level increased slightly (Petit-Maire, 1992) during the Late-Glacial and did not culminate until 8-6 ka BP. In the Lahontan basin, high lake levels occurred at ~ 13 ka BP and decreased strongly at ~ 12 ka BP (Benson *et al.*, 1992) as in Bolivia. The general trend of glacial retreat in South Tropical Andes is in good agreement with the global increased temperature after the global Last Glacial Maximum. Moreover, the glacial readvance at ~ 15 ka BP and the glacial retreat at ~ 14.5 ka BP are synchronous with comparable events detected at higher latitudes both in North (36-48°N) and South (40°S) American continent (Broecker and Denton, 1989). However, Bolivian glacial fluctuations have been complicated by precipitation, in particular the glacial retreat at 18 ka BP during the global Last Glacial Maximum and the glacial readvances during the Early Late Glacial. The glacial readvance that

culminated a little after 11 ka BP (M3) and the associated moderate lacustrine phase occurred at about the same time as Younger

Dryas, but without independent temperature reconstructions, it is not possible to detect a drop in temperature in Bolivia.

INTRODUCTION

Les variations des niveaux lacustres des régions tropicales sont considérées comme de bons indicateurs des changements du climat et plus précisément du facteur $P-E$ (Précipitation moins Evaporation), mais elles peuvent être liées en montagne à des apports d'eau de fonte des glaciers, antérieurement accumulée sur les hauts reliefs. Il est nécessaire en ce cas d'appréhender les modifications du climat simultanément au travers des fluctuations lacustres et des fluctuations glaciaires. C'est ce que nous effectuerons ici sur l'exemple des Andes de Bolivie (figure 1). Celles-ci comprennent d'Ouest en Est trois unités morphologiques : la Cordillère Occidentale, l'Altiplano et la Cordillère Orientale. Dans le Nord de l'Altiplano, le Lac Titicaca (altitude : 3 810 m) draine de très hauts reliefs occupés par de grands glaciers. Il se déverse dans le rio Desaguadero qui débouche au Sud dans le bassin fermé du Lac Poopó et des salars de Uyuni et Coipasa (altitude : 3 653 m). Les bassins lacustres ont évolué entre 20 et 9 ka BP en trois grandes étapes : 1) un bas niveau du Lac Titicaca (Ybert, 1992) coïncide avec le dernier maximum glaciaire global (~ 18 ka BP); 2) de très hauts niveaux lacustres (phase Tauca) dans le bassin de Uyuni-Coipasa se rattachent au Tardiglaciaire (Servant et Fontes, 1978); 3) un abaissement du Lac Titicaca est proche de la limite Pléistocène/Holocène (Wirrmann et al., 1992). La phase Tauca a été repérée aussi dans le Nord du Chili vers 23°S (Messerli et al., 1993). La présente Note se propose trois objectifs : évaluer précisément les variations lacustres du bassin de Uyuni-Coipasa, reconstituer les fluctuations glaciaires sur la base d'observations déjà disponibles ou encore inédites et situer, dans le cadre de la chronologie radiocarbone, les évènements lacustres et glaciaires par rapport aux chronologies établies à d'autres latitudes.

FLUCTUATIONS LACUSTRES

Stratigraphie régionale et datations radiocarbone

Les dépôts lacustres ont été étudiés sur des affleurements de la bordure du bassin de Uyuni-Coipasa (figure 1). A 3 657 ± 3 m d'altitude, les affleurements PJ et T comprennent trois unités successives : des diatomites argileuses (T) à la base, des sables fluviaux (F) dans la partie moyenne et une croûte calcaire à biohermes algaires (C) au sommet. A 3 690 ± 5 m, l'unité T est la seule représentée. Nous y distinguons à la base des diatomites laminées (TI/II) à flore d'eau peu profonde, au sommet des diatomites à flore planctonique (TIII). A 3 745 ± 5 m d'altitude, des biohermes algaires sont corrélés aux dépôts TIII car ils contiennent les mêmes diatomées planctoniques. Quelques biohermes observés à 3 760 ± 5 m d'altitude suggèrent que le niveau de l'ancien lac a atteint cette altitude. Ces observations apportent deux faits nouveaux : les plus hauts témoins de la phase Tauca, auparavant observés à 3 720 m

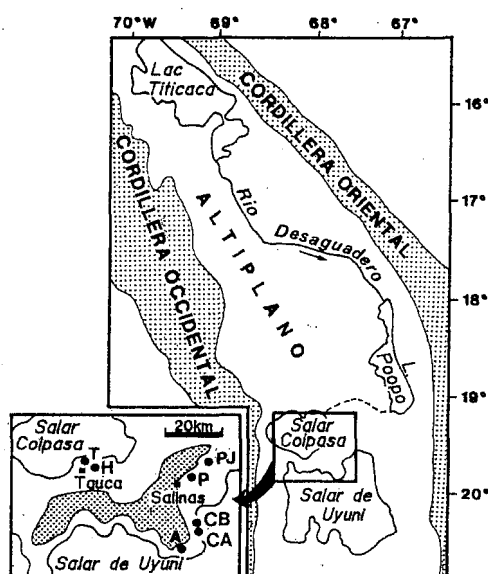


Figure 1. Localisation des sites étudiés.

Location of studied sites.

PJ : Pakollo Jahuira; T : Ticaña;
CB : Churacari Bajo; CA: Churacari
Alto; A : Alianza; H : Huacuyo;
P : Pisalaque.

d'altitude, sont maintenant connus à de plus hautes altitudes (~ 3 745 ou ~ 3 760 m); les sables fluviatiles F, situés près du fond du bassin, impliquent un bas niveau lacustre; la croûte calcaire C marque une élévation du plan d'eau. 39 datations par le radiocarbone ont été réalisées sur carbonates (tableau). L'extension négligeable des formations géologiques calcaires dans le bassin versant permet d'admettre qu'il n'y a pas eu vieillissement apparent des sédiments lacustres par incorporation de carbone inorganique ancien. Par contre, un rajeunissement apparent par du carbone inorganique récent doit être envisagé pour six échantillons (tableau) dont les âges ne sont pas cohérents avec la stratigraphie locale. Ce rajeunissement s'explique probablement par des phénomènes de recristallisation, mais ceux-ci ne sont clairement apparents à l'examen microscopique que pour deux de ces six échantillons.

La transgression et l'optimum hydrologique du lac Tauca (figure 2 B)

Les niveaux transgressifs de la base des dépôts Tauca ont été datés sur plusieurs affleurements à différentes altitudes. Les âges radiocarbone se révèlent de plus en plus récents, au fur et à mesure que l'on s'éloigne du fond du bassin : 15,4 ka BP à 3 657 ± 3 m d'altitude, 13,5 ka BP à 3 690 ± 5 m, 13,0 ka BP à 3 735 ± 5 m et 12,2 ka BP à 3 745 ± 5 m. Ils jalonnent de manière très cohérente les phases successives de l'élévation du plan d'eau. La phase I est marquée près des salars actuels (sites PJ et T) par une couche à aragonite (15,4 ka BP), située à 14 m au-dessus de ce qui était le fond du bassin avant la mise en place, dans le salar de Uyuni, d'une couche holocène d'évaporites de 10 m d'épaisseur. Cela implique que le lac avait déjà une profondeur d'environ 14 m au centre du bassin à 15,4 ka BP. La phase II est enregistrée à 3 690 ± 5 m d'altitude (sites P et CB) par des sédiments laminés à characées non remaniées et à diatomées épiphytes et benthiques d'eau peu profonde. Datés de 13,5 ka BP dans la partie supérieure, ces sédiments correspondent, en raison de leur épaisseur (120 cm), à une

tranche de temps assez longue (1 000 ans ?) durant laquelle le niveau du lac s'est maintenu à peu près à la même altitude. La phase III débute par une élévation brusque du niveau lacustre : les diatomées épiphytes et benthiques de l'étape précédente sont abruptement remplacées un peu avant 13 ka BP par des diatomées planctoniques (site CB). Le plan d'eau a alors atteint au moins l'altitude où se situent actuellement les plus hauts sédiments lacustres (~ 3 740 m, site CA). Mais à 3 745 ± 5 m d'altitude, des biohermes algaires (12,2 ka BP), contenant des diatomées planctoniques, indiquent que le lac s'est élevé à de plus hautes altitudes (probablement 3 760 m). Le maximum lacustre a été accompagné par des remaniements syn-sédimentaires sur les pentes du fond de l'ancien lac. Ces remaniements sont matérialisés par des mélanges d'une flore planctonique (diatomées) et d'une flore de milieu peu profond (débris de characées associés à des mollusques d'écologie indéterminée). Les 21 âges radiocarbone qui concernent la phase III sont groupés sur une courte tranche de temps (~ 13-11,8 ka BP). Pour 5 prélèvements, les âges déterminés au sein d'un même échantillon, sur des characées d'une part et sur des coquilles d'autre part, se révèlent légèrement différents (cela s'explique probablement par les mélanges dus aux remaniements), mais ils restent compris entre 13 et 11,8 ka BP.

L'événement régressif Ticaña

Les sables fluviatiles F montrent que le niveau du lac s'est abaissé d'au moins 100 m par rapport à la phase III précédente. Un âge de 11,9 ka BP déterminé sur gastéropodes non remaniés, identique aux âges les plus récents des dépôts lacustres antérieurs, suggère que l'abaissement du plan d'eau s'est réalisé durant une très courte période.

L'événement lacustre Coipasa

La croûte calcaire à biohermes (C), qui repose sur les sables F, contient des diatomées épiphytes et benthiques et des characées en position biologique, caractéristiques d'un milieu peu profond. Cette croûte

Tableau Liste des datations par le radiocarbone et situation dans la stratigraphie du bassin de Uyuni-Coipasa.

List of radiocarbon ages and location in the stratigraphy of the Uyuni-Coipasa basin.

Stratigraphie locale (Uyuni-Coipasa)		N°	N° Laboratoire	Site (fig. 1)	Altitude (m)	Matériel	$\delta^{18}\text{O}/\text{PDB}$ (‰)	Âges ^{14}C (corrigés ^{13}C)
Évènement lacustre Coipasa (Croûte calcaire C)	V	42	Orsay (*)	C	~ 3 660	(4)	-	10 450 ± 160
		92/11	OBDY 1 055	PJ	~ 3 657	(4)	-9,38	10 580 ± 50
		91/5	OBDY 927	PJ	~ 3 657	(4)	-9,57	10 760 ± 50
		92/3	OBDY 1 046	T	~ 3 660	(4)	-10,20	10 810 ± 50
		126	Orsay (*)	PJ	~ 3 660	(4)	-	10 830 ± 180
		92/10	OBDY 1 045	PJ	~ 3 660	(4)	-9,65	11 020 ± 60
		92/3	OBDY 1 057	T	~ 3 660	(4)	-10,39	10 960 ± 50
91/1	OBDY 925	PJ	~ 3 660	(4)	-9,46	11 390 ± 50		
Évènement sec Ticaña (Sables F)	IV	93/17	OBDY 1 290	T	~ 3 657	(1)	-	11 980 ± 50
Phase lacustre Tauca (Dépôts lacustres T)	III	230	Orsay (*)	H	~ 3 695	(1)	-	11 730 ± 350
		92/8	OBDY 1 035	CB	~ 3 690	(2)	-12,16	11 860 ± 60
		92/8	OBDY 1 025	CB	~ 3 690	(1)	-11,53	12 880 ± 70
		91/13	OBDY 911	H	~ 3 700	(1)	-11,82	11 920 ± 40
		91/13	OBDY 914	H	~ 3 700	(2)	-12,57	12 090 ± 40
		876	OBDY 364	A	~ 3 745	(1)	-10,65	12 100 ± 370
		86/113	OBDY 257	H	~ 3 720	(1)	-10,85	12 210 ± 270
		876	OBDY 997	A	~ 3 657	(2)	-9,57	12 870 ± 50
		92/2	OBDY 1 049	H	~ 3 740	(3)	-11,31	12 290 ± 50
		93/22	OBDY 1 214	M	~ 3 745	(3)	-	12 270 ± 50
		91/7	OBDY 919	CB	~ 3 690	(1)	-10,96	12 380 ± 50
		91/7	OBDY 916	CB	~ 3 690	(2)	-11,91	12 990 ± 40
		91/14	OBDY 918	H	~ 3 690	(1)	-10,48	12 390 ± 50
		90/13	OBDY 700	CB	~ 3 690	(2)	-11,82	12 490 ± 80
		90/13	OBDY 681	CB	~ 3 690	(1)	-11,39	12 830 ± 80
		91/10	OBDY 929	CA	~ 3 735	(2)	-11,75	12 560 ± 160
		91/10	OBDY 923	CA	~ 3 735	(1)	-11,01	12 930 ± 50
		40	Orsay (*)	C	~ 3 720	(1)	-	12 790 ± 120
		93/18/A	Beta	T	~ 3 660	(1)	-	12 960 ± 60
			73 080 (**)					
	91/9	OBDY 926	CA	~ 3 735	(1)	-10,63	13 030 ± 80	
	93/18/B	Beta	T	~ 3 660	(1)	-	13 130 ± 60	
		73 081 (**)						
	II	92/9	OBDY 1 007	P	~ 3 690	(2)	-11,56	13 620 ± 60
		91/6	OBDY 879	CB	~ 3 690	(2)	-11,26	13 530 ± 50
	I	91/4/B	Beta 73 088	PJ	~ 3 657	(6)	-	15 430 ± 80
Échantillons présumés recristallisés	(III)	91/8	OBDY 969	CB	~ 3 690	(5)	-15,56	11 300 ± 60
	(III)	91/12	OBDY 924	PJ	~ 3 658	(4)	-14,59	6 950 ± 50
	(III)	92/5	OBDY 1 037	TJ	~ 3 700	(3)	-11,46	9 970 ± 50
	(III)	92/4	OBDY 1 058	TJ	~ 3 700	(1)	-10,92	11 050 ± 70
	(I)	91/4/A	OBDY 928	PJ	~ 3 658	(4)	-12,09	13 570 ± 50
(I)	91/2	OBDY 930	PJ	~ 3 660	(4)	-11,08	14 450 ± 50	

calcaire marque une oscillation positive modérée du lac. Elle est datée de 11,3 à 10,4 ka BP. Nous ne connaissons pas l'évolution du bassin après 10,4 ka BP, mais nous

présumons que celui-ci s'est asséché avant 9,6 ka BP, car on sait que le lac Titicaca se situait alors en dessous de son exutoire (Ybert, 1992).

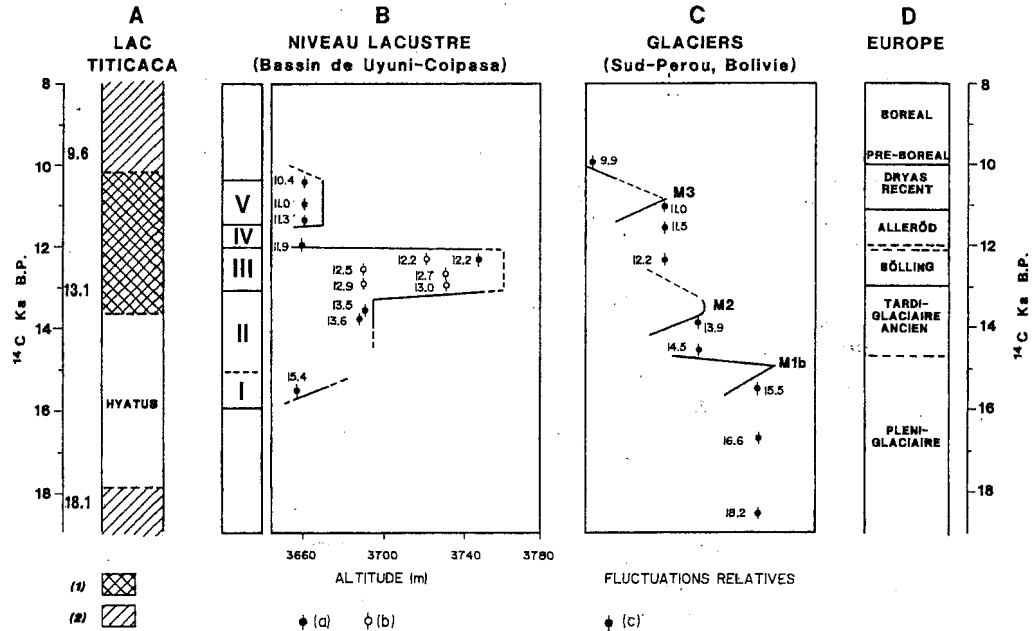
(*) D'après Servant et Fontes (1978) après correction ^{13}C . (1) coquilles de mollusques ; (2) characées ; (3) stromatolithes ; (4) croûtes calcaires microcristallines ; (5) sédiments calcaires ; (6) aragonite. Les coquilles 93/18 (**) ont été prélevées dans les sables F ; elles sont manifestement remaniées des dépôts antérieurs de la phase III. Les échantillons 91/8 et 91/12 présentent des teneurs ^{18}O anormalement basses qui suggèrent une recristallisation des carbonates. Les croûtes calcitiques 91/4A et 91/2 (plus récentes de 1 860 à 980 ans que l'aragonite 91/4B considérée comme authigène qui leur est associée) sont certainement en partie recristallisées. Les coquilles 92/4 et les stromatolithes 92/5, prélevés sur le même site, affichent des âges sans relation cohérente avec la stratigraphie régionale. Les characées et les coquilles de la phase III ont été remaniées sur le fond de l'ancien lac et ne donnent pas d'indications paléobathymétriques.

(*) Servant and Fontes (1978) after correction ^{13}C . (1) mollusc shells; (2) characeae; (3) stromatolites; (4) calcareous microcrystalline crusts; (5) calcareous sediments; (6) aragonite. Shells 93/18 (**) locally concentrated in the sands F are evidently reworked from older deposits (phase III). Samples 91/8 and 91/12 having ^{18}O values lower than the ones obtained for the other samples suggest that carbonates are recrystallized. Calcitic crusts 91/4A and 91/2 (having ages more recent by 1860 to 980 years than the associated aragonite 91/4B considered as authigenous) are certainly in part recrystallized. Shells 92/4 and the stromatolites 92/5, sampled in the same site, have ages which are not consistent with the regional stratigraphy. Characeae and shells of phase III have been reworked on the bottom of Lake Tauca and do not give information on the palaeobathymetry.

Orsay : Laboratoire d'Hydrologie et Géochimie Isotopique, Université d'Orsay ; Beta : Beta Analytic Inc.;

OBDY : Laboratoire des Formations Superficielles, ORSTOM.

Figure 2 Comparaison entre : A) les grandes étapes de l'évolution du lac Titicaca, B) les variations du niveau lacustre dans le bassin de Uyuni-Coipasa, C) les fluctuations glaciaires relatives du Sud du Pérou et de la Bolivie, et D) la chronologie européenne. (1) niveau du lac Titicaca proche de sa position actuelle ; (2) bas niveau du lac Titicaca ; (a) âges radiocarbone sur carbonates non remaniés ; (b) âges sur characées ou mollusques transportés sur le fond de l'ancien lac ; (c) âges radiocarbone sur matière organique (tourbes). Seuls quelques âges radiocarbone sont représentés (voir liste complète sur le tableau).



Comparison between : A) the main steps of Lake Titicaca fluctuations, B) lake-level in the Uyuni-Coipasa basin, C) glacial relative fluctuations in southern Peru and Bolivia, and D) European chronology.

(1) level near the present day level; (2) low water level of Lake Titicaca; (a) radiocarbon ages on non-reworked carbonate; (b) ages for Characeae and molluscs reworked on the bottom of the lake; (c) ages on organic matter (peat). Only a few ages are indicated in figure (see complete data in table).

FLUCTUATIONS GLACIAIRES

La figure 2 C présente une reconstruction des fluctuations des glaciers d'après les observations faites sur les moraines de différentes vallées glaciaires dans le Sud du Pérou (Mercer *in* Seltzer, 1990) et en Bolivie (Gouze *et al.*, 1986). Les datations par le radiocarbone, réalisées sur des tourbes localement observées sous les dépôts glaciaires ou en arrière des moraines, donnent les âges limites inférieurs ou supérieurs des phases culminantes des avancées glaciaires; les amplitudes des avancées glaciaires, très variables selon les vallées, sont exprimées de manière relative. Au NE du lac Titicaca, les moraines M1, M2 et M3 sont situées respectivement à 15, 9 et 6 km en moyenne des glaciers actuels.

La dernière période d'extension maximale des glaciers. Elle est représentée dans toutes les vallées par un groupe de moraines (M1 en Bolivie) postérieures à 27 ka BP (Gouze *et al.*, 1986) ou 23 ka BP (Hérail *et al.*, 1991) et antérieures à 14,5 ka BP (Mercer *in* Seltzer, 1990). Ce groupe de moraines présente une morphologie assez complexe (il comprend selon les vallées un ou deux principaux arcs morainiques). Dans le rio de la Laguna Kollpa Kkota, l'arc morainique le

plus externe est antérieur à des couches organiques datées de 17-19 ka BP (Seltzer, 1993) ; dans le rio Kolpaña (17°18' S; 65°45' W), il est antérieur à des tourbes datées de 18,2 à 15,5 ka BP (Servant et Argollo, en préparation). Ces tourbes sont elles-mêmes surmontées par des moraines impliquant une nouvelle avancée des glaciers après 15,5 ka BP. En raison de leur position morphologique, ces moraines se rattachent au groupe M1 et nous estimons par corrélation avec le Sud du Pérou (Seltzer, 1990) qu'elles sont antérieures à 14,5 ka BP. Finalement, la dernière période d'extension maximale des glaciers doit être subdivisée en deux maximums glaciaires (moraines M1a et M1b), séparés par un retrait momentané entre ~ 19 et 15,5 ka BP.

La période de déglaciation. Les observations faites dans le Sud du Pérou montrent que la déglaciation a débuté un peu avant 14,5 ka BP et qu'elle a été accidentée par deux réavancées glaciaires dont les phases maximales sont situées respectivement un peu après 13,9 ka BP et 11 ka BP. Ces deux réavancées glaciaires sont également bien visibles en Bolivie (moraines M2 et M3). Un recul des glaciers jusqu'à leurs limites actuelles a été daté d'un peu plus de 9,9 ka BP au Pérou. Il est proche d'une

phase climatique caractérisée en Bolivie par des températures un peu plus élevées qu'actuellement avant 9,6 ka BP (Servant-Vildary et Roux, 1990).

COMPARAISON ENTRE LES FLUCTUATIONS DES LACS ET DES GLACIERS

La figure 2 permet de comparer les changements majeurs du lac Titicaca (A), les variations du niveau lacustre dans le bassin de Uyuni-Coipasa (B) et les fluctuations majeures relatives des glaciers (C). Les corrélations sont encore difficiles à préciser autour de 14,5, 13 et 12 ka BP. Par contre, il est établi que 1) les bas niveaux du Lac Titicaca (18,1 ka BP) coïncident avec le retrait des glaciers vers 18,2 ka BP, 2) l'élévation des plans d'eau vers 15,4 ka BP est proche de l'avancée glaciaire qui a culminé un peu après 15,5 ka BP, 3) l'avancée glaciaire qui a culminé juste après 11 ka BP est corrélée à une remontée du niveau lacustre dans le bassin de Uyuni-Coipasa, 4) le recul des glaciers un peu avant 9,9 ka BP est proche d'un intense abaissement du niveau du lac Titicaca avant 9,6 ka BP. Ces corrélations indiquent que les phases lacustres, associées à des avancées glaciaires, ne s'expliquent pas par une augmentation des apports en eau antérieurement accumulée dans les glaciers. Nous pouvons donc admettre, en accord avec un scénario antérieurement proposé par Hastenrath et Kutzbach (1985), que ces phases lacustres ont enregistré une augmentation du paramètre *P-E* (Hastenrath et Kutzbach suggèrent que les précipitations étaient supérieures de 300 mm/an par rapport à leurs valeurs actuelles pour un niveau lacustre à 3 740 m). Les fluctuations glaciaires ont enregistré les changements de précipitations, mais on ne peut pas les relier pour le moment aux variations régionales de la température, car celles-ci ne sont pas encore évaluées pour la dernière époque glaciaire dans les Andes de Bolivie.

COMPARAISON AVEC D'AUTRES RÉGIONS

En Afrique nord-équatoriale (Petit-Maire, 1992), dans le domaine de la mousson

boréale, l'élévation des nappes d'eau continentale a été modérée durant la dernière transition glaciaire/interglaciaire (alors qu'elle a été très forte dans les Andes tropicales sud de Bolivie) et c'est seulement à 8-6 ka BP qu'elle a atteint son maximum (le Lac Titicaca était alors plus bas qu'actuellement, Mourguiart *et al.*, 1992). Dans le SW des USA (~ 41°N), les hauts niveaux lacustres sont antérieurs à l'Holocène (Benson *et al.*, 1992); les analogies les plus fortes avec la Bolivie sont observées dans le bassin du lac Lahontan : une élévation du plan d'eau vers 15,5 ka BP a atteint son maximum vers 13 ka BP; un abaissement du niveau lacustre qui a culminé vers 12-11,5 ka BP a été suivi par une oscillation positive modérée centrée sur 11 ka BP.

Les fluctuations des glaciers de Bolivie et du Sud du Pérou présentent de fortes analogies avec les hautes latitudes. L'avancée des glaciers qui a culminé vers 15 ka BP et leur retrait vers 14,5 ka BP sont proches d'événements similaires observés dans le Nord (38°-48°N) et le Sud (40°S) du continent américain (Broecker et Denton, 1989). L'avancée glaciaire qui a culminé vers 11 ka BP est proche de la phase froide du Dryas récent (11-10 ka BP), initialement observée en Europe (figure 2 D) et aujourd'hui connue dans d'autres régions des deux hémisphères. Le retrait intense des glaciers un peu avant 9,9 ka BP pourrait coïncider avec l'élévation brusque de la température qui a été observée dans de nombreux enregistrements à la limite Pléistocène/Holocène.

CONCLUSIONS

1) Les bas niveaux du lac Titicaca à 18 ka BP montrent que les conditions climatiques sèches qui ont été repérées dans de nombreuses régions tropicales lors du dernier maximum glaciaire global ont également eu lieu à 16°S dans les Andes. Elles ont pu contribuer à un retrait des glaciers. 2) Des conditions plus humides sont apparues dès 15,5 ka BP à 20°S dans les Andes de Bolivie. Elles ont culminé à 13-12 ka BP. En Afrique nord équatoriale, le maximum de l'humidité a eu lieu plus tardivement durant l'Holo-

cène. 3) Une oscillation lacustre positive (11,3-10,4 ka BP) et une avancée concomitante des glaciers en Bolivie semblent pouvoir être corrélées avec le Dryas récent. 4) Par comparaison avec le SW des USA (lac Lahontan), les fluctuations lacustres du bas-

sin de Uyuni-Coipasa suggèrent une évolution spécifique à la partie ouest du continent américain vers 41°N et 20°S durant le Tardiglaciaire. Nous en discuterons les implications paléoclimatiques dans une publication ultérieure.

Cette étude, réalisée dans le cadre de la coopération scientifique UMSA/ ORSTOM-UR12, a été encouragée par le Dr L. A. Rodrigo et le Dr O. Ballivián.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BENSON, L., CURREY, D., LAO, Y. et HOSTETLER, S., 1992. Lake-size variations in the Lahontan and Bonneville basins between 13,000 and 9000 ¹⁴C yr BP, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 95, p. 19-32.
- BROECKER, W. S. et DENTON, G. H., 1989. The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 53, p. 2465-2501.
- GOUZE, Ph., ARGOLLO, J., SALIEGE, J. F. et 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. Sci. Paris*, 303, série II, p. 219-224.
- HASTENRATH, S., KUTZBACH, J., 1985. Late Pleistocene climate and water budget of the South American Altiplano, *Quaternary Research*, 24, p. 249-256.
- HERAIL, G., FORNARI, M., VISCARA, G., RUIZ, J. A., POZZO, L. et DUMONT, J. F., 1991. Les placers d'or de Bolivie : milieux de formation et structure géologique, *Actes du Symp. Intern. sur les gisements alluviaux d'or*, La Paz, 3-5 juin 1991, *Colloques et Séminaires*, ORSTOM, p. 115-143.
- MESSERLI, B., GROSJEAN, M., BONANI, G., BÜRGI, A., GEYH, M. A., GRAF, K., RAMSEYER, K., ROMERO, H., SCHOTTERER, U., SCHREIER, H., VUILLE, M., 1993. Climate change and natural resource dynamics of the Atacama Altiplano during the last 18,000 years : a preliminary synthesis, *Mountain Research and Development*, 13, 2, p. 117-127.
- MOURGUIART, Ph., 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*, 315, série II, p. 875-880.
- PETIT-MAIRE, N., 1992. Environnements et climats de la ceinture tropicale nord-africaine depuis 140 000 ans, *Mém. Soc. géol. France*, n.s., 160, p. 27-34.
- SELTZER, G. O., 1990. Recent glacial history and paleoclimate of the Peruvian-Bolivian Andes, *Quaternary Science Reviews*, 9, p. 137-152.
- SELTZER, G. O., 1994. A lacustrine record of late Pleistocene climatic change in the subtropical Andes, *Boreas*, 23, p. 105-111.
- SERVANT, M. et FONTES, J. C., 1978. Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes : premières interprétations paléoclimatiques, *Cahiers ORSTOM, série Géologie*, 10, p. 5-23.
- SERVANT-VILDARY, S. et ROUX, M., 1990. Variations de température estimées à partir du déplacement en altitude des associations de diatomées dans une séquence holocène de la Cordillère Orientale de Bolivie, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 311, série II, p. 429-436.
- WIRRMANN, D., YBERT, J. P. et MOURGUIART, Ph., 1992. A 20,000 years palaeohydrological record from Lake Titicaca, *Lake Titicaca, A Synthesis of Limnological Knowledge*, DEJOUX, C. et ILTIS, A., éd., Kluwer Acad. Publishers, p. 40-48.
- YBERT, J. P., 1992. Ancient lake environments as deduced from pollen analysis, *Lake Titicaca, A Synthesis of Limnological Knowledge*, DEJOUX C. et ILTIS, A. éd., Kluwer Acad. Publishers, p. 49-62.