

## EXISTENCE DE DEUX NOUVEAUX ÉPISODES LACUSTRES QUATERNAIRES DANS L'ALTIPLANO PÉRUVO-BOLIVIEN (1)

A. LAVENU <sup>(2)</sup>, M. FURNARI <sup>(3)</sup>, M. SEBRIER <sup>(4)</sup>

(2) O.R.S.T.O.M., Laboratoire de Géodynamique des bassins sédimentaires, Université de Pau, avenue Philippon, 64000 Pau

(3) O.R.S.T.O.M., Laboratoire de Minéralogie, Université Paul-Sabatier, 39, allées J.-Guesde, 31400 Toulouse

(4) CNRS, Laboratoire de Géologie dynamique interne, Université de Paris-Sud, Bât. 509, Centre d'Orsay, 91405 Orsay

### RÉSUMÉ

*On montre l'existence de deux niveaux lacustres quaternaires (lac Cabana et lac Mataro) antérieurs à ceux déjà connus dans l'Altiplano. Ils se situeraient dans le Pléistocène inférieur. Ces deux épisodes lacustres seraient associés aux stades de retrait de deux glaciations anciennes. On propose un essai de corrélation entre les différents niveaux lacustres du Quaternaire, les terrasses et surfaces d'ablation associées et les épisodes glaciaires connus en Bolivie et au Pérou.*

MOTS-CLÉS : Andes — Altiplano — Quaternaire — Niveaux lacustres.

### RESUMEN

#### EXISTENCIA DE DOS NUEVOS PERÍODOS LACUSTRES CUATERNARIOS EN EL ALTIPLANO PERUANO-BOLIVIANO

*Se demuestra la existencia de dos niveles lacustres cuaternarios (lago Cabana y lago Mataro) anteriores a los ya conocidos en el Altiplano. Tendrían una edad Pleistoceno inferior. Estos dos episodios lacustres serían asociados a periodos de deshielo de dos glacitaciones antiguas. Tratamos de establecer correlaciones entre los diferentes niveles lacustres del Cuaternario, las terrazas y superficies de erosión ligadas y los periodos glaciales conocidos en Bolivia y Peru.*

PALABRAS CLAVES : Andes — Altiplano — Cuaternario — Niveles lacustres.

### ABSTRACT

#### TWO NEW QUATERNARY LACUSTRINE PERIODS IN THE PERUVIAN BOLIVIAN ALTIPLANO

*Two Quaternary lake levels (Lake Cabana and Lake Mataro) which are older than those observed in the Altiplano would date from lower Pleistocene. These two lacustrine periods would correspond to the recession phases of two former glaciations. An attempt is made to correlate the different Quaternary lake levels, the terraces and the related ablation areas with the glacial periods known in Bolivia and Peru.*

KEY WORDS : Andes — Altiplano — Quaternary — Lake levels.

(1) Étude réalisée dans le cadre de la Convention signée avec l'Universidad Mayor de San Andres (La Paz).

L'Altiplano est un grand bassin intramontagneux des Andes Centrales (fig. 1) compris entre les Cordillères Occidentale et Orientale. Il s'étend sur 2 000 kilomètres de long et environ 200 de large, à des altitudes variant de 3 700 à 4 600 mètres. Son drainage est presque exclusivement endoréique. Sa partie nord est occupée par deux grands lacs permanents : les lacs Titicaca et Poopo (Pérou et Bolivie). Le lac Titicaca se déverse dans le lac Poopo par l'intermédiaire du rio Desaguadero (370 km de long, 0,03 % de pente, BOULANGÉ *et al.*, 1978). La partie sud est la plus aride (100 mm/an de précipitation vers 22° S au lieu de 600 mm/an vers 17° S). C'est le domaine de grandes salines : les « salares » de Coipasa et Uyuni en Bolivie, Atacama au Chili. Le sud de l'Altiplano bolivien (Lipez) et la Puna argentine sont occupés par une chaîne volcanique.

Dans ce vaste bassin endoréique on observe les restes de trois dépôts lacustres étagés (et des surfaces d'abrasion) qui attestent de l'extension d'anciens lacs.

L'étude de ces paléo-lacs et celles faites plus récemment au Pérou et en Bolivie sur les glaciations de la Cordillère Orientale (on dénombre cinq stades) ont permis d'établir des relations entre les trois formations lacustres et les trois épisodes glaciaires les plus récents.

Jusqu'à maintenant, on ne connaissait pas d'extensions lacustres en relation avec les glaciations les plus anciennes.

Aussi, après la découverte dans l'Altiplano péruvo-bolivien de dépôts lacustres anciens, les résultats que nous proposons permettent d'établir entre ces dépôts et les glaciations anciennes des relations identiques à celles qui ont été établies entre les dépôts lacustres récents et les dernières glaciations.

#### RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

Dès le début du XIX<sup>e</sup> siècle, ces paléo-lacs et leurs dépôts, ont donné lieu à des études de la part de géographes et géologues : d'ORBIGNY (1847), AGASSIZ (1876), POMPECKI (1905), NEVEU-LEMAIRE (1906), BOWMAN (1909). Ces premiers travaux furent suivis par ceux de DOUGLAS (1914), SEFVE (1910-1915), STEINMANN (1929), TROLL (1927-1928), TROLL et FINSTERWALDER (1935), MOON (1939), NEWELL (1949), AHLFELD (1946), AHLFELD et BRANISIA (1960).

Dans le nord de l'Altiplano, dans le bassin de l'actuel lac Titicaca s'est développé un paléo-lac : le lac Ballivian (Formation Ulloma en Bolivie, Formation Azangaro au Pérou). Ce lac a pour limite sud le seuil Ulloma-Callapa (fig. 2) (TROLL *et al.*, 1935). Les rives de ce lac se trouvaient « entre 40

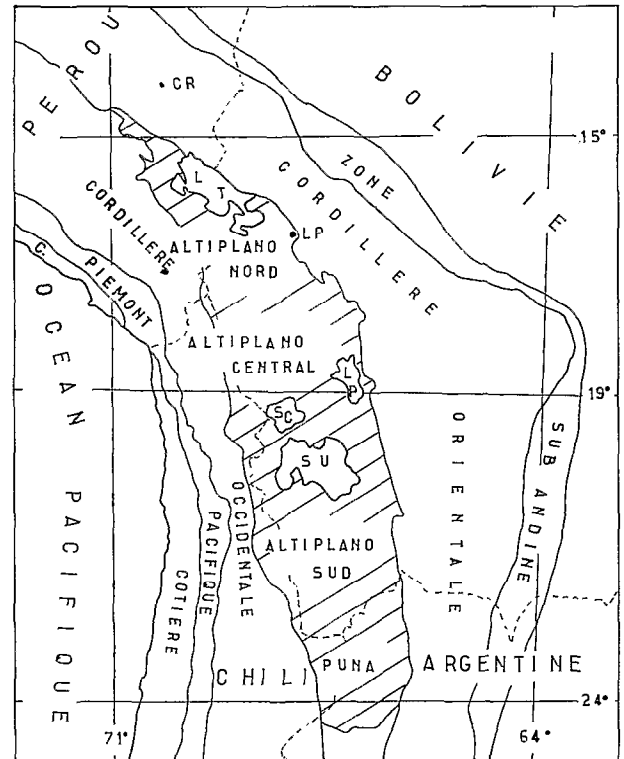


FIG. 1. — Position de l'Altiplano dans la Chaîne des Andes centrales. CR : Crucero, C : Cochabamba, LP : Lac Poopo, LPZ : La Paz, LT : Lac Titicaca, SC : Salar de Coipasa, SU : Salar Uyuni

et 60 mètres au-dessus du niveau actuel du Titicaca » (AHLFELD et BRANISIA, 1960).

Dans la partie centrale de l'Altiplano bolivien, les mêmes auteurs mentionnent d'autres dépôts lacustres. Ce sont ceux de l'ancien lac Minchin (décrits dès 1882, *in* BOWMAN, 1909) dont le niveau est bien marqué tout autour du bassin par un trottoir à stromatolites caractéristique.

Enfin dès 1976 FONTES et SERVANT décrivent la formation lacustre Tauca, la plus récente connue.

Plus récemment, SERVANT (1977), SERVANT et FONTES (1978) et SERVANT et SERVANT (1982) précisent le nombre et l'âge de ces extensions lacustres dans un contexte morpho-climatique en montrant leurs relations avec les épisodes glaciaires de la Cordillère Orientale (fig. 3).

Ils proposent un système d'évolution des extensions lacustres basé sur un schéma qui fait correspondre les maxima des niveaux lacustres aux périodes paroxysmales de fonte des glaciers.

On reconnaît cinq avancées maximales des glaces : glaciation Calvario, gl. Kaluyo, gl. Sorata, gl. Choqueyapu I, gl. Choqueyapu II, et trois étendues

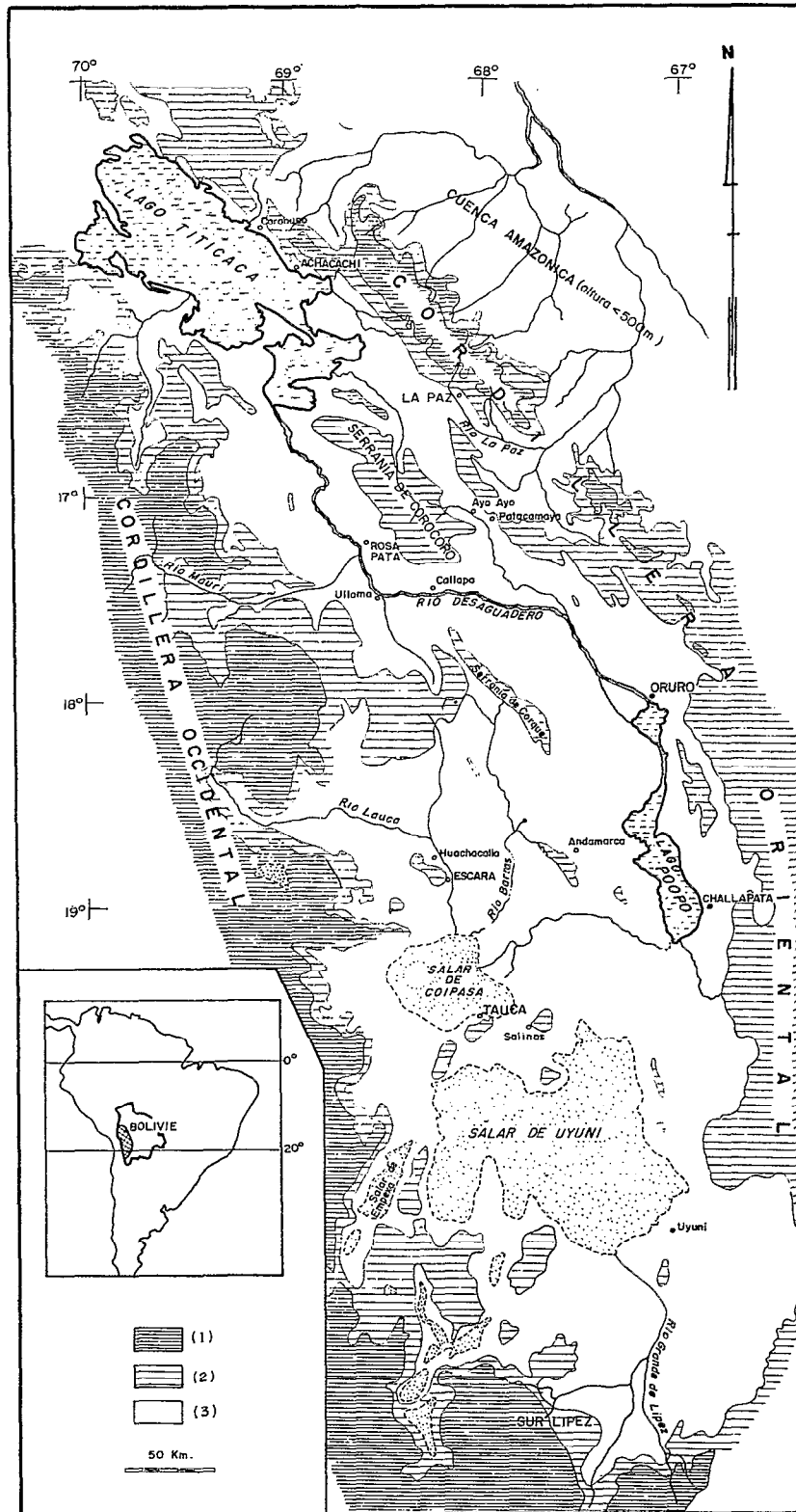
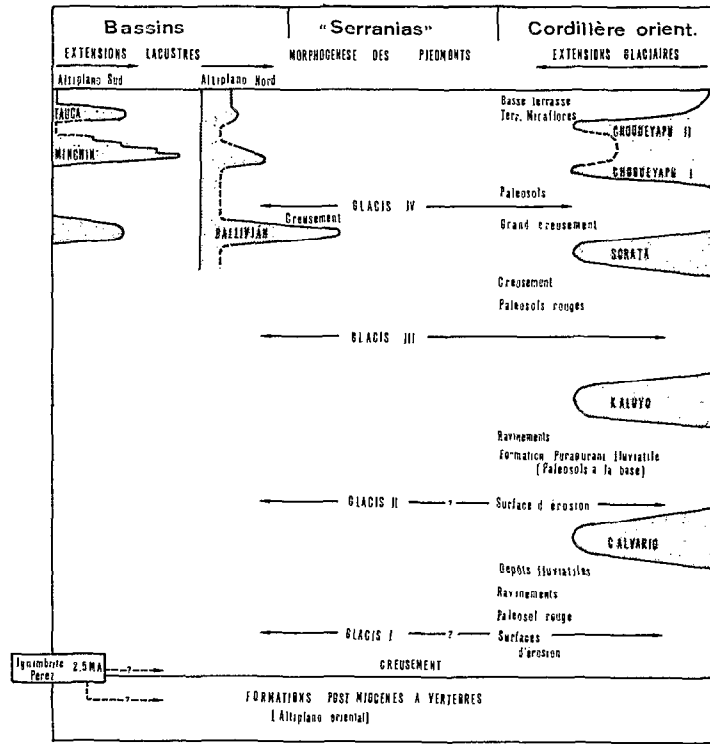
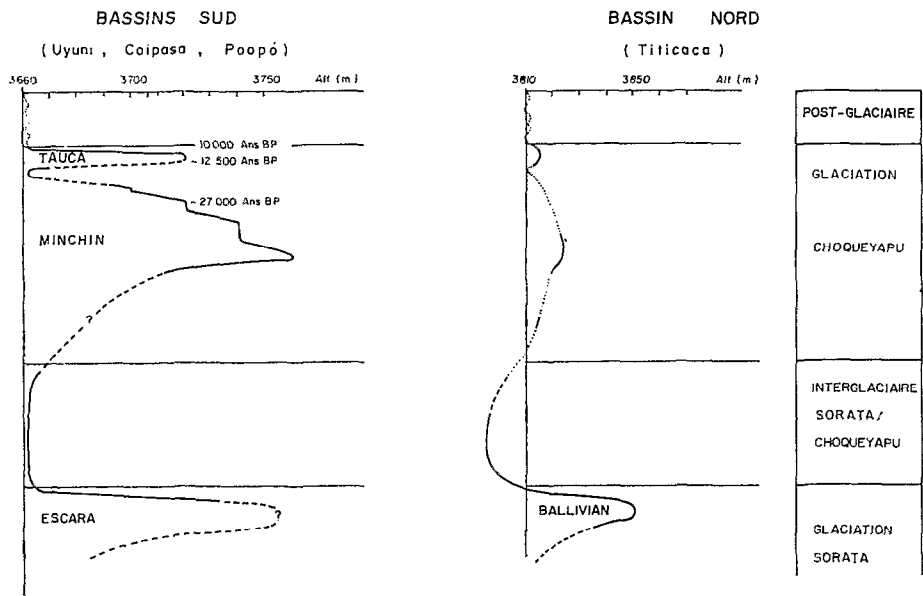


FIG. 2. — Croquis de l'Altiplano bolivien (d'après SERVANT et FONTES, 1978). 1 : altitudes supérieures à 4 500 m, 2 : altitudes comprises entre 4 000 et 4 500 m, 3 : altitudes comprises entre 3 600 et 4 000 m



A



B

FIG. 3. — Tableau des relations glaciaires-lacustres : A : Schéma stratigraphique du Plio-quaternaire de l'Altiplano des Andes tropicales en Bolivie (SERVANT, 1977). B : Les variations du niveau des lacs au sud et au nord de l'Altiplano (SERVANT et FONTES, 1978)

lacustres majeures : lac Ballivian, lac Minchin, lac Tauca.

Selon les derniers auteurs cités, la période lacustre Tauca, la plus récente, datée entre 11 000 et 13 000 ans B.P. (Pléistocène supérieur/Holocène) correspond au retrait du dernier stade glaciaire (Choqueyapu II). Ils ont daté la période lacustre qui lui est immédiatement antérieure, le lacustre Minchin, entre 22 000 et 27 000 ans B.P. environ. Elle correspondrait au retrait du pénultième stade glaciaire (Choqueyapu I). Enfin le lacustre Ballivian (Formation Azangaro/Ulloma) du Pléistocène moyen (?) correspondrait au recul des glaciers de la phase Sorata et serait antérieur à 35 000 ans B.P. (voir *infra*).

Aux grandes périodes post-glaciaires sont associées de grandes surfaces d'abrasion (et des terrasses) affectant le piedmont occidental de la Cordillère Orientale et l'Altiplano.

Nos récentes observations permettent donc de compléter et de réinterpréter ce schéma d'évolution reliant les épisodes glaciaires de la Cordillère Orientale et les épisodes lacustres de l'Altiplano.

#### NOUVEAUX DÉPÔTS LACUSTRES CABANA ET MATARO DE L'ALTIPLANO

C'est au Pérou, au nord-ouest du lac Titicaca, que l'on peut montrer clairement l'existence de deux niveaux lacustres plus anciens que ceux connus jusqu'alors (Tauca, Minchin et Ballivian) (fig. 4 et 5).

#### Les dépôts lacustres Cabana

Un premier niveau antérieur au lacustre Ballivian a déjà été mentionné par l'un d'entre nous (LAVENU, 1981) sous le nom d'extension lacustre pré-Ballivian. Nous nous proposons de lui attribuer le nom de lacustre Cabana.

Les dépôts de cette extension lacustre ont été étudiés dans la région de Deustua-Cabana au Cerro Japiza à 25 km au sud-ouest de Juliaca (70°20' ouest-15°38' sud). C'est une série lacustre détritique composée de laminites à argile et sable le tout de couleur bleutée ou rougeâtre, accompagnées de petits bancs de grès et de graves. Son épaisseur est de 50 m environ à l'affleurement. L'âge de cette série n'a pas pu être déterminé avec précision. Cependant on y observe un emboîtement des dépôts lacustres Ballivian. Elle est donc antérieure à ces niveaux et au moins du Pléistocène moyen.

Au nord du lac Titicaca (dans la zone de Mataro Chico, 70°12' ouest-15°05' sud) des dépôts identiques se trouvent emboîtés soit dans des reliefs taillés dans le substratum paléozoïque, soit dans des niveaux lacustres plus anciens (voir *infra*).

En Bolivie, dans les zones de Viacha, Estación Pando et Ulloma, on trouve des sédiments lacustres plus anciens que ceux de la formation Ulloma/Azangaro dans lesquels cette dernière est emboîtée. Ils présentent un faciès détritique le plus souvent composé de graves, sables et limons. Nous considérons ces sédiments comme équivalents à ceux de l'épisode lacustre Cabana.

Un trait morphologique constant à l'ensemble de ces dépôts (aussi bien au Pérou, au nord et nord-ouest du lac Titicaca, comme en Bolivie) est la présence d'une surface sommitale subhorizontale qui limite ces sédiments à une altitude de 3 900 m. C'est le niveau minimum atteint par le paléolac Cabana. Vers les reliefs cette surface passe à un pédiment qui recoupe les séries plus anciennes.

Le long de la rive est du lac Titicaca, si les sédiments Cabana n'existent pas, on trouve en revanche de très nombreux replats attestant de l'existence d'une surface d'abrasion dont la côte la plus basse est 3 900 m.

#### Les dépôts lacustres Mataro

C'est à Mataro Chico (fig. 4) 70°12' ouest-15°02' sud) que nous avons observé les dépôts les plus anciens que nous appelons : lacustre Mataro. Ils se présentent sous forme d'une série détritique monotone, montrant une alternance de bancs argilo-sableux, de couleur ocre et de passées de sables graveleux. La série, incomplète, affleure sur une cinquantaine de mètres d'épaisseur. Dans ces formations détritiques assez grossières, nous avons trouvé quelques rares restes de mammifères fossiles dont un bois de cervidé qui indique un âge quaternaire s.l. (détermination de Ch. de Muizon). La formation lacustre Cabana s'emboîte dans la formation Mataro : cette dernière est donc antérieure. L'épisode Mataro se placerait dans le Pléistocène ancien.

On ne connaît pas encore, avec certitude, de niveaux lacustres équivalents ; cependant, la Formation pléistocène bolivienne d'Ayo Ayo et la Formation Purapurani pourraient être de même âge (cf. *infra*).

Seul un argument morphologique permet de préciser l'extension de ce lac. En effet ces dépôts sont recoupés par une surface sommitale subhorizontale à 3 950 m d'altitude en moyenne. Elle indique le niveau minimum atteint par le plan d'eau.

Autour du lac Titicaca, en particulier sur sa rive nord-est, on retrouve des lambeaux de surface d'ablation qui attestent de la présence d'un plan d'eau à ce niveau. Mais, comme nous le verrons plus loin, ces niveaux sont décalés par failles et ne se retrouvent plus à la même altitude.

Plus au sud, vers Estación Pando, les dépôts

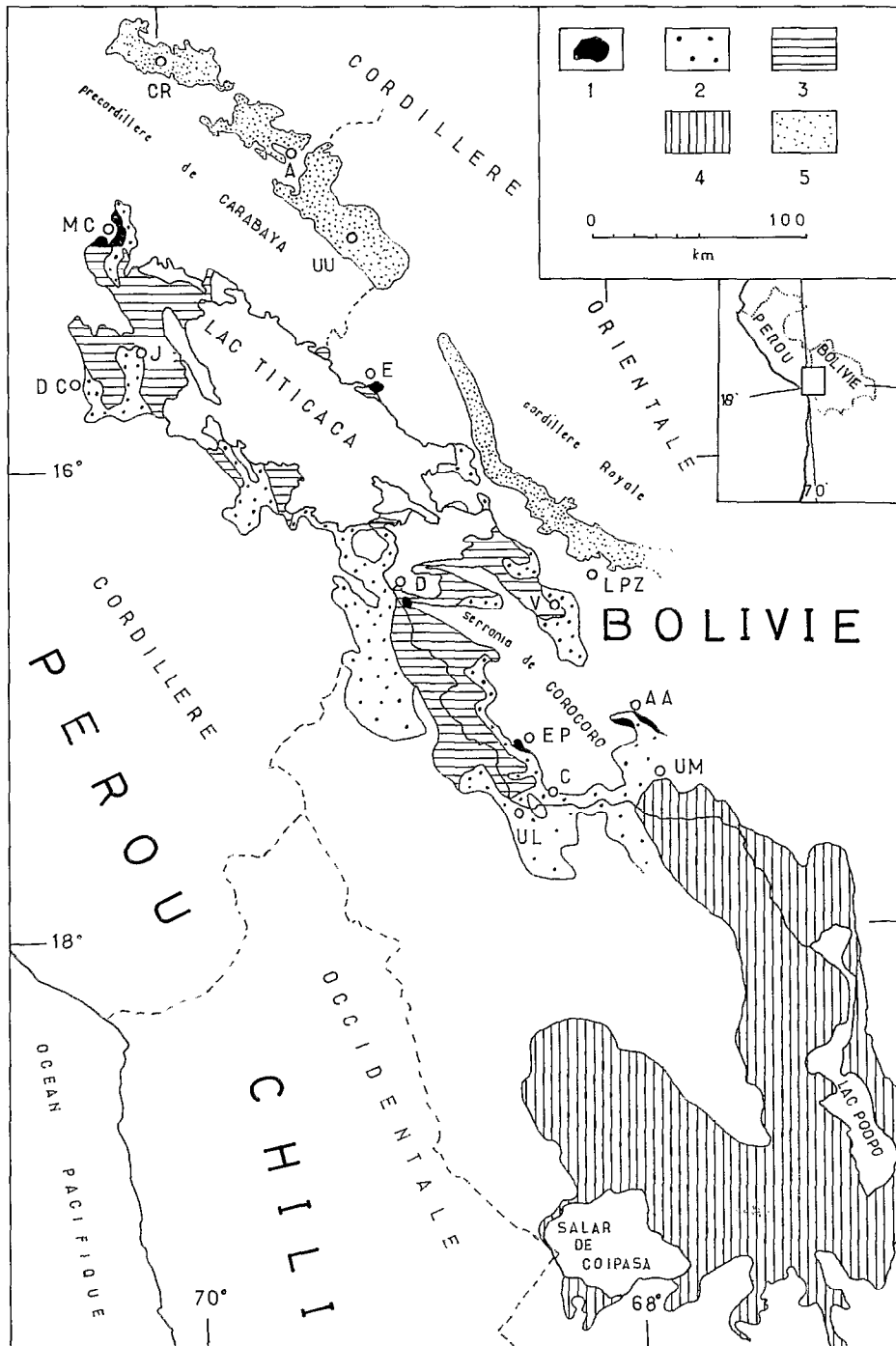


FIG. 4. — Les extensions lacustres dans l'Altiplano péruvo-bolivien. [Les lacs Escara et Tauca n'ont pas été représentés. Dans les régions du lac Poopo et du salar de Coipasa, les limites du lac Tauca sont incluses dans les limites du lac Minchin. Dans le Nord, les limites des lacs Minchin et Tauca sont sensiblement les mêmes que celles du lac Titicaca actuel ; elles débordent rarement ces dernières]. 1 : Lac Mataro, 2 : Lac Cabana, 3 : Lac Ballivian (formations Ulloma et Azangaro), 4 : Lac Minchin, 5 : Formations glaciaires et fluvio-glaciaires de la Cordillère Orientale. A : Ananea, AA : Ayo Ayo, C : Callapa, CR : Crucero, D : Desaguadero, DC : Deustua-Cabana, E : Escoma, EP : Estacion Pando, J : Juliaca, LPZ : La Paz, MC : Mataro Chico, UL : Ulloma, UM : Umala, UU : Ulla Ulla, V : Viacha, RD : Rio Desaguadero

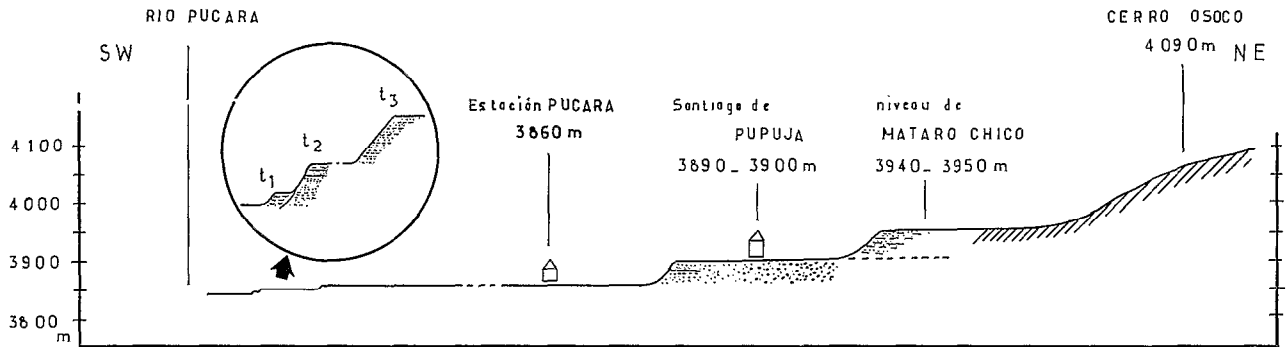


FIG. 5. — Coupe schématique à travers les formations Mataro et Cabana (sans échelle horizontale)

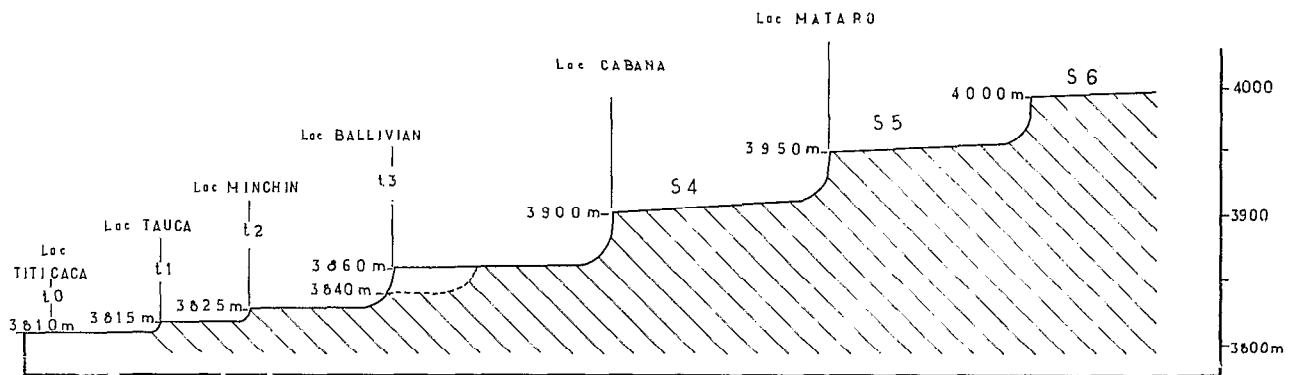


FIG. 6. — Schéma de l'emboîtement des différents niveaux lacustres dans l'Altiplano nord (sans échelle horizontale)

tertiaires sont recoupés eux aussi par une surface d'ablation à 3 950 m.

#### NOUVELLE CHRONOLOGIE LACUSTRE ET SURFACES ASSOCIÉES

Ainsi, l'ensemble de ces travaux permet d'envisager une nouvelle chronologie des niveaux et dépôts lacustres. A chacun de ces niveaux, nous pouvons associer des terrasses fluviales et/ou des surfaces d'ablation qui leur sont liées (fig. 6).

Le niveau lacustre Mataro correspond à une surface qui se développe à 3 950 m autour du paléobassin. Cette surface est liée à des sédiments qui font le raccord entre le niveau du lac et les reliefs (Mataro Chico, Desaguadero, Est. Pando).

Emboîté dans la formation Mataro, se développe le lacustre Cabana à 3 900 m. Ici aussi on trouve des glacis d'ablation qui sont liés à l'extension du lac (Cabana, Ulloma, etc.). Cette surface, qui passe parfois à un glacis-terrasse, est toujours très au-dessus du système de terrasses liées aux plans d'eau plus récents.

Suivant le même schéma, les dépôts du lac Ballivian (F. Azangaro et Ulloma) sont aussi emboîtés dans la Formation Cabana. Le niveau du lac se trouvait à 3 860 m et des glacis-terrasses et des terrasses fluviales lui sont associés.

Viennent ensuite les niveaux représentés par la surface sommitale des dépôts Minchin, ainsi que par les terrasses fluviales contemporaines.

Les derniers niveaux lacustres et fluviales, morphologiquement les plus bas, sont ceux qui correspondent au lac Tauca et aux terrasses tourbeuses holocènes.

#### LES ÉPISODES GLACIAIRES DE LA CORDILLÈRE ORIENTALE

##### En Bolivie

Après les études de TROLL *et al.* (1935) et DOBROVOLNY (1962), SERVANT dès 1976, puis BALLIVIAN *et al.* (1978), proposent un nouveau schéma d'organisation du système glaciaire et interglaciaire de la Cordillère Orientale, dans le bassin de La Paz (fig. 3).

### Les glaciations anciennes

Les vestiges de ces glaciations montrent qu'elles s'étendaient largement, en forme de plateau, au pied de la Cordillère Orientale.

Après une phase d'ablation importante à la fin du Pliocène (Formation La Paz), les dépôts quaternaires débutent par la formation Calvario. C'est la première glaciation reconnue au Quaternaire (1).

Dans la plupart des cas elle repose sur une série fluviale ravinante, parfois fluvio-glaciaire, de type coulée de boue (formation pré-Calvario). L'ensemble pré-Calvario/Calvario atteint une épaisseur de 100 m.

Après une nouvelle phase d'érosion, qui fait disparaître vers le sud-ouest la formation Calvario, une série interglaciaire se dépose : c'est la formation conglomératique Purapurani, très épaisse (400 m, BLES *et al.*, 1977).

On y distingue un certain nombre de niveaux d'altération et paléosols. Elle est tranchée en son sommet par une importante surface de ravinement.

Sur cette surface viennent les dépôts de la deuxième glaciation (gl. Kaluyo). Les dépôts morainiques en amont (dépôts glaciaires avec intercalations fluvio-glaciaires) passent à des graves fluvio-glaciaires et fluviales sans matrice argileuse, vers l'aval.

La période interglaciaire qui suit est marquée par une forte érosion des sédiments et une pédogenèse très développée avec de nombreux témoins d'une altération importante. Une surface d'ablation recoupe ces niveaux.

### Les glaciations récentes

Après une phase de creusement importante de la surface d'ablation antérieure, le régime glaciaire s'installe à nouveau.

La troisième glaciation (gl. Sorata) est marquée par d'importantes moraines latérales qui occupent les vallées nouvelles, mais qui débordent aussi sur la dernière surface d'ablation.

Après une nouvelle érosion linéaire qui permet au cours d'eau de s'enfoncer davantage, les parties hautes des vallées sont occupées par les glaciers de la glaciation Choqueyapu dans laquelle il est possible d'individualiser deux avancées glaciaires successives : Choqueyapu I et Choqueyapu II. Grâce à des travaux de datation au  $C^{14}$ , sur des tourbes de la Cordillère Orientale (GRAF-MEIER, 1981 ;

ARGOLLO, 1982), la glaciation Choqueyapu I a pu être datée de plus de 35 000 ans B.P. et Choqueyapu II entre 10 et 16 000 ans B.P. (vers 11 000 ans B.P. au Pérou, MERCER et PALACIOS, 1977).

### Au Pérou

Des précisions sur l'évolution morphologique et géologique récente ont été obtenues dans les bassins intracordillérains (altitude de 4 000 à 4 500 m) de Crucero et Ananea à environ 75 km au nord et au nord-est de Mataro Chico. Il s'agit de bassins alignés suivant une direction structurale nord-ouest/sud-est, séparés de l'Altiplano par une zone de reliefs (alt. 5 100 m) qui forme la précordillère de Carabaya (fig. 1, 4).

Ces bassins se sont probablement individualisés postérieurement aux émissions de produits volcaniques acides de type ignimbrétique qui forment des nappes étendues (dôme de Quenamari, zone de Hacienda Picotani). Ces ignimbrites, plissées et faillées, ont un âge allant du Miocène au Pliocène inférieur.

Le remplissage récent des bassins débute par une série pré-glaciaire (formation Arco Aja) [FORNARI *et al.*, 1981]. On distingue un membre inférieur formé de sédiments fins lacustres et palustres (argilites gris-bleuté avec quelques passées sableuses et bancs de graviers et petits galets). Un niveau cinéritique, interstratifié dans les argilites a été identifié dans le bassin d'Ananea indiquant un événement volcanique régional. Un résultat K/Ar sur sur biotite de  $3,8 \pm 0,4$  ma vient d'être obtenu par M. Bonhomme et C. Vivier, laboratoire de géochronologie, université de Grenoble qui confirme l'âge Pliocène de la formation Arco Aja. (relation possible avec le tuf ignimbrétique du Pliocène de La Paz?).

Le fond du bassin est caractérisé par une paléotopographie différenciée et l'épaisseur du membre inférieur varie selon les endroits de 70 m à plus de 150 m.

Le membre supérieur est formé par un matériel fluviale conglomératique d'au moins 50 m de puissance. Les galets sont bien roulés et leur dimension est relativement homogène. Leur nature pétrographique est variée mais correspond à des roches qui affleurent localement dans les zones amonts, indiquant un régime torrentiel avec des précipitations relativement abondantes. Le passage de la série

(1) Cette interprétation est contestée par CLAPPERTON (1979) qui considère comme DOBROVOLNY (1962) qu'il existe une glaciation antérieure à la glaciation Calvario et sous-jacente à l'ignimbrite Chijini qu'il date à 3,27 MA. Cette glaciation serait donc, pour Clapperton, d'âge Pliocène. En fait, BALLIVIAN *et al.* (1978) constatent que l'ignimbrite Chijini est intercalée dans le sommet de la formation Pliocène La Paz. Pour ces auteurs ce n'est qu'après une phase d'érosion et de paléosols que se déposent les niveaux glaciaires et fluvio-glaciaires du Quaternaire. A l'intérieur de ces niveaux quaternaires existe un deuxième tuf ignimbrétique confondu jusqu'alors avec le précédent, d'âge Pliocène.



	PEROU	BOLIVIE
HOLOCÈNE	<ul style="list-style-type: none"> <li>petite crue glaciaire recouvrant des travaux miniers vers 1899</li> <li>événement à ± 650 ans (Fontes inédit)</li> </ul>	
PLEISTOCÈNE	PAMPA MOLINO	
	RINCONADA	CHOQUEYAPU II
	ISLA PAIPA (altération, paléosol local)	CHOQUEYAPU I (érosion fluviale)
	CHAQUIMINAS (érosion fluviale sol, altération)	SORATA (érosion fluviale altération, pédogenèse)
	ANCOCALA (forte altération rouge)	KALUYO
	traces de glaciation (position non fixée)	CALVARIO (altération rouge)
PLIOCÈNE	Formation ARCO-AJA (fluviale, congl., lacustre, palustre)	Formation LA PAZ
	Ignimbrite?	

\* Dans le bassin de Crucero ces ignimbrites seraient en fait plus anciennes (âge à 17 MA) (Fornari et al., travaux en cours).

FIG. 7. — Tableau de correspondance des événements glaciaires au Pérou et en Bolivie (selon FORNARI *et al.*, 1981 et SERVANT, 1977)

fine inférieure aux conglomérats se fait progressivement.

Après le remplissage des bassins par cette série pré-glaciaire, se place une étape d'érosion qui se marque en partie par le développement de glacis. On distingue un glacis ancien ( $t_6$ ) qui ne subsiste plus que sous forme de lambeaux isolés. Le glacis  $t_5$  est relativement mieux conservé ; il montre une forte altération rouge développée sur environ 3 m de puissance.

Les épisodes glaciaires, nettement reconnus et représentés par des moraines, sont postérieurs au glacis  $t_5$ . On distingue un glaciaire ancien, appelé stade Ancocala (FORNARI *et al.*, 1981).

Le matériel morainique correspondant présente généralement une coloration ocre, la matrice et les blocs sont relativement cohérents et il y a une certaine évolution de type pédogénétique. Bien que le matériel glaciaire Ancocala ait été souvent érodé ou recouvert, on peut se rendre compte de son importante extension.

La glaciation Ancocala est la plus ancienne à avoir été mise indubitablement en évidence. Cependant dans les bassins d'Ananea et de Macusani (au nord de Crucero), nous avons observé des traces d'un épisode glaciaire antérieur (alignement de blocs erratiques). Mais les observations ne permettent pas de préciser s'il s'agit d'une avancée maximum (sous-stade), du cycle beaucoup plus ancien (peut-être équivalent à la glaciation Calvario de Bolivie, cf. *supra*). Sur le matériel glaciaire Ancocala, s'est installé une surface d'ablation (glacis  $t_4$  accompagnée

d'un début de dissection fluviale avant la mise en place des glaciations récentes. Celles-ci se caractérisent par des formes morainiques généralement bien conservées. On distingue quatre phases importantes d'avancée et de stationnement glaciaires.

La première, la phase Chaquiminas correspond à l'avancée maximum (environ 15 km) des glaciations récentes avec des langues glaciaires empruntant des vallées relativement profondes, surtout dans les sédiments de la formation Arco Aja. Elles atteignent souvent le substratum paléozoïque du bassin. La moraine frontale de l'étape Chaquiminas a été remaniée vers l'aval en cônes fluvio-glaciaires, dépôts fluviaux et coulées de boue, puis a souvent été érodée. Par contre les moraines latérales sont généralement bien conservées.

Les étapes suivantes (Isla Pampa, Rinconada, Pampa Molino) se caractérisent par des arcs frontaux échelonnés dans les vallées occupées par l'étape Chaquiminas.

Une comparaison avec les travaux de SERVANT (1977) dans la Cordillère Orientale de Bolivie, permet d'établir le tableau de correspondances de la figure 7.

#### CORRÉLATIONS LACUSTRES, GLACIAIRES, TERRASSES FLUVIALES, SURFACES D'ABRASION

Comme nous l'avons déjà vu dans le premier paragraphe, SERVANT dès 1977 propose un schéma d'évolution morpho-climatique basé sur les correspondances entre les périodes paroxysmales de fonte des glaciers de la Cordillère et les extensions des trois grands derniers lacs de l'Altiplano : Tauca, Minchin, Ballivian.

Aussi, après avoir montré l'existence de deux nouvelles périodes lacustres plus anciennes, nous proposons de nouvelles corrélations entre ces différents épisodes lacustres et les périodes glaciaires (fig. 8).

Au pied de la Cordillère Orientale, le système lacustre et glaciaire repose sur une vieille surface du Quaternaire ancien ou du Pliocène supérieur, très certainement polygénique :  $S_6$ . Cette surface recoupe les structures du Pliocène inférieur plissé dans la région de La Paz.

Au pied de la Cordillère Occidentale, cette surface, qui recoupe là aussi les structures du Pliocène et du Miocène, est fossilisée par l'ignimbrite Perez.

Le paléolac le plus ancien, le lac Mataro, se développe largement sur l'Altiplano. La montée des eaux correspondrait au recul de la glaciation Calvario et la partie sommitale des dépôts serait contemporaine d'une grande surface d'ablation qui se développe autour du paléolac à 3 950 m d'altitude (sauf vers Escoma où des failles décalent cette surface). Elle va s'emboîter en amont sur les reliefs de la Cordillère Orientale et des « Serranías » (collines)

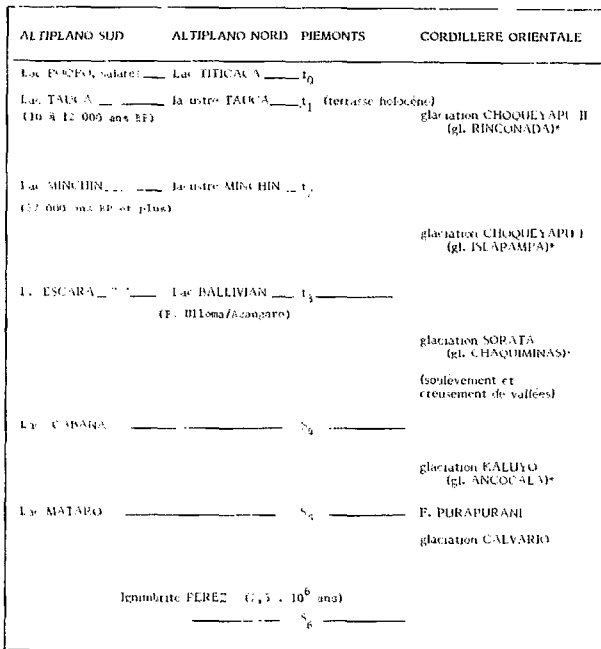


FIG. 8. — Nouvelles relations entre les étendues lacustres, les surfaces d'ablation, les terrasses et les périodes glaciaires (la partie Cordillère Orientale est adaptée de SERVANT, 1977 et FORNARI *et al.*, 1981)

de l'Altiplano, en particulier la Serrania de Corocoro. Nous appelons cette surface :  $S_5$ .

Dans la région d'Ayo Ayo et Umala des sédiments lacustres montrent une alternance de limons argileux, de sable, de grès. La découverte de fossiles (*Macrauchenia sp.*; *Scelidodon sp.*; *Glossotherium sp.*) a permis d'attribuer un âge Pléistocène inférieur s.l. à ces dépôts (HOFFSTETTER *et al.*, 1971). Des arguments stratigraphiques et géomorphologiques permettent de faire des corrélations avec le bassin de La Paz (LAVENU, 1978). On montre que la formation lacustre Ayo Ayo du Pléistocène est l'équivalent de la série fluvio-lacustre Purapurani. Pour les mêmes raisons géomorphologiques, en particulier le fait que ces séries soient comprises entre les mêmes surfaces d'ablation, la formation Ayo Ayo serait l'équivalent de la série lacustre Mataro.

Les dépôts du paléolac correspondant à l'extension Cabana s'emboîtent dans les dépôts du lac précédent. Le lac Cabana correspondrait, suivant le même schéma, au recul de la glaciation Kaluyo. La surface d'ablation qui lui est associée (à 3 900 m) est le niveau  $S_4$ . Généralement, les surfaces  $S_5$  et  $S_4$  dominant de plusieurs dizaines de mètres le fond des vallées des cours d'eau actuels.

L'extension de ces surfaces  $S_5$  et  $S_4$  dans le nord et le centre de l'Altiplano permet de penser qu'à

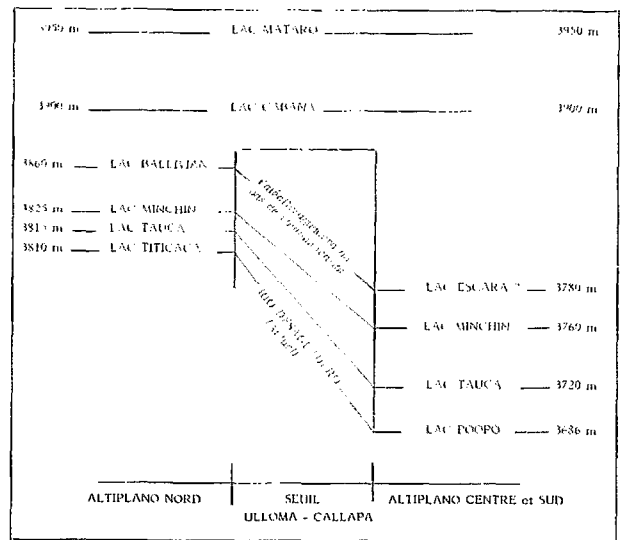


FIG. 9. — Communications entre bassins nord et centre en fonction du seuil Ulloma-Callapa

ces époques, le seuil de Ulloma-Callapa, que traverse en gorge actuellement le rio Desaguadero, ne devait pas exister et que les deux lacs Mataro puis Cabana formaient un seul plan d'eau dans l'Altiplano (fig. 9). Ils devaient s'étendre jusqu'au Chili à l'emplacement des salars actuels de Ollague, San Martin et Ascotan au sud-ouest du Salar d'Uyuni.

Ensuite viennent s'emboîter dans les dépôts précédents ceux du lac Ballivian qui correspond au recul de la glaciation Sorata. Là se développent des terrasses fluviales et des glacis-terrasses associés. Nous les appelons  $t_3$ . Ces niveaux correspondent à un plan d'eau à 3 860 m d'altitude. Les terrasses fluviales sont généralement à 5/6 m au-dessus du cours d'eau actuel (en amont la dénivellée peut être plus importante). Des sédiments lacustres, observés par SERVANT (1978) dans l'Altiplano sud (Formation Escara) pourraient être l'équivalent de ceux du lac Ballivian.

Autour du lac Titicaca, on note un niveau de terrasses à 3 840 m (fig. 6), taillées, la plupart du temps dans les formations lacustres du lac Ballivian. On ne connaît pas de terrasses fluviales associées et ce niveau pourrait correspondre à une courte période de stabilité lors de la phase générale d'abaissement du lac Ballivian.

Les dépôts du lac Minchin (qui se trouvent à 3 825 m dans la partie nord de l'Altiplano) sont généralement emboîtés dans les dépôts du lac Ballivian. Ils correspondent au retrait des glaciers de la période Choqueyapu I. A ce niveau lacustre Minchin est associé un système de terrasses alluviales emboîtées aussi dans les terrasses précédentes. C'est le

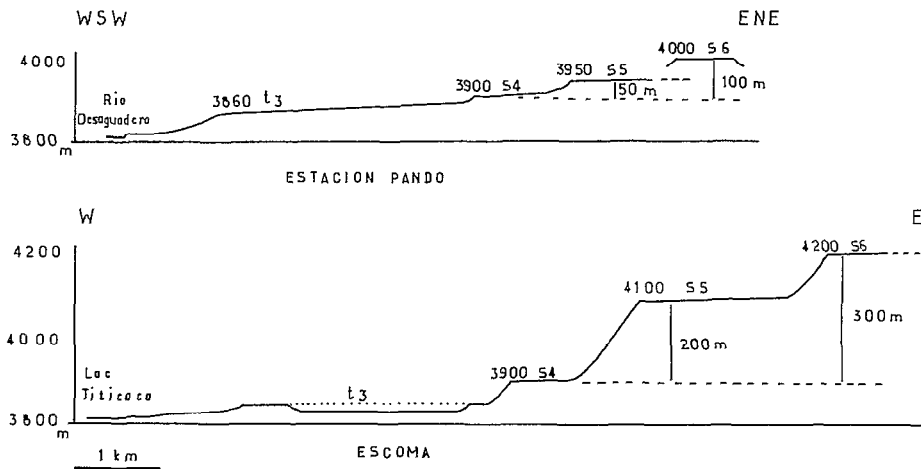


Fig. 10. — Étagement des surfaces d'ablation dans l'Altiplano (zone d'E. Pando) et sur le Piedmont de la Cordillère Orientale (zone d'Escoma)

système  $t_2$  qui se trouve à 3 ou 4 m au-dessus des cours d'eau actuels.

Enfin les niveaux du lac Tauca (à 5 m au-dessus du lac Titicaca) correspondent aux basses terrasses alluviales holocènes, tourbeuses sur l'ensemble de l'Altiplano et des Cordillères. C'est le système  $t_1$ . Il est contemporain du retrait de la deuxième avancée Choqueyapu II. Les terrasses  $t_1$  sont environ à 1 m, parfois moins, au-dessus des talwegs.

#### LES DÉFORMATIONS EN EXTENSION

Durant toute la période quaternaire, les dépôts et les surfaces d'ablation du Pléistocène sont affectés par la tectonique en extension.

Ces déformations sont surtout visibles au pied de la Cordillère Orientale, depuis La Paz jusqu'à la frontière péruvienne, le long de la côte est du lac Titicaca. Ici les surfaces  $S_5$  et  $S_6$  sont découpées par des accidents de direction andine (N 130 en moyenne) à rejeu normal extensif, et des portions de ces surfaces sont portées à des altitudes anormalement hautes en comparaison de l'étagement des surfaces dans le centre de l'Altiplano (fig. 10). Ainsi à Escoma on trouve les surfaces  $S_5$  à 4 090/4 120 m et  $S_6$  à 4 200 m.

Dans le bassin de La Paz, on observe une déformation extensive de même âge et aux rejets de même ampleur. Ici la surface  $S_4$  postérieure aux dépôts de la formation interglaciaire Purapurani est affectée

par des failles normales dont les rejets peuvent atteindre une centaine de mètres. L'analyse de la déformation montre une extension de direction nord-sud (LAVENU, 1978, 1981).

#### CONCLUSION

Des travaux de terrain nous ont permis de mettre en évidence l'existence de nouveaux dépôts d'origine lacustre. Ces dépôts correspondent à des extensions lacustres que nous nous proposons d'appeler lac Mataro pour la plus ancienne et lac Cabana pour la suivante. Ces deux lacs sont antérieurs au lac quaternaire le plus ancien connu jusqu'alors sur l'Altiplano : le lac Ballivian. Un bois de cervidé fossile permet de donner un âge quaternaire à la Formation Mataro. Les arguments morphologiques nous font placer les nouveaux dépôts dans le Pléistocène inférieur à moyen.

Les dépôts Mataro du Pérou correspondraient aux dépôts lacustres pléistocène de Ayo Ayo et à la formation fluvio-lacustre Purapurani du bassin de La Paz.

En s'appuyant sur le schéma proposé par Servant nous corrélons l'extension maximum de ces étendues lacustres avec les périodes paroxysmales de fonte des deux premières glaciations décrites en Bolivie.

Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.,  
le 27 septembre 1983

## BIBLIOGRAPHIE

- AGASSIZ (A.), 1876. — Hydrographic sketch of Lake Titicaca. *Proc. Amer. Acad. Arts et Sci.*, vol. XI : 283.
- AHLFELD (F.), 1946. — Geologia de Bolivia. *Rev. Museo La Plata, Sect. Geologia*, tomo 3 : 5-370.
- AHLFELD (F.) et BRANISA (L.), 1960. — Geologia de Bolivia, 245 p., *Inst. Bol. del Petr.*, Don Bosco édit., La Paz, Bolivie.
- ARGOLLO (J.), 1982. — Évolution du piedmont ouest de la Cordillère Royale (Bolivie) au Quaternaire. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Univ. Aix-Marseille.
- BALLIVIAN (O.), BLES (J. L.) et SERVANT (M.), 1978. — El Plio-cuaternario de la region de La Paz (Andes orientales, Bolivia). *Cah. O.R.S.T.O.M., ser. Géol.*, vol. X, n° 1 : 101-113.
- BLANCO (M.), 1980. — Evolucion plio-cuaternaria de la cuenca de Charana (Cordillera Occidental, Bolivia). Tesis de grado UMSA, La Paz, Bolivia.
- BLES (J. L.), BALLIVIAN (O.), 1977. — Cuadro geologico general. Plan de desarrollo de la ciudad de La Paz, H.A.M., BRGM-BGEOM, P.C. y aso., 18 p.
- BOULANGE (B.), RODRIGO (L. A.) et VARGAS (C.), 1978. — Morphologie, formation et aspects sédimentologiques du lac Poopo (Bolivie). *Cah. O.R.S.T.O.M., ser. Géol.*, vol. X, n° 1 : 69-78.
- BOWMAN (I.), 1909. — Physiography of the Central Andes. *Am. Jour. Sci.*, series 4-28, 197-207 : 373-402.
- CLAPPERTON (C. M.), 1979. — Glaciation in Bolivia before 3,27 Myr. *Nature*, vol. 277 : 375-377.
- DOBROVOLNY (E.), 1962. — Geologia del Valle de La Paz. Pub. Min. Minas y Petroleo, Bol., 3, 153 p.
- DOUGLAS (J. A.), 1914. — Geological Sections through the Andes of Peru and Bolivia : I, From the Coast at Arica in the North of Chile to La Paz and the Bolivian « Yungas ». *Quart. Jour. Geol. Soc.*, London, 70 : 1-53.
- EVERNDEN (J. F.), KRIZ (S. J.), CHERRONI (C. M.), 1977. — Potassium — Argon ages of some bolivian rocks. *Economy geology*, 72 : 1042-1061.
- FONTES (J.-Ch.), SERVANT (M.), 1976. — Dataciones radiométricas sobre el Cuaternario reciente del Altiplano de Bolivia. 1<sup>o</sup> Congreso Nacional de Geologia. Potosi, Bolivia.
- FORNARI (M.), GRANDIN (G.), HERAIL (G.), JUNGBLUTH (R.), LAUBACHER (G.), RODRIGUEZ (W.), VERGARRA (J.), ZEGARRA (J.), 1981. — Les minéralisations aurifères de la Cordillère sud-orientale du Pérou. Rôle de l'évolution géomorphologique dans la création des placers. Deuxième partie du rapport final de l'Action conjointe INGEMET-O.R.S.T.O.M., convention 1977-1980. Lima, inédit.
- GRAF MEIER (K.), 1981. — Palynological investigations of two post-glacial peat bogs near the boundary of Bolivia and Peru. *Journal of biogeography*, 8 : 353-368.
- HOFFSTETTER (R.), MARTINEZ (Cl.), MUÑOZ-REYEZ (J.) et TOMASI (P.), 1971. — Le gisement d'Ayo Ayo (Bolivie), une succession stratigraphique pliocène-pléistocène datée par des mammifères. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. V, 273 : 2472-2475.
- LAVENU (A.), 1978. — Néotectonique des sédiments plio-quaternaires du nord de l'Altiplano bolivien (région de La Paz, Ayo-Ayo, Umala). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.*, vol. X, n° 1 : 115-126.
- LAVENU (A.), 1981. — Origine et évolution néotectonique du lac Titicaca. *Rev. d'hydrobiol. trop.* 14 (4) : 289-297.
- MERGER (J. M.), PALAGIOS (M. O.), 1977. — Radiocarbon dating of the last glaciation in Peru. *Geology*, V, 5 : 600-604.
- MOON (H. P.), 1939. — Geology and physiography at the Altiplano of Peru and Bolivia. *Trans. Linnean Soc. of London*, 3<sup>e</sup> ser., vol. 1 : 27-43.
- NEVEU-LEMAIRE (M.), 1906. — Les lacs des hauts plateaux de l'Amérique du Sud. *Imp. Nat.*, Paris, 197 p.
- NEWELL (N. D.), 1949. — Geology of the lake Titicaca region. Peru and Bolivia. *Geol. Soc. Am. memoir*, 36, 111 p.
- NUÑEZ (R.), 1964. — Estudio geologico de la zona de Charaña. Eduardo Abaroa. General Perez. UMSA, Tesis, La Paz.
- ORBIGNY (d') (A.), 1847. — Voyage dans l'Amérique méridionale. Paris, Strasbourg.
- POMPECKI (S. F.), 1905. — Mastodont-Reste aus den interandininen Hochlande von Bolivien. *Paleontographica*, 52 : 51 et s., Stuttgart.
- SEFVE (I.), 1910. — Hyperhippidium, eine neue sudamerikan Pferdegattung Kgl. Svenska Handlingen, 46, n° 2.
- SEFVE (I.), 1915. — Seelidotherium-Reste aus Ulloma Bolivien, *Bull. Geol. Ins. Univ. Upsala*, t. 13 : 61-92.
- STEINMANN (G.), 1929. — Geologie von Peru, 448 p., Karl Winter, Heidelberg.
- SERVANT (M.), 1976. — El cuaternario del Altiplano de Bolivia. Extensiones lacustres y morfogenesis. 1<sup>o</sup> Congreso Nacional de Geologia, Potosi, Bolivia.
- SERVANT (M.), 1977. — La cadre stratigraphique du Plio-quaternaire de l'Altiplano des Andes tropicales en Bolivie. *Recherches françaises sur le Quaternaire. INQUA, Suppl. Bull. AFEQ*, 1977, 1, n° 50 : 323-327.
- SERVANT (M.) et FONTES (J.-Ch.), 1978. — Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes Boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.*, vol. X, n° 1 : 9-23.
- SERVANT (M.), SERVANT-VILDARY (S.), 1982. — Le Plio-quaternaire des Andes de Bolivie, 9<sup>e</sup> RAST, Paris.
- TROLL (K.), 1927-1928. — Forschungsreise in den zentralen Anden von Bolivia und Peru. *Peterm. Mitt.*, t. 73 : 41-43 et 218-222, t. 74 : 100-103.
- TROLL (K.) et FINSTERWALDER (R.), 1935. — Die kanden der Cordillera Real und des Talkessels von La Paz (Bolivien) und die Diluvial geschichte der zentralen Anden, *Peterm. Mitt.*, t. 81, n° 11 : 393-399 et n° 12 : 445-455.