

LES LACS QUATERNAIRES DES HAUTS PLATEAUX DES ANDES BOLIVIENNES PREMIÈRES INTERPRÉTATIONS PALÉOCLIMATIQUES

Michel SERVANT*, Jean-Charles FONTES**

* *Universidad Mayor de San Andrés et Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer. Cajón Postal 8714, La Paz, Bolivie.*

** *Laboratoire de Géologie dynamique, Université Pierre et Marie Curie, 4 Place Jussieu, 75230 Paris Cedex 05*

RÉSUMÉ

Trois transgressions lacustres sont reconnues dans les bassins endoréiques de l'Altiplano bolivien depuis le Pléistocène moyen. La plus récente a eu lieu après le maximum de la dernière glaciation des Andes tropicales. Les nappes d'eau ont atteint leur plus grande extension (50.000 km²) entre 12.500 et 11.000 ans B.P. Elles se sont réduites à leurs dimensions actuelles (8.000 km²) vers 10.000 ans B.P. Les oscillations des lacs ont été de faible amplitude pendant l'Holocène.

Les variations d'extension des nappes d'eau ne démontrent pas l'existence de changements très importants dans les hauteurs moyennes annuelles des précipitations. Elles peuvent être en relation avec les modifications intervenues dans le volume des apports liquides issus de la fonte des glaciers qui se situent dans les parties hautes des bassins de drainage.

En première hypothèse, les oscillations des lacs vers l'aval et les oscillations des glaciers vers l'amont pourraient être expliquées par des changements de température et par des modifications dans la répartition annuelle des précipitations sans grandes variations au niveau des valeurs moyennes annuelles.

RESUMEN

Tres extensiones lacustres se reconocen en las cuencas cerradas del Altiplano boliviano desde el Cuaternario medio. La más reciente ocurrió después del máximo de la última glaciation de los Andes Tropicales. Los lagos llegaron a su mayor extensión (50.000 km²) entre 12.500 y 11.000 años B.P. y se redujeron a sus actuales superficies (8.000 km²) más o menos hacia los 10.000 años B.P. Las variaciones de los espejos de agua fueron bastante débiles durante el Holoceno.

Las modificaciones de la extensión de los lagos cuaternarios no significan necesariamente cambios importantes de la precipitación promedio anual. Sin embargo pueden estar relacionadas con los cambios de volumen de las aguas de deshielo de los glaciares que se encuentran en las partes altas de las cuencas de drenaje.

Como una primera interpretación se puede señalar que las variaciones de los lagos río abajo y de los glaciares río arriba podrían relacionarse con cambios de temperatura y modificaciones en la repartición de las precipitaciones sin que estas últimas tengan variaciones amplias en el promedio anual.

THE QUATERNARY LAKES ON THE HIGH PLATEAUS OF BOLIVIAN ANDES FIRST PALAEOCLIMATIC INTERPRETATIONS

SUMMARY

It has been found that three lacustrine transgressions have occurred since the Middle Pleistocene in the endorheic basins of the Bolivian altiplano. The last one took place after the glacial maximum of the last glaciation in tropical

Andes. The water levels have reached their greatest extent (50,000 sq. km) between 12,500 and 11,000 years ago. They were reduced down to their present extent (8,000 sq. km) about 10,000 years ago. During Holocene, there were only small amplitude oscillations of lakes.

The variations of water level extent do not reveal the occurrence of major changes about the yearly average depths of rainfall. They can be related to the modifications which occurred in the volume of fluid supply from melting glaciers located in the upper sections of the drainage basins.

As a first hypothesis, the downstream lake oscillations and the upstream glacier oscillations could be explained by changes in temperature and by modifications in the yearly distribution of rainfall without noticeable variations as regards the yearly average values.

ЧЕТВЕРТИЧНЫЕ ОЗЕРА АНДИЙСКИХ ВЫСОКОГОРИЙ БОЛИВИИ ПЕРВЫЕ ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

РЕЗЮМЕ

Были опознаны три озёрные трансгрессии, в бессточных бассейнах боливийского Альтиплано, происшедшие начиная с плейстоцена. Самая недавняя произошла после максимума последнего оледенения тропических Анд. Водоносные горизонты достигли наибольшего протяжения (50.000 км²) между 12.500 и 11.000 лет В.Р. Они сократились до своих нынешних размеров (8.000 км²) примерно 10.000 лет В.Р.

Вариации протяжения водоносных горизонтов не доказывает наличия значительных изменений средних годовых уровней осадков. Они могут быть связаны с изменениями в объёме жидких привносов в результате оттаивания ледников находящихся на верхних ярусах водосборов.

Согласно отправной гипотезе, можно объяснить колебания озёр вниз- и ледников вверх по течению изменениями температуры и годового распределения осадков, при отсутствии значительных вариаций годовых средних величин.

INTRODUCTION

L'Altiplano des Andes boliviennes se situe entre deux hautes chaînes de montagnes, la Cordillère orientale et la Cordillère occidentale, qui culminent à plus de 6.000 m. Il comprend un ensemble endoréique de bassins quaternaires d'effondrement actuellement occupés par des lacs (Titicaca, Poopó) ou par de vastes salines (salars de Uyuni, Coipasa, etc.). Ses points les plus bas (3.530 m) sont localisés sous le niveau du Titicaca (3.810 m). Les altitudes, de l'ordre de 3.655-3.660 m dans les salars de Uyuni et Coipasa s'élèvent vers le Sud, dans le Lipez. Cette région, essentiellement volcanique, est caractérisée par la présence de nombreuses petites dépressions fermées, dont les altitudes sont comprises entre 4.000 et 4.800 m environ ; elles sont tapissées par des évaporites ou en partie submergées par des nappes d'eaux douces ou salées peu profondes.

Les climats actuels, de type tropical, sont caractérisés par une saison des pluies centrée sur les mois d'été (janvier, février). Les précipitations de l'ordre de 600 mm/an au niveau du lac Titicaca diminuent vers le Sud où elles atteignent des valeurs moyennes annuelles inférieures à 150 mm. Des advections d'air polaire, assez fréquentes, se tra-

duisent en hiver mais parfois aussi en été par des perturbations frontales qui donnent des chutes de neige.

Les dépressions de l'Altiplano ont été le siège de plusieurs extensions lacustres quaternaires connues sous les noms de Ballivián (BOWMAN, 1909), Minchin (STEINMANN, 1906) et Tauca (SERVANT, 1977). Des extensions lacustres plus anciennes ont eu lieu, notamment dans le bassin de Charaña, près de la frontière chilienne. Elles ne seront pas étudiées ici.

Les bassins de drainage des anciens lacs comprennent vers l'amont un domaine d'altitudes élevées, supérieures à 3.800 m, qui est celui des glaciations quaternaires. Dans la Cordillère orientale, les études faites principalement dans la région de La Paz, distinguent quatre glaciations majeures appelées de la plus ancienne à la plus récente : Calvario (DOBROVOLNY, 1962), Kaluyo, Sorata (SERVANT, 1977) et Choqueyapu (TROLL, 1930). La dernière glaciation comprend deux épisodes d'avancées de glaciers reconnus près de La Paz (TROLL *et al* 1935) et de Challapata (SERVANT, 1977). Les plus basses moraines se situent vers 3.800-3.900 m d'altitude à 1.000 m environ en dessous des glaciers actuels.

Les extensions lacustres qui seront analysées ici sont postérieures au deuxième interglaciaire (Kaluyo/

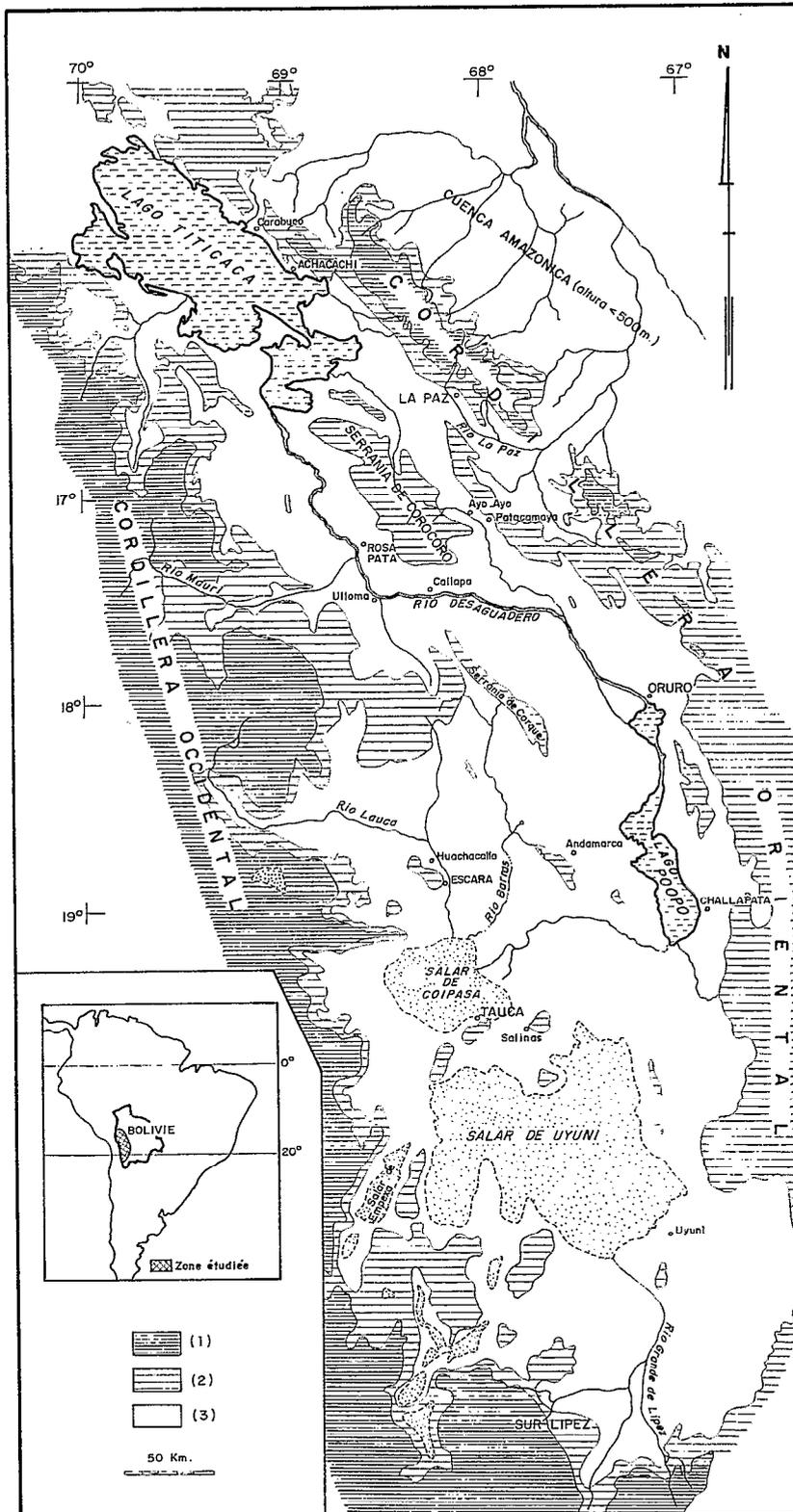


Fig. 1. — Croquis de l'Altiplano bolivien. (1), altitudes supérieures à 4.500 m ; (2), altitudes comprises entre 4.000 et 4.500 m ; (3), altitudes comprises entre 3.600 et 4.000 m.

Sorata). Celui-ci est caractérisé par des périodes complexes d'érosion comprenant une phase de morphogenèse avec façonnement de grands glacis d'ablation (glacis III), à laquelle succède une époque de pédogenèse.

CHRONOLOGIE DES VARIATIONS D'EXTENSION DES LACS QUATERNAIRES

La période lacustre Ballivián

Altiplano Nord

L'extension lacustre Ballivián est connue de longue date autour du Lac Titicaca : elle a donné naissance à une nappe d'eau dont la superficie était supérieure de 50 % environ au lac actuel (AHLFED et BRANISA, 1960). Les plus hauts dépôts connus se situent, en Bolivie, vers 3.850 m d'altitude. Les sédiments du lac Ballivián sont essentiellement formés de sables fins bien stratifiés où s'intercalent des couches plus ou moins argileuses ou limoneuses. Ils peuvent devenir caillouteux ou graveleux au débouché des rivières (Achacachi).

De part et d'autre de la vallée du Desaguadero, se situent des dépôts lacustres qui présentent une très grande extension (*formation Ulloma*). Ces dépôts ont été attribués à la période Ballivián (TROLL, 1927). Les plus hauts témoins, sont situés à 3.880 m d'altitude. Ceux qui ont été observés au Nord et à l'Est du lac Titicaca ne dépassent pas la cote 3.850 m. Cette différence dans l'altitude apparente de l'ancien plan d'eau n'est pas encore expliquée. Elle pourrait être due à des déformations tectoniques ou à l'existence de deux nappes d'eau séparées, l'une étant centrée sur le lac Titicaca actuel, l'autre sur la région du Desaguadero.

La *formation Ulloma* est essentiellement formée de sables fins bien lités localement très riches en nodules calcaires. Des argiles ou des limons argileux s'y développent surtout dans la partie supérieure. Une couche de diatomite, directement surmontée par des sables caillouteux, y a été observée au sommet, à l'Est de la confluence du Rio Desaguadero et du Rio Mauri. Dans la même région la base de la formation est soulignée par un banc discontinu de cinérite. Les dépôts passent latéralement, sur la bordure de l'ancienne nappe d'eau, à des argiles vertiques à nodules calcaires. Ils deviennent caillouteux dans les zones deltaïques notamment au débouché du Rio Mauri.

Les sédiments lacustres sont largement développés de part et d'autre du Desaguadero jusqu'à Ulloma. Ils disparaissent à quelques kilomètres en aval de cette localité. Le lac Ballivián était limité ici par un seuil topographique qui empêchait son extension vers les zones méridionales plus déprimées (bassin du Poopó). Les surfaces morphologiques assimilées

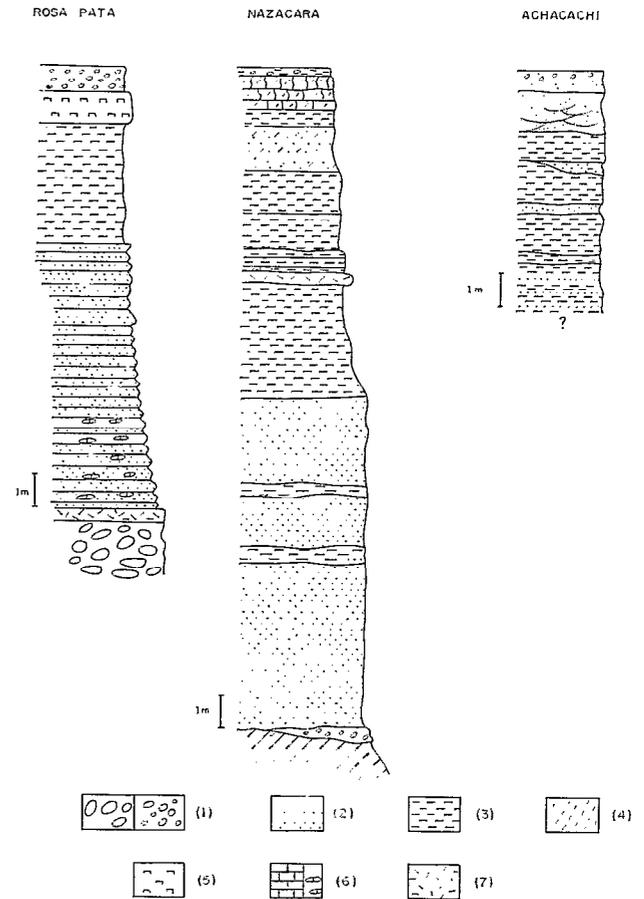


Fig. 2. — Exemples de successions lithologiques dans les dépôts du lac Ballivián. (1) gravats ou cailloutis ; (2) sables ; (3) argiles ; (4) limons ; (5) diatomite ; (6) calcaires ou nodules calcaires ; (7) cinérite.

à des témoins lacustres en aval de ce seuil par les cartes géologiques sont en réalité des témoins de glacis d'ablation. Le lac Ballivián ne s'étendait pas vers le Sud. Ce point a été démontré par TROLL (1926) et nos observations en donnent confirmation.

La *formation Ulloma* renferme quelques fossiles de Vertébrés parmi lesquels des restes de *Mastodon* (ПОМРЕСКИ, 1905). Par analogie avec la faune de Tarija (qui n'est d'ailleurs pas située avec précision dans le Quaternaire), les auteurs ont attribué les gisements fossilifères de la *formation Ulloma* au Pléistocène ancien. L'analyse géomorphologique permet de rejeter définitivement cette interprétation. La *formation Ulloma* repose directement ou par l'intermédiaire d'une surface de dissection sur un glacis d'ablation encore bien conservé sur les pieds monts de la *serranía* de Corocoro (fig. 3). Ce glacis (désigné par le chiffre III) est connu dans de nombreuses autres régions de l'Altiplano et au pied de la

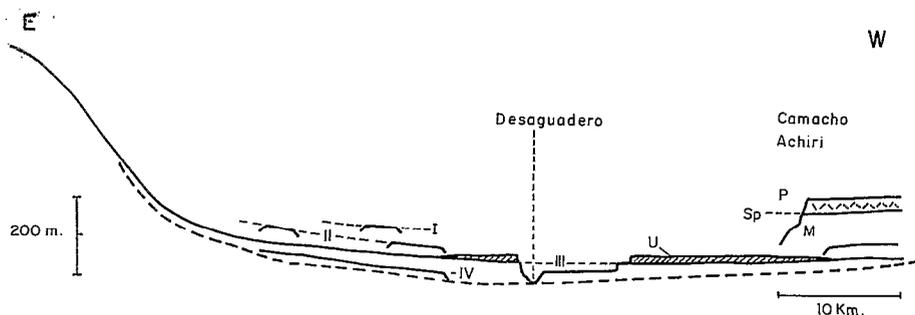


Fig. 3. — Localisation géomorphologique de la formation Ulloma (lacustre Ballivián) (d'après SERVANT, 1977). M, Miocène ; Sp, surface d'érosion près Perez ; P, ignimbrite Perez (2,5 MA) ; I, II, III, glaciais d'ablation ; U, formation Ulloma (une surface de dissection non représentée ici, existe localement entre le glacis III et la formation Ulloma) ; IV, bas glaciais.

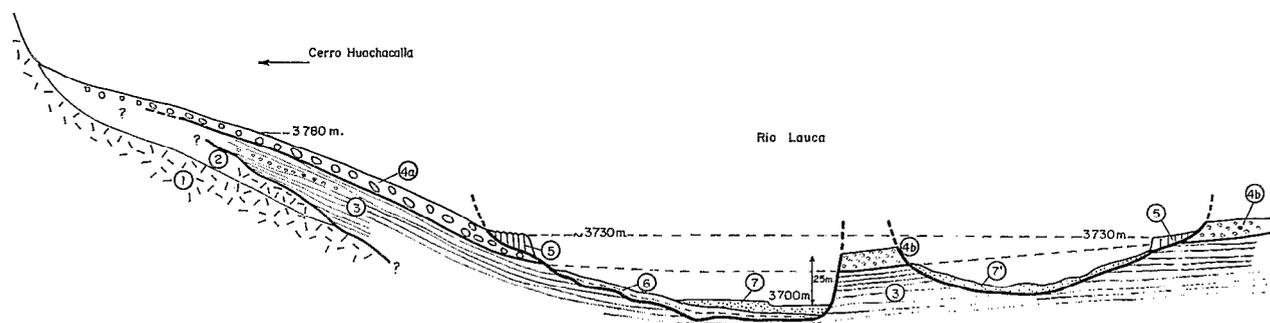


Fig. 4. — Le Quaternaire de la région de Huachacalla. Diagramme stratigraphique. 1, 2 : substratum volcanique quaternaire. 3 : Formation Escara (visible sur 15 m d'épaisseur) corrélée avec les dépôts du lac Ballivián. 4a : Cônes très grossiers et mal classés ; 4b : graviers et cailloutis (10 m d'épaisseur). Surface d'érosion. 5 : Récifs d'algues (formation Minchin). 6 : Limons calcaires à diatomées (phases lacustres Minchin et Taucá indifférenciées). 7 : Basse terrasse sableuse.

Cordillère Royale ; il s'est élaboré pendant le deuxième interglaciaire Kaluyo/Sorata (SERVANT *et al.*, 1977). Il ne peut donc pas se rattacher à une période très ancienne du Quaternaire. La formation Ulloma qui lui est postérieure est relativement récente (fin Pléistocène moyen ?).

Altiplano Sud

La période lacustre Ballivián est demeurée jusqu'à présent inconnue dans les bassins de Uyuni, Coipasa et Poopó. Des dépôts lacustres, largement développés autour du salar de Coipasa (et peut-être au Sud du salar de Uyuni dans la région de San Juan), semblent se rattacher à cette période. Les affleurements les plus significatifs se situent autour du massif volcanique de Huachacalla, dans les environs de Escara et sur les rives du Rio Lauca (fig. 4). Les dépôts (formation Escara) observés sur 15 m d'épaisseur, sont essentiellement constitués de limons blancs à diatomées, riches en silice, localement argileux ou calcaires. Ils comprennent des intercalations de cailloux au pied des reliefs. Les plus hauts témoins, situés vers 3780 m impliqueraient

l'existence d'une nappe d'eau très étendue (supérieure en extension à celle du lac Minchin) avec submersion de tous les bassins de l'Altiplano méridional. Mais la formation Escara n'a pas été jusqu'à présent observée autour du lac Poopó et il semble possible que l'altitude actuelle des plus hauts dépôts ne corresponde pas à celle de l'ancien plan d'eau. Celui-ci a pu être déformé par des mouvements tectoniques.

La période interlacustre Ballivián-Minchin

Altiplano Sud

L'abaissement du niveau du lac où se sont déposés les sédiments de la formation Escara a été suivi par la mise en place, au pied des massifs et sur cette formation, de grands cônes d'épandages très grossiers (fig. 4). Une phase de dissection, avec enfoncement de vallées, a eu lieu par la suite avant l'extension du lac Minchin. Elle semble avoir été suivie par l'élaboration d'un petit glacis d'ablation dont quelques témoins apparaissent au Nord-Est du massif de Huachacalla (Payrapurani). Ce glacis,

désigné par le chiffre IV, apparaît plus clairement, en contrebas du glaciaire III, autour du salar de Uyuni, et à l'Ouest du lac Poopó. Il est largement recouvert par des dépôts lacustres plus récents. À l'Ouest et au Sud-Ouest du lac Poopó des champs de dunes en partie fossilisés par les sédiments du lac Minchin se rattachent vraisemblablement à l'interlacustre Ballivián/Minchin. Au Nord du rio Lauca, la *formation Escara* est ennoyée par des épandages de graviers. Ces derniers forment la surface supérieure des buttes témoins qui accidentent les plaines du Lauca.

Alliplano Nord

Dans la région du Desaguadero, près de la confluence avec le rio Mauri, le sommet de la *formation Ulloma* est caractérisé par un passage brutal des faciès lacustres diatomiques à des dépôts caillouteux (fig. 2). Cette évolution lithologique suggère un abaissement rapide du plan d'eau. Après l'assèchement, les écoulements superficiels ont été momentanément drainés vers le Nord. Les zones de confluence des rivières actuelles avec le rio Desaguadero portent encore aujourd'hui les traces de cette ancienne direction d'écoulement. Mais un phénomène d'érosion régressive, développée à partir du bassin du Poopó, a modifié profondément le réseau hydrographique. Une capture est intervenue entre Callapa et Ulloma. Elle a entraîné l'individualisation du rio Desaguadero actuel. Une communication s'est établie entre le bassin du lac Titicaca et les bassins du Sud de l'Altiplano. En amont de la capture, le rio Desaguadero et ses affluents se sont enfoncés dans la *formation Ulloma* et dans les dépôts tertiaires sous-jacents. L'amplitude du creusement, de l'ordre de 40 m à Ulloma, diminue en direction du lac Titicaca. Cette phase de creusement a été suivie

par la genèse d'un glaciaire d'ablation qui est bien développé sur les flancs des plus grandes vallées à quelques mètres au-dessus des rivières actuelles au Sud-Ouest et à l'Ouest de la serranía de Corocoro. Ce glaciaire (désigné par le chiffre IV) se raccorde morphologiquement, au pied des plus hauts reliefs rocheux, à de grands cônes d'épandages.

Autour du lac Titicaca, la régression de la nappe d'eau est attestée par un enfoncement des rivières dans les dépôts lacustres. Le creusement est au minimum de 8 m dans les environs immédiats du lac. Le fond du Titicaca présente dans sa morphologie des traces nettes d'écoulements superficiels (BOULANGÉ, 1975). La plus grande partie Sud-Est du lac Titicaca s'est alors asséchée, ce qui implique un abaissement du plan d'eau de 15 m environ par rapport à sa position actuelle. La phase de façonnement du glaciaire IV, reconnue aux abords du Desaguadero, n'est pas clairement identifiée près du lac Titicaca mais elle apparaît localement en amont au pied de la Cordillère orientale. Des cordons sableux éoliens semblent s'être formés pendant la régression du lac Ballivián : ils apparaissent sous des dépôts lacustres attribués en première hypothèse à l'extension Minchin dans la presqu'île de Zañuta à l'Ouest de Carabuco, au Nord du lac Titicaca.

La période lacustre Minchin

Alliplano Nord

Une élévation du niveau du lac Titicaca est observée après la phase précédente d'érosion mais cette élévation a été limitée par l'ouverture du rio Desaguadero : les eaux ont pu se déverser vers le Sud de l'Altiplano. Des dépôts lacustres argileux et sableux situés au Nord et à l'Est du lac Titicaca, entre 10 et 15 m au-dessus du plan d'eau actuel, sont attribuables à cette nouvelle extension lacustre.

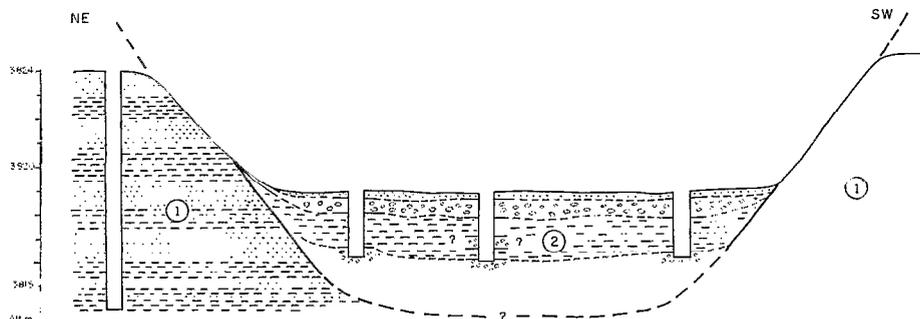


Fig. 5. — Le Quaternaire de la région de Batallas (à l'Est du lac Titicaca). Diagramme stratigraphique (d'après ORTUÑO, 1978). 1 : Dépôts lacustres du lac Ballivián (sables fins bien lités à couches argileuses intercalées. Surface d'érosion. 2 : Dépôts récents comprenant de haut en bas : a) limons probablement lacustres ; b) cailloux et cailloutis ; c) argiles lacustres avec cailloux et cailloutis localement intercalés ; d) cailloux et cailloutis. Un témoin de paléosol a été localement observé sous les cailloutis b.

Altiplano Sud

Les bassins Uyuni, Coipasa et Poopó ont été submergés par une nappe d'eau très étendue (de l'ordre de 60000 km²). Le niveau lacustre a atteint 3760 m d'altitude ce qui implique une profondeur maximale d'au moins 100 m.

Les dépôts du lac Minchin se présentent sous deux faciès différents : des constructions récifales algaires et des sédiments silto-argileux à sableux plus ou moins calcaires parfois diatomitiques.

Les constructions algaires, spectaculaires et de formes très variées, tapissent parfois de manière continue les anciennes pentes sous-lacustres quand celles-ci sont fortement inclinées et de nature rocheuse. On les rencontre sur des pentes faibles en colonies plus ou moins isolées. Les récifs d'algues sont bien développés sur des terrasses d'abrasion littorale. Ces dernières se situent vers 3740, 3720 et 3700 m d'altitude. Les niveaux lacustres se suivent de manière continue sur de grandes distances mais quelques anomalies d'origine probablement tectonique peuvent être signalées. Les plus hautes terrasses d'abrasion littorale manquent par exemple autour du volcan de Coipasa et dans certains secteurs du massif de Salinas Garci de Mendoza.

Les sédiments se situent à l'écart des zones récifales dans les creux topographiques ou accolés sur les pentes mais ils peuvent être surmontés par les récifs d'algues (Culluri). Il est généralement difficile de les distinguer des dépôts lacustres plus récents dans les zones qui correspondent au domaine d'extension du lac Tauca sous la courbe de niveau 320 m. Au-dessus de cette altitude, les dépôts du lac Minchin se présentent sous des faciès variés : alternances de sables fins à *ripplemarks*, d'argiles et parfois de cailloutis, dalles calcaires à coquilles de Mollusques, faluns à Gastropodes, etc. L'épaisseur des couches lacustres est assez faible sur la bordure des bassins : une dizaine de mètres en moyenne. Mais elle pourrait être beaucoup plus importante dans le fond des dépressions. Un sondage effectué par la Compagnie YPFB dans le salar de Uyuni indiquerait une puissance d'au moins 100 m (BROCKMANN, com. orale).

L'évolution détaillée du lac Minchin n'est pas encore connue. Les séries lacustres accessibles à l'observation et attribuables sans risque d'erreur à cette nappe d'eau se situent à des altitudes trop élevées, au-dessus de 3.720 m, pour permettre une analyse continue de l'ensemble de la période lacustre.

Le niveau du lac a atteint 3760 m d'altitude. Mais il ne s'est pas maintenu longtemps à cette cote maximum. Les constructions algaires y sont peu développées et il n'y a pas eu façonnement de surface d'abrasion littorale.

Par contre, les terrasses d'abrasion sont fréquentes et très bien marquées vers 1740, 3720 et 3700 m environ. Elles indiquent une stabilisation prolongée du plan d'eau. La position chronologique de ces terrasses par rapport au maximum lacustre n'apparaît pas de manière évidente sur le terrain. Elles ont pu s'élaborer pendant la phase transgressive du lac ou au contraire pendant la période régressive. La deuxième hypothèse que nous avons adoptée dans le graphique de la fig. 9, paraît plus probable mais elle mériterait d'être vérifiée. Si les terrasses s'étaient formées pendant la période d'élévation du plan d'eau les constructions algaires qui les tapissent devraient être surmontées par des sédiments lacustres correspondants aux phases d'approfondissement postérieures du lac. Cette superposition n'a pas été observée. Par contre, quelques coupes montrent que les récifs d'algues peuvent reposer sur des sédiments lacustres.

Quatre datations par le ¹⁴C ont été effectuées sur des coquilles des dépôts du lac Minchin situées vers 3720 m d'altitude. Deux d'entre elles donnent seulement un âge limite supérieur : 20000 ou 30000 ans B.P. Deux autres analyses faites sur le même niveau, donnent 27500 ± 800 ans B.P. et 26000 ± 600 ans B.P. Si la terrasse lacustre localisée vers 3.720 m est bien postérieure au maximum du lac Minchin, il faut admettre d'après ces datations que la plus grande extension de la nappe d'eau est antérieure à 27500 ans B.P.

Interlacustre Minchin/Tauca

Dans la région du lac Titicaca, l'abaissement du niveau du lac est attesté par des dépôts caillouteux discontinus qui reposent sur les argiles lacustres de la période précédente. Un témoin de paléosol a été observé sous ces dépôts grossiers dans la région de Batallas (ORRUÑO, 1978) : il est caractérisé par des accumulations ferrugineuses dans les pores et sur les parois des tubulures d'anciennes racines. Il n'est pas possible, pour le moment, de préciser si le plan d'eau s'est abaissé au-dessous de sa position actuelle.

Dans la partie sud de l'Altiplano, cette période interlacustre est attestée sur la bordure des bassins par une surface de ravinement ou par des plaquages de sables éoliens ou de dépôts fluviaux qui remanient localement des débris d'algues Minchin (Playa Verde, Tauca, Remedios). Une couche de sel, rencontrée à une vingtaine de mètres de profondeur par le sondage qui a été effectué dans le salar de Uyuni indique un assèchement probable du lac Minchin.

Des retouches morphologiques observées notamment dans la région du Desaguadero se rapportent vraisemblablement à la période interlacustre Minchin/Tauca. La plus importante se développe au Nord

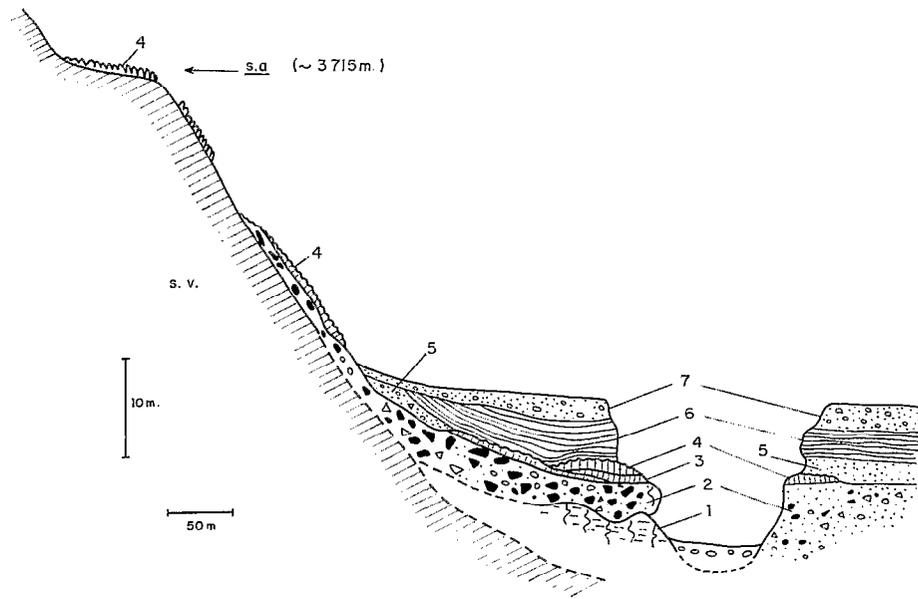


Fig. 6. — Coupe dans le Quaternaire de Tauca. S.V. substratum volcanique quaternaire. 1 : Paléosol argileux. Ravinement. 2 : Éboulis et gravats plus ou moins sableux (ép. : 2 m max.). 3 : Dalles calcaires bréchiées localement oolithiques. 4 : Constructions d'algues calcaires (lacustre Minchin). 5 : Sables éoliens probablement remaniés par ruissellement ; débris d'algues remaniés ; localement cailloutis (ép. : 0 à 3 m). 6 : Dépôts argileux à sableux fins, finement lités, à passées limoneuses et calcaires ; coquilles de Gastropodes. (Formation Tauca, ép. : 2,50 m environ). 7 : Sables à cailloutis (ép. : 2 m environ).

de Gallapa sous la forme d'une surface d'ablation qui se situe en contrebas du glacier IV.

La période lacustre Tauca

Le lacustre Tauca intéresse toutes les dépressions de l'Altiplano mais il est peu marqué au Nord, où l'élévation du niveau du Titicaca a été limitée par le déversement des eaux dans le Desaguadero. On peut lui attribuer les sédiments argileux d'une basse terrasse qui se situe à quelques mètres au-dessus du lac actuel.

Les dépôts lacustres sont par contre très développés autour du Poopó et des salars de Uyuni et Coipasa. Ce sont généralement des diatomites calcaires ou argileuses, de 2 à 5 m d'épaisseur, qui moulent une topographie très proche de l'actuelle. Sur les bordures des bassins, ces dépôts passent à des sables fins lités, à petites coquilles de Gastropodes, parfois encadrés par des cailloutis ou des sables grossiers fluviaux, à stratifications obliques ou entrecroisées.

Les plus hauts témoins lacustres se rencontrent au voisinage de la courbe de niveau 3720 m. Cette courbe coïncide approximativement avec les contours de l'ancien lac quand celui-ci se trouvait à son maximum d'extension. Il présentait alors une superficie de 43000 km² environ et une profondeur

maximale supérieure à 60 m. Il se subdivisait en trois nappes d'eau presque indépendantes centrées sur le Poopó et les salars de Uyuni et Coipasa (fig. 8). L'alimentation par le réseau hydrographique était principalement assurée au Sud par le Rio Grande de Lipez, au Nord-Ouest par le Rio Lauca, au Nord-Est par le Desaguadero qui est un exutoire du Titicaca. Le bassin de drainage, très étendu, incluait en particulier, vers l'amont, les glaciers qui descendent vers l'Altiplano à partir de la Cordillère orientale et de la Cordillère occidentale.

Dans le Sud-Ouest bolivien (Lipez) les petites dépressions individualisées dans un paysage volcanique étaient occupées par des lacs fermés dont les terrasses littorales se situent en moyenne à 5 ou 10 m au-dessus du fond des cuvettes. La terrasse de Laguna Chiat Khota par exemple forme une ligne presque continue autour de la mare actuelle. Elle comprend des encroûtements calcaires où l'on observe une juxtaposition de petites colonies algales et de dépôts calciteux autour d'anciennes tiges végétales.

La dernière étape du lacustre Tauca est représentée par une basse terrasse argileuse, surmontée par une dalle calcaire, largement étendue autour des salars de Uyuni et Coipasa. Les dépôts ont été légèrement érodés avant la mise en place d'une croûte de sels qui tapisse les zones les plus déprimées.

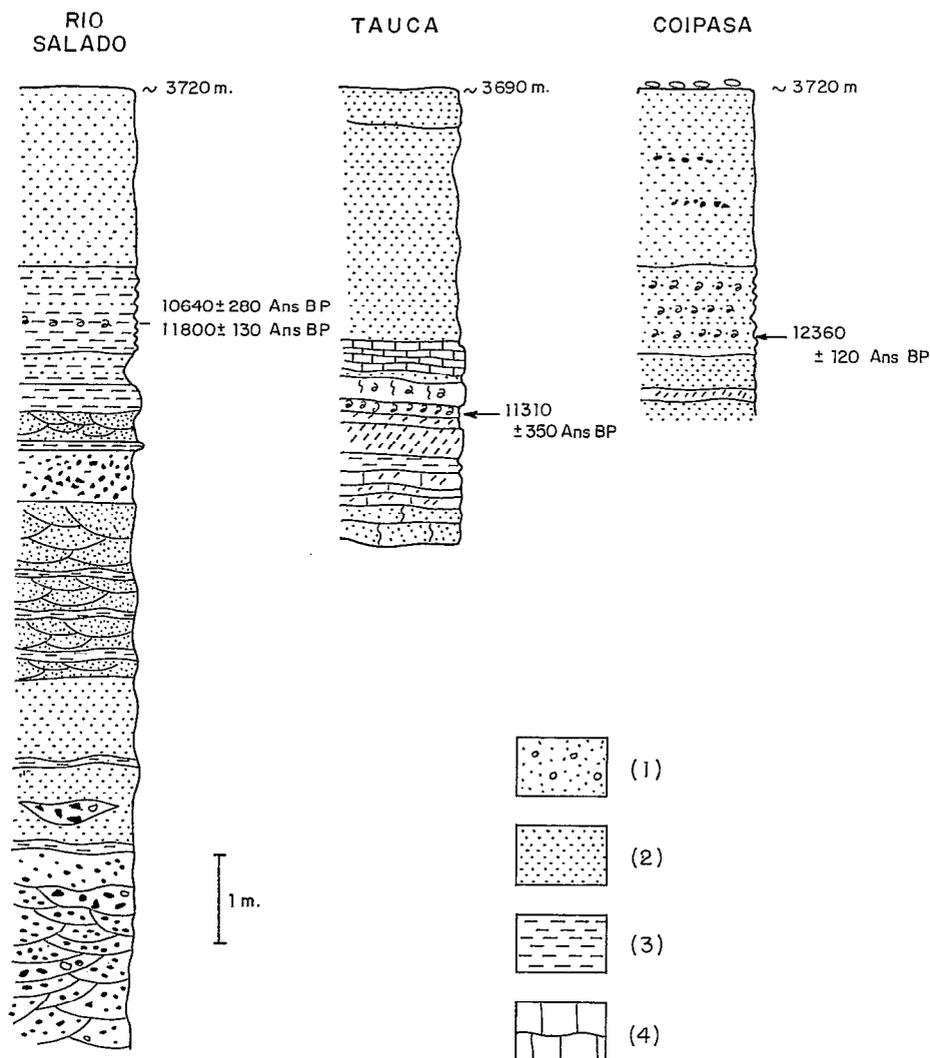


Fig. 7. — Exemples de successions lithologiques dans la formation Tauca. 1 : gravats ou cailloutis ; 2 : sables ; 3 : argiles ; 4 : calcaires.

Plusieurs datations par le ^{14}C ont été effectuées sur des coquilles ou des calcaires lacustres (tabl. I). Les teneurs en ^{13}C des carbonates indiquent un équilibre isotopique avec le CO_2 de l'atmosphère qui constitue la référence pour le calcul des âges. Ceux-ci sont donc représentatifs*.

Les plus hauts dépôts lacustres, autour des salars de Uyuni et Coipasa, ont donné des âges compris entre $12\,360 \pm 120$ ans et $10\,640 \pm 280$ ans B.P.

Les dépôts les plus bas, immédiatement antérieurs

à l'assèchement, ont été datés de $10\,020 \pm 160$ et $10\,380 \pm 180$ B.P.

Deux anomalies apparentes doivent être signalées. Dans la coupe du Rio Salado, le même niveau stratigraphique a donné des résultats différents : $10\,640$ ans B.P. environ sur des coquilles de Gastropodes, $11\,800$ ans B.P. sur la fraction calcaire, inférieure à 200μ , du sédiment encaissant. Cet écart peut être dû à trois types de mécanismes. (1) La couche datée peut contenir des particules carbona-

* En toute rigueur, les âges apparents devraient être corrigés de l'enrichissement en ^{14}C provoqué par la précipitation du carbonate par rapport à la teneur de référence qui correspond à celle d'un bois.

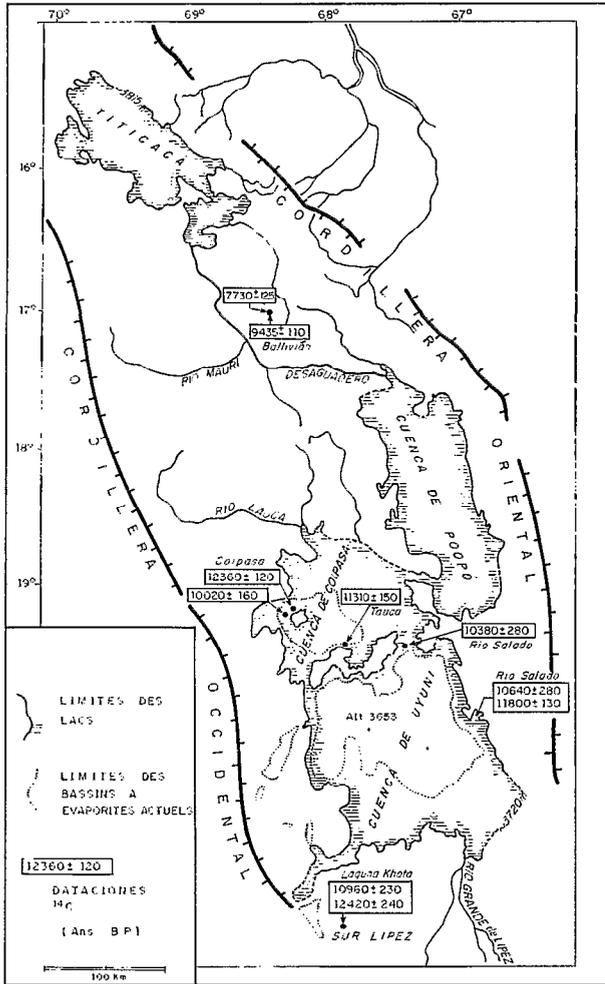


Fig. 8. — Extension maximale du lac Tauca. La surface du lac Titicaca était proche de l'actuelle (8.000 km²). Les nappes d'eau du Sud de l'Altiplano s'étendaient sur 43.000 km² environ.

tées remaniées à partir d'un sédiment un peu plus ancien que les tests de Mollusques. (2) Le carbonate inorganique peut avoir précipité à partir d'un bicarbonate en provenance de la nappe et non encore rééquilibré avec l'activité de l'atmosphère. (3) Il est possible aussi que la colonisation biologique ait fait suite à un dépôt carbonaté inorganique.

A Laguna Chiat Khota, les encroûtements algaires sont plus récents (10970 ans B.P.) que les autres encroûtements calcaires qui leur sont associés (12420 ans B.P.). La coexistence, dans la même terrasse, de dépôts d'âges séparés par plus d'un millénaire pourrait indiquer que le niveau de l'ancien lac est resté assez stable pendant une longue période, ce qui mériterait d'être vérifié par de nouvelles analyses.

Dans le Sud-Ouest bolivien, le niveau actuel de la laguna Colorada submerge partiellement une surface d'érosion qui recoupe des diatomites peut-être attribuables au lacustre Tauca ; un assèchement, accompagné d'un léger creusement, a donc précédé l'installation du lac actuel. A Empexa, RISACHER (1976) distingue plusieurs séquences évaporitiques qui sont séparées par des argiles lacustres, ce qui suggère une succession de mise en eau et d'assèchements liés aux oscillations de la nappe phréatique ou aux variations des apports liquides par les rivières. A Pastos Grandes, une croûte pisolithique calcaire, datée de 620 ± 220 ans B.P., a été disloquée par cryoturbation avant la formation, sous une mince tranche d'eau, de pisolithes actuels et subactuels (RISACHER, 1978).

En amont des dépressions et dans la partie Nord de l'Altiplano, les axes hydrographiques sont caractérisés par une basse terrasse holocène où l'on peut distinguer deux unités lithographiques successives.

— A la base se situent des limons gris à diatomées localement riches en tourbes. Des lentilles caillouteuses peuvent y être intercalées mais elles sont exceptionnelles. Les dépôts fins se raccordent sur les flancs des vallées à un sol noir. Ce dernier est très développé dans certaines régions de l'Altiplano, principalement au pied de la Cordillère Royale. Il indique une bonne fixation des versants pendant la période où il s'est formé.

— Au sommet, la basse terrasse est exclusivement formée de sables fins grossiers à cailloux et cailloutis. Le creusement qui a succédé à la mise en place de ces dépôts présente une amplitude très variable, de 2 à 8 m environ. Cette phase d'érosion intéressante aussi les versants : les sols noirs y sont en voie de disparition par ravinement.

Les tourbes de l'unité inférieure ont été datées de 9435 ± 110 ans vers la base et de 7730 ± 125 ans B.P. vers le sommet (coupe de Ballivián).

DISCUSSION PALÉOCLIMATIQUE

Les extensions lacustres

Situation par rapport aux glaciations

Les essais de corrélations entre les échelles stratigraphiques établies sur les bordures des bassins et au pied de la Cordillère orientale (SERVANT, 1977) montrent que les extensions lacustres ont eu lieu pendant les époques glaciaires. Mais la position des hauts niveaux lacustres par rapport aux phases d'avancées maximales des glaciers n'a pas pu être établie jusqu'à présent par l'observation directe. Les datations par le ¹⁴C dégagent sur ce point une première indication. Le dernier pléniglaciaire a eu

TABLEAU I

 Datation par le ^{14}C de dépôts lacustres ou fluviaux de l'Altiplano Bolivien

Stratigraphie	N°	Localisation	Alt (m)	Nature	Age B.P.	$\delta^{13}\text{C}/\text{PDB.}$
Phase d'extension lacustre « Minchin »	402	A l'Est du lac Uru-Uru	~ 3.720 m	Coquilles	27.500 ± 800	+ 2,20
	403	A l'Est du lac Uru-Uru	~ 3.720 m	Coquilles + petites concrétions carbonatées	26.300 ± 600	+ 2,10
Phase d'extension lacustre « TAUCA »	40	Coipasa	~ 3.720 m	Coquilles	12.360 ± 120	+ 1,24
	167	Rio Salado	~ 3.720 m	Coquilles	10.640 ± 280	+ 2,46
				Sédiments	11.800 ± 130	+ 3,31
	230	Tauca	~ 3.695 m	Coquilles	11.310 ± 350	+ 1,04
	169	Laguna Chiar Khota	4.125 m (+ 10 m par rapport au fond de la dépression)	Encroûtement algaire	10.970 ± 230	+ 3,68
	170	Laguna Chiar Khota	4.125 m	Encroûtement calcaire	12.420 ± 240	+ 3,72
	42	Coipasa	~ 3.660 m	Dalle calcaire	10.020 ± 160	+ 1,18
126	Salinas Garcí Mendoza	~ 3.660 m	Dalle calcaire	10.380 ± 180	+ 2,98	
Basse terrasse Fluviale	197	Estación Ballivian		Tourbe	9.435 ± 110	
	198	Estación Ballivian		Tourbe	7.730 ± 125	

lieu au Pérou, dans la Cordillère Vilcanota, au Nord-Ouest du lac Titicaca, entre 28000 et 14000 ans B.P., et sans doute plus près de 14000 que de 28000 ans B.P. (MERCER et PALACIOS, 1977). Nous ne pouvons pas actuellement préciser l'extension des nappes d'eau à cette époque dans les bassins de l'Altiplano. Mais il est probable que les plus hauts niveaux du lac Minchin, situés au-dessus de la terrasse datée de 27-26000 ans B.P., sont de beaucoup antérieurs. Ceux du lac Tauca sont nettement postérieurs au pléniglaciaire : ils se situent vers 12500-11000 ans B.P.

En première hypothèse, nous pouvons transposer les indications données par les datations sur la position chronologique du lacustre Tauca aux extensions plus anciennes des nappes d'eau. La transgression du lac Ballivián pourrait se situer après le maximum de la glaciation Sorata pendant une période de transition entre une époque glaciaire et une époque interglaciaire. L'élévation du niveau du

lac Minchin aurait eu lieu après la première grande avancée des glaciers de la dernière glaciation (Choqueyapu I) pendant une période de transition entre une époque stadiaire et une époque interstadiaire.

Interprétation paléohydrologique

L'extension des nappes d'eau de la période lacustre Tauca s'est largement développée dans les dépressions de Uyuni, Coipasa et Poopó qui sont caractérisées par un très grand bassin de drainage. Par contre, l'élévation des plans d'eau a été peu marquée dans les dépressions du Sud-Ouest bolivien (Lipez) dont les bassins de drainage sont peu étendus. Une relation semble exister entre les surfaces drainées par les lacs et la hauteur des plans d'eau. Nous pouvons en conclure que la cause essentielle des extensions lacustres se situe dans une augmentation des apports liquides latéraux.

Une forte diminution de l'évaporation est improbable. Si elle avait eu lieu, nous observerions des hauts niveaux lacustres dans toutes les dépressions y compris dans celles dont les bassins de drainage sont peu étendus. Il semble au contraire que l'évaporation s'est maintenue dans des valeurs élevées. La flore diatomique du lac Tauca indique des paléosalinités de l'ordre de 30 à 40 g/l (SERVANT-VILDARY, 1977). Ces fortes teneurs en éléments dissous peuvent s'expliquer en partie par une dissolution d'évaporites antérieures et par un lessivage des formations tertiaires, souvent salifères, de l'Altiplano. Mais il est peu probable qu'elles auraient atteint des valeurs aussi élevées sans une évaporation très marquée.

L'augmentation du volume des apports liquides latéraux au lac Tauca peut s'expliquer par des précipitations accrues sur l'ensemble des bassins de drainage ou par une participation plus accentuée des eaux de fonte des glaciers à l'alimentation des bassins lacustres. Les données actuellement disponibles ne permettent pas de savoir s'il y a eu ou non augmentation des précipitations. Par contre, les datations radiométriques montrent que l'élévation des niveaux lacustres a eu lieu après le dernier pléni-glaciaire. Les eaux de fonte des glaciers ont pu participer activement et peut-être de manière déterminante, à l'alimentation du lac Tauca. Celui-ci ne peut donc pas être assimilé pour le moment à un lac pluvial. La même conclusion pourrait s'appliquer aux extensions lacustres plus anciennes.

Le recul des glaciers ne constitue pas un phénomène continu. Il peut être accidenté par des phases de stationnement ou des réavancées glaciaires momentanées qui sont soulignées par des accumulations morainiques. Un exemple en est donné, pour la fin du Pléistocène, par l'évolution des glaciers dans la Cordillère Royale à l'Est du lac Titicaca (NOGAMI, 1970) et dans la Cordillère Vilcanota au Nord-Ouest (MERCER et PALACIOS, 1977). Dans cette dernière région, une pulsation positive des glaciers a eu lieu vers 11500 ans et a culminé vers 11000 ans B.P. Elle est contemporaine d'une partie de la période lacustre Tauca. Mais le nombre des datations radiométriques et la précision des observations sont encore insuffisantes pour déterminer le rôle éventuel des oscillations glaciaires qui se situent à l'échelle du siècle ou du millénaire dans le bilan hydrologique des nappes d'eau.

Les périodes interlacustres

L'interlacustre actuel

Le lac Tauca s'est au moins partiellement asséché vers 10000 ans B.P. A cette date, les glaciers des Andes péruviennes présentaient une extension à

peine plus grande qu'actuellement (MERCER et PALACIOS, 1977). Si cette observation devait être généralisée à l'ensemble des Andes boliviennes, nous pourrions admettre que le retrait des glaciers était pratiquement terminé au début de l'Holocène. Une forte diminution du volume des eaux de fonte est donc vraisemblable à cette époque. Elle pourrait expliquer, sans modification majeure des précipitations, l'abaissement rapide du niveau du lac Tauca un peu avant 10000 ans B.P.

Les oscillations des plans d'eau, décelées dans les bassins de Empexa et du Sud-Est bolivien, ont eu une faible amplitude pendant l'Holocène. Nous pouvons en conclure que les variations du rapport Précipitation/Évaporation exprimé en valeurs moyennes annuelles se situent, pendant cette période, autour d'une valeur moyenne proche de l'actuelle. Les premières études palynologiques faites dans la région de La Paz indiquent que des conditions climatiques sèches se sont maintenues dans cette région depuis 7000 ans B.P., à l'exclusion d'une phase plus humide qui est datée de 2500 ans B.P. environ (GRAF, 1975). Nous n'avons pas d'information de ce type pour les périodes antérieures à 7000 ans B.P.

Les faibles variations du rapport Précipitation/Évaporation pendant l'Holocène n'excluent pas l'existence au cours de cette période de changements climatiques importants. La basse terrasse fluviale, qui est largement conservée dans la partie Nord de l'Altiplano, indique qu'une modification est intervenue, après 7700 ans B.P. environ, dans la nature des écoulements superficiels. Les dépôts limoneux et localement organiques, datés de l'Holocène ancien, qui tapissent le fond des vallées impliquent des écoulements lents et dépourvus de crues très marquées. Ces conditions hydrologiques sont incompatibles avec un climat tropical à pluies saisonnières et orageuses. Elles pourraient s'expliquer dans un contexte climatique à précipitations fines ou neigeuses, peut-être bien réparties sur l'année, susceptibles d'alimenter les rivières de manière régulière. Un changement radical est observé dans la sédimentation fluviale après 7700 ans B.P. : cette sédimentation devient caillouteuse ou graveleuse. Ces nouvelles conditions sont celles que nous observons actuellement sous un climat de type tropical.

L'interlacustre Minchin/Tauca

Cette phase paléogéographique se situe dans les limites de la dernière glaciation avant 13 000 ans et après 27 000 ans B.P. Sa position chronologique n'est pas déterminée avec précision. En première hypothèse, elle pourrait correspondre à la période sèche qui a été individualisée dans de nombreuses régions intertropicales vers 18 000 ans B.P. en Amérique

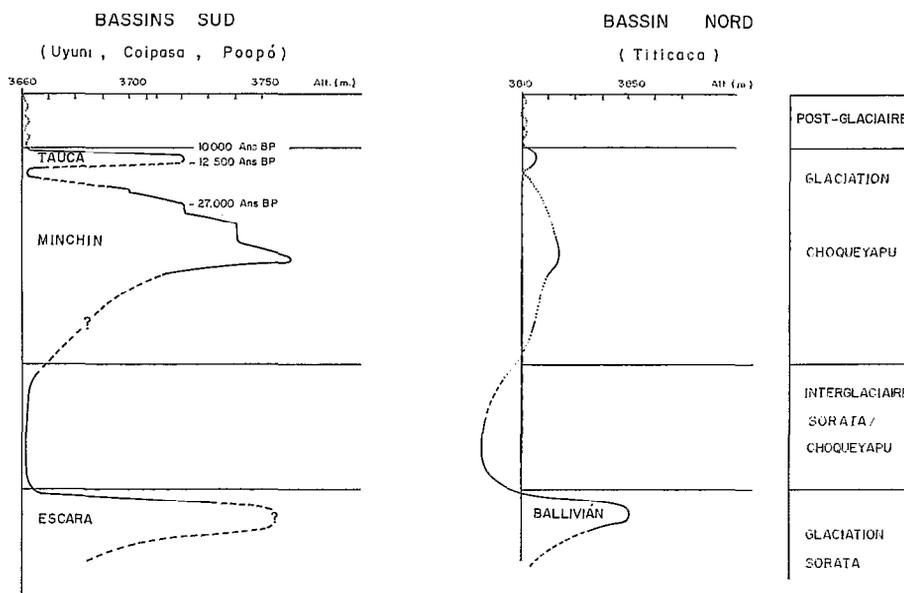


Fig. 9. — Les variations du niveau des lacs au Sud et au Nord de l'Altiplano. Premières interprétations.

du Sud (TRICART, 1977) et en Afrique (SERVANT, 1974). La disparition à cette époque de la forêt dense amazonienne a pu diminuer considérablement les transferts de vapeur d'eau en direction des Andes boliviennes d'où une accentuation de la sécheresse et un abaissement du niveau des lacs de l'Altiplano.

L'interlacustre Ballivián/Minchin

La baisse du niveau du lac Ballivián a pu s'effectuer, comme celle du lac Tauca en fin de période glaciaire. Elle a conduit, pendant l'interglaciaire Sorata/Choqueyapu, à un assèchement presque complet de la partie Sud-Est du lac Titicaca. Cet assèchement implique une diminution par rapport à l'actuel des valeurs moyennes annuelles du rapport Précipitation/Évaporation.

Le problème paléoclimatique des Andes tropicales aux latitudes de la Bolivie

Les incertitudes qui règnent actuellement sur l'extension des nappes d'eau pendant la dernière grande avancée glaciaire après 28000 ans B.P. s'opposent à une discussion paléoclimatique détaillée. Celle-ci deviendra possible quand il sera confirmé que les plus hauts niveaux du lac Minchin sont antérieurs à 27 000 ans B.P., ce que nous croyons très probable.

Pour le moment, il existe de fortes présomptions pour penser que les extensions maximales des lacs

coïncident avec une augmentation des apports liquides issus de la fonte des glaciers vers la fin d'une glaciation ou d'un stade glaciaire. Les hauts niveaux lacustres n'impliquent pas de ce fait une augmentation très marquée des précipitations sur l'ensemble des bassins de drainage. Nous savons, par ailleurs, que le post-glaciaire et le dernier interglaciaire (Sorata/Choqueyapu) correspondent à des conditions climatiques aussi sèches ou plus sèches qu'actuellement.

Finalement, et dans l'état actuel des connaissances, il est difficile de démontrer l'existence de périodes caractérisées par une forte augmentation des précipitations dans le Quaternaire de l'Altiplano depuis le dernier interglaciaire. Corrélativement, il n'est pas possible d'expliquer les avancées des glaciers par une suralimentation dans des conditions climatiques plus humides. Le phénomène serait donc lié essentiellement aux abaissements de température qui sont observés de manière approximativement synchrones dans l'ensemble du globe. Mais il n'est pas démontré que ces abaissements ont été suffisants pour permettre les grandes glaciations des Andes tropicales. Les températures du dernier pléni-glaciaire se situeraient seulement à 1 ou 2° en dessous de leurs valeurs actuelles dans la partie Ouest et subéquatoriale de l'Atlantique (BÉ *et al.*, in MERCER et PALACIOS, 1977).

Une autre interprétation peut être proposée : les avancées glaciaires pourraient être en relation avec une plus grande fréquence des précipitations d'hiver

et, par conséquent, avec une modification du régime climatique (DOLLFUS, 1965).

De telles précipitations ont lieu actuellement mais elles ne jouent pas un rôle déterminant sur les climats. Elles sont liées à des perturbations frontales elles-mêmes associées à des advections d'air polaire dans le milieu tropical. Ces advections, qui peuvent aussi se manifester en été, se traduisent par un abaissement brutal et très marqué des températures et par des chutes de neige sur l'ensemble de l'Altiplano.

Si les advections d'air polaire ont eu lieu de manière répétée au cours de certaines périodes de la dernière glaciation, dans un contexte mondial caractérisé par des températures plus basses qu'actuellement, elles expliqueraient, par accentuation régionale du froid et par les chutes de neige qui les accompagnent, une meilleure alimentation et une avancée des glaciers. Le phénomène n'implique pas une forte augmentation des précipitations en valeurs moyennes annuelles.

Mais il est possible aussi que les advections d'air polaire se produisent pendant les interglaciaires dans un contexte paléoclimatique mondial plus chaud. Elles limiteraient en ce cas et de manière locale, l'élévation des températures (et plus particulièrement des températures minimales). Elles se traduiraient par une meilleure répartition des précipitations au cours de l'année et par des chutes de neige susceptibles d'alimenter, de manière régulière, les écoulements superficiels. De telles conditions climatiques permettraient d'expliquer les régimes hydrologiques très particuliers qui caractérisent l'Holocène ancien de l'Altiplano.

En première hypothèse, il est possible d'expliquer les variations d'extension des lacs en aval et celles de glaciers en amont par des changements de température et par des modifications dans la fréquence des advections d'air polaire aux basses latitudes. De grandes variations dans la valeur moyenne annuelle des précipitations ne sont pas indispensables dans le cadre de cette hypothèse.

CONCLUSION

L'évolution des bassins lacustres de l'Altiplano ne dépend pas uniquement des variations du rapport Précipitation/Évaporation (P/E). Elle est due aussi aux changements intervenus dans les apports liquides issus de la fonte des glaciers situés dans les parties hautes des bassins de drainage.

Ces apports ne peuvent pas jouer un rôle déterminant dans le bilan hydrologique des lacs pendant les interglaciaires quand le volume des glaciers se trouve considérablement réduit. Le facteur Précipitation/Évaporation devient en ce cas prépondérant. Mais l'exemple du post-glaciaire actuel montre que les oscillations de P/E n'ont pas eu une grande amplitude depuis 10 000 ans B.P. Ces conditions sont complètement différentes de celles qui sont observées dans d'autres régions tropicales, principalement en Afrique, au Nord de l'Équateur (SERVANT, 1974).

Les époques glaciaires sont beaucoup plus complexes. Le volume des glaciers et les variations qui l'affectent introduisent un nouveau facteur dans le bilan hydrologique des nappes d'eau situées en aval. L'exemple de la dernière extension lacustre, qui a lieu après le dernier pléniglaciaire, suggère avec vraisemblance que les eaux de fonte des glaciers ont pu jouer un rôle déterminant dans l'élévation des plans d'eau. Celle-ci ne peut pas être reliée de manière évidente à une augmentation très marquée du rapport Précipitation/Évaporation. L'extension des nappes d'eau pendant les périodes d'avancée des glaciers n'est pas connue avec précision pour le moment, mais il est peu probable que ces périodes soient associées à de hauts niveaux lacustres.

*Manuscrit reçu au Service des Publications de l'O.R.S.T.O.M.
le 29 mars 1978.*

BIBLIOGRAPHIE

- AHLFELD (F.), BRANISA (L.), 1960. — Geología de Bolivia, *Instituto del Petroleo*, Don Bosco, ed., La Paz, 245 p.
- BALLIVIÁN (O.), BLES (J. L.), SERVANT (M.), 1978. — Le Plio-Quaternaire de la région de La Paz (Bolivie). *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Géol., vol. X, n° 1 : 101-113
- BOULANGE (B.), RODRIGO (L. A.), 1975. — Primeros resultados limnológicos del Lago Titicaca (Lago Huiñaimarca). *1er Congreso Nacional de Geología*, Abril 1975, Potosi, Bolivia (sous presse).
- BOWMANS (I.), 1909. — Physiography of the Central Andes. *Am. Jour. Sc.*, sér. 428 : 197-217 et 373-402.
- DOBROVOLNY (E.), 1962. — Geología del Valle de La Paz. *Bol. Depart. Nacional de Geología*, La Paz, n° 3, 153 p.
- DOLLFUS (O.), 1965. — Les Andes Centrales du Pérou et leurs piémonts. *Thèse Doct., Faculté Lettres et Sc. Humaines, Univ. Paris*, 404 p.
- FONTES (J.-Ch.), SERVANT (M.), 1976. — Dataciones radiométricas sobre el Cuaternario reciente del Altiplano de Bolivia. *1er Congreso Nacional de Geología*, Potosi (sous presse).
- GRAF (K.), 1975. — Estudios Palinológicos en la Cuenca de La Paz y Regiones Aledañas. *Anales de la IV Convención Nacional de Geología, Revista Técnica Y.P.F.B.*, vol. IV, n° 3 : 177-193.
- MERCER (J. H.), PALACIOS (M.), 1977. — Radiocarbon dating of the last glaciation in Peru, *Geology*, U.S. : 600-604.
- NOGAMI (M.), 1970. — Le recul des glaciers de la Cordillère Royale, Bolivie (en japonais). *Geogr. Review of Japan*, vol. 43, n° 6 : 338-346.
- ORTUÑO (F.), 1978. — Determinación del espesor del Cuaternario de la zona de Huarina y Batallas por el método de sísmica refracción, *Tesis, Depart. Geociencias, U.M.S.A.*, La Paz (sous presse).
- POMPECKI (S. F.), 1905. — Mastodon-Reste aus dem interandinischen Hochlande von Bolivia. *Palaeontographica*, n° 52, Stuttgart.
- RISACHER (F.), 1976. — Reconocimiento de algunos salares del Altiplano boliviano. *1er Congreso Nacional de Geología*, abril 1975, Potosi, Bolivia (sous presse).
- RISACHER (F.), 1978. — Holocene pisolites and encrustations, associated with springs, Pastos Grandes, Bolivia. *Convenio U.M.S.A.-O.R.S.T.O.M.*, La Paz, 10 p.
- SERVANT (M.), 1974. — Les variations climatiques des régions intertropicales du continent africain depuis la fin du Pléistocène. *Soc. Hydrotechn. Fr., XIIIe Journées de l'Hydraulique*, Paris, 1974, Question I, Rapport I, 10 p.
- SERVANT (M.), 1977. — Le cadre stratigraphique du Plio-Quaternaire des Andes tropicales en Bolivie. *Recherches Françaises sur le Quaternaire, INQUA 1977, Bull. AFEQ*, 1977-1, n° 50 : 323-327.
- SERVANT-VILDARY (S.), 1978. — Les diatomées des dépôts lacustres quaternaires de l'Altiplano bolivien. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Géol., vol. X, n° 1 : 25-35
- STEINMANN (G.), HOK (H.), BISTRAM (A.), 1904. — Zur Geologie des sudoestl. Bolivien, *Zbl. Min.*, n° 5 : 1-4.
- TRICART (J.), 1977. — Aperçus sur le Quaternaire amazonien. *Recherches Françaises sur le Quaternaire, INQUA 1977, suppl. Bull. AFEQ*, 1977-1, n° 50 : 265-271.
- TROLL (C.), 1927-1928. — Forschungsreisen in den zentralen Anden von Bolivia u Peru. *Peterm. Mitth.*, n° 73 : 41-43 et 218-222, n° 74 : 100-103.
- TROLL (C.), 1929. — Reisen in den oestl. Anden Bolivien, *Peterm. Litt.*, n° 75 : 181-188.
- TROLL (C.), FINSTERWALDER (R.), 1935. — Die Karten der Cordillera Real u. des Talkessels von La Paz. *Peterm. Mitth.*, n° 81 : 393-399 et 454-455.