

Origine et évolution néotectonique du lac Titicaca⁽¹⁾

Alain LAVENU*

RÉSUMÉ

L'actuelle extension du lac Titicaca est le résultat de l'évolution tectonique quaternaire de cette zone où, après la période de sédimentation du Pliocène, se sont succédés : 1) la phase de compression andine E-W du Pliocène supérieur (avec décrochements prédominants et $X = N-S$) qui affecte le Pliocène inférieur ; 2) l'épisode de compression N-S probablement pléistocène ancien qui affecte le Pliocène terminal (Formation Perez datée à 2,5 MA) et 3) une période de distension qui va caractériser tout le Quaternaire.

La caractérisation des épanchements volcaniques, des niveaux lacustres anciens, des moraines et des glacis sont des indices importants dans la détermination des déformations quaternaires en distension responsables de la création de la fosse du lac Titicaca.

MOTS-CLÉS : Lac Titicaca — Andes — Extension — Pléistocène.

ABSTRACT

NEOTECTONIC EVOLUTION AND ORIGIN OF LAKE TITICACA

The present extension of Lake Titicaca is the result of Quaternary tectonic evolution of this zone. Following the period of Pliocene sedimentation there occurred three deformation events: 1) The E-W Andean compression phase of the upper Pliocene (with predominant strike slip faults and $X = N-S$) which resulted in deformation of beds of Lower Pliocene age; 2) N-S compressive events of probable earliest Pleistocene age which affected beds of uppermost Pliocene age (i.e. Perez Formation dated at 2,5 My bp); and 3) an extension period which characterizes the remaining part of the Pleistocene.

The characterization of: 1) volcanic flows, 2) ancient lacustrine levels, 3) moraines, and 4) pediments are important indications in the determination of the extensive Quaternary deformations responsible in the creation of the Lake Titicaca fossa.

KEY WORDS : Lake Titicaca — Andes — Extension — Pleistocene.

RESUMEN

ORIGEN Y EVOLUCIÓN NEOTECTÓNICA DEL LAGO TITICACA

La extensión actual del lago Titicaca es el resultado de la evolución tectónica cuaternaria de esta zona donde, después del periodo de sedimentación del Plioceno, se sucedieron: 1) la fase de compresión andina E-W del Plioceno superior (con fallas de rumbo predominantes y $X = N-S$) que afecta al Plioceno inferior; 2) el episodio de compresión N-S probablemente pléistoceno antiguo que afecta al Plioceno terminal (Formación Perez datada a 2,5 MA) y 3) un periodo de distensión que va a caracterizar todo el Cuaternario.

(1) Étude réalisée dans le cadre de la convention O.R.S.T.O.M. Université Majeure de San Andrés (La Paz, Bolivie).

* Mission O.R.S.T.O.M., Cajón Postal 8714, La Paz (Bolivie).

sión N-S probablemente Pleistoceno inferior que afecta el Plioceno terminal (Formación Perez de 2,5 MA); y 3) un periodo de distensión que caracterisara todo el Cuaternario.

La caracterización de los derrames volcánicos, los niveles lacustres antiguos, las morenas y los glaciais son indices importantes para la determinación de las deformaciones cuaternarias en distensión responsables de la creación de la fosa del lago Titicaca.

PALABRAS CLAVES : Lago Titicaca — Andes — Distensión — Pleistoceno.

Après la phase de compression du Miocène terminal et pendant tout le Pliocène inférieur, des dépôts continentaux se sont largement répandus dans le Nord de l'Altiplano entre les Cordillères Occidentale et Orientale, leur épaisseur pouvant atteindre 1000 m au niveau de l'Altiplano bolivien (fig. 1).

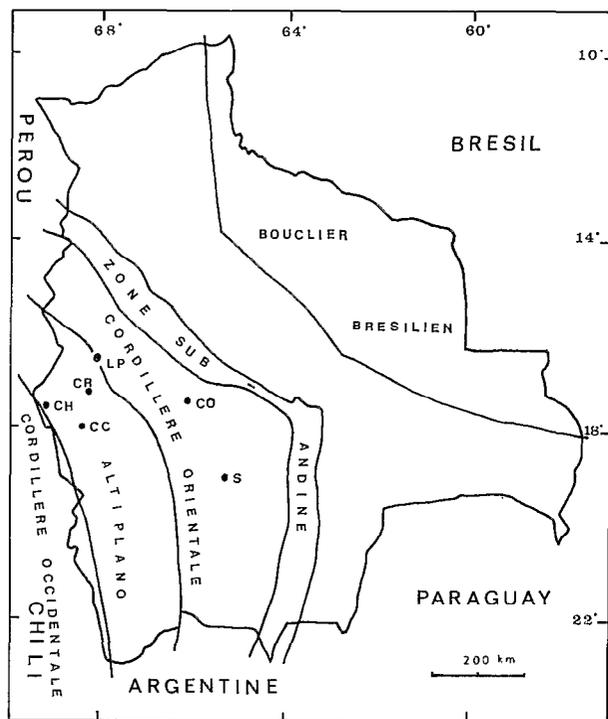


FIG. 1. — Principales unités morpho-structurales de Bolivie. CC = Curahuara de Carangas; CH = Charana; CO = Cochabamba; CR = Corocoro; LP = La Paz; S = Sucre

Ces dépôts sont affectés par la dernière phase importante de compression andine. Elle se manifeste surtout par une tectonique cassante en décrochements et failles inverses avec $Z \approx E.W$ et $X \approx N-S$, cela

dans le bassin de La Paz; dans le centre de l'Altiplano, elle se caractérise par un plissement isopaque à grand rayon de courbure. Les failles inverses et les décrochements réactifs souvent des failles anciennes. On peut voir sur la figure 2 les principaux linéaments et failles qui affectent les terrains de l'Altiplano et de la Cordillère Orientale au niveau du lac Titicaca. Après cette période de compression apparaît un régime en distension. Cela entraîne, dans la Cordillère Occidentale et sur sa retombée vers l'Altiplano, l'épanchement de grandes nappes d'ignimbrites pliocènes (F. SENCCA au Pérou, PEREZ en Bolivie, datée à 2,5 MA) qui s'installent sur de grandes surfaces d'aplanissement, ainsi que la mise en place d'un intense volcanisme effusif (strato-volcans).

Une analyse tectonique détaillée des formations du Pliocène Supérieur (post-plissement) montre que celles-ci sont affectées :

- d'abord par une déformation en compression de direction N-S bien visible à Charaña et à C. de Carangas (nombreuses failles inverses dans la F. Perez), ainsi que dans le bassin de La Paz (failles inverses ici aussi);

- puis par une déformation en distension dont la direction d'extension X est à peu près N 10°-N 20°.

Postérieurement à la mise en place de ces formations du Pliocène Supérieur et à leurs déformations, on note la présence de dépôts lacustres, anciens, dans la Cordillère Occidentale et sa retombée pacifique : formations Charaña en Bolivie, Capillune au Pérou, Loa au Chili (MARTINEZ, 1978; BLANCO, 1979). Après, se développe sur l'Altiplano une importante morphogenèse donnant de grandes surface d'aplanissement situées entre les dépôts glaciaires et interglaciaires de la Cordillère Orientale (SERVANT, 1977). Ce dernier a défini ainsi les glaciais GI, GII, GIII, GIV et les glaciations Calvario (GI/GII), Kaluyo (GII/GIII), Sorata (GIII/GIV) et Choqueyapu (post GIV) (BLES *et al.*, 1978). Parallèlement, il a montré que les extensions lacustres pléistocènes sont « associées aux périodes de récession des glaciers ».

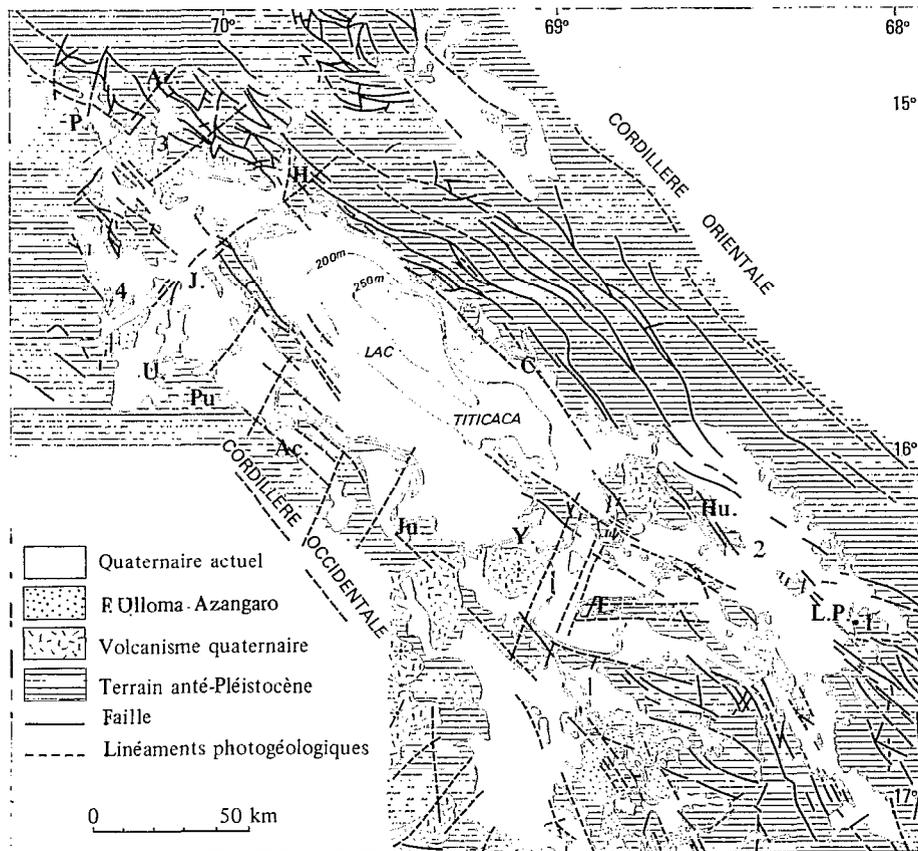


FIG. 2. — Schéma structural de la zone du lac de Titicaca montrant les principaux linéaments et failles. P = Pucara, H = Huancane, J = Juliaca, U = lac Umayo, Pu = Puno, Ae = Acora, Ju = Juli, Y = yunguyo, C = Carabuco, Hu = Huarina, T = Taraco, LP = La Paz

1. PLEISTOCÈNE ANCIEN À MOYEN — INDIVIDUALISATION DU BASSIN PRÉ-BALLIVIAN

1.1. L'extension ancienne

Dans la région de La Paz, des arguments de terrains permettent de mettre en évidence une première période de distension pléistocène (ante GI ou GII?).

Entre La Paz et le lac Titicaca, ainsi que dans la Cordillère Orientale, après l'élaboration des glacis I et II et l'accumulation des dépôts interglaciaires Purapurani (tout cela étant regroupé sous le terme général de « Formations anciennes » (tableau I), nous avons pu démontrer (LAVENU, 1977, 1978) qu'une déformation en extension de direction X = N-S affecte largement les dépôts du Pléistocène ancien. A La Paz, au niveau de certaines failles on a

pu mesurer des rejets d'une centaine de mètres (fig. 3; et point 1 sur la fig. 2).

Sur la rive NE du Petit Lac (partie sud du lac Titicaca) à l'ouest de Huarina, au pied de la Cordillère Orientale, les dépôts pliocènes de la formation Umala (appelés à tort ici formation Taraco) sont portés à des altitudes anormalement élevées par rapport aux mêmes dépôts de l'Altiplano.

Sur la rive NE du Grand Lac (Carabuco) le glacis GIII est situé à des altitudes comprises entre 3900 et 3960 m (fig. 4). Les dénivelées, respectivement de 200 m entre GIII et GII, et de 100 m entre GII et GI (?) sont, là aussi, anormalement fortes comparées à celles du centre de l'Altiplano. En effet, dans la région de Corocoro, et près du rio Desaguadero (Ulloma) (fig. 6), région située approximativement au milieu de l'Altiplano, on a une dénivelée de 40 à 50 m entre GIII et GII. Ainsi, au pied de la Cor-

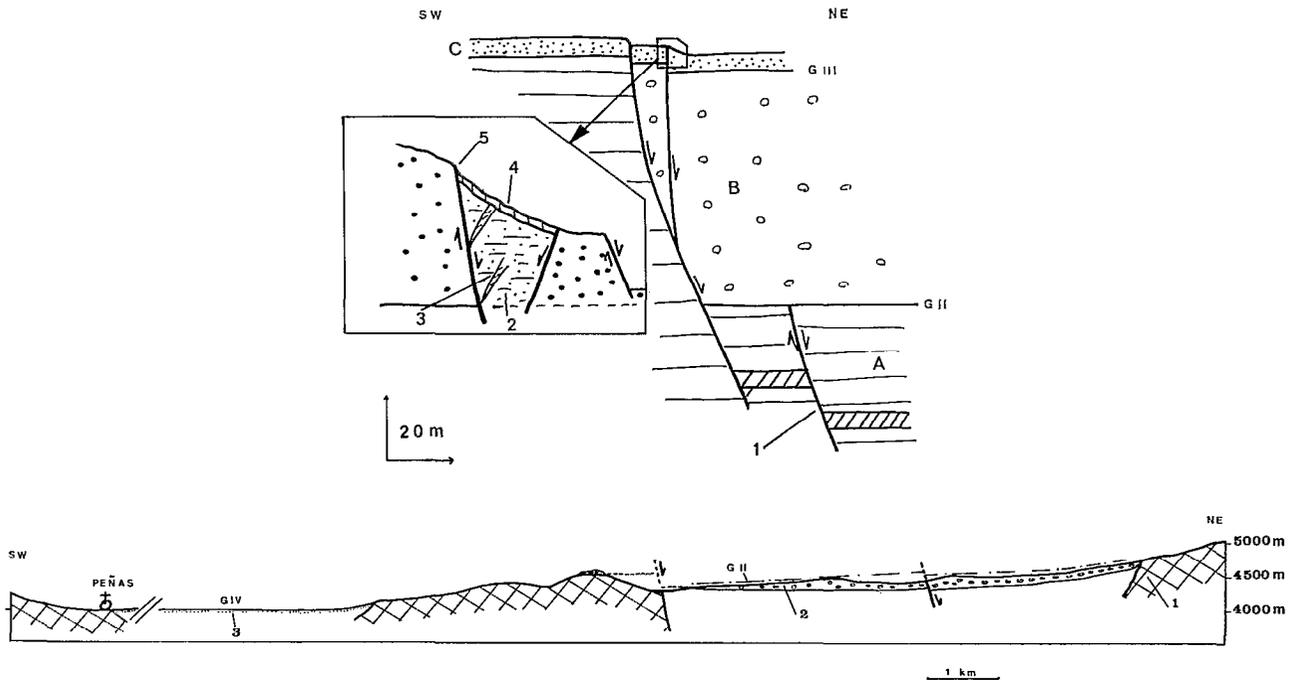


FIG. 3. — En haut : schéma de faille hectométrique due à la distension N-S post GII et ante GIII et à la distension holocène N-S post GIII (zone de La Paz, point n° 1 de la fig. 2)
 1. Distension à la limite Plio-Pleistocène ; 2. Couverture de glacis ; 3. Fentes d'ouverture provoquées par la distension ; 4. Dépôt de pente dû au relief de faille ; 5. Rejet holocène ; A : Pliocène ; B : formations anciennes ; C : Quaternaire récent
 En bas : coupe du Piedmont de la Cordillère Orientale à la latitude Peñas montrant le rejet hectométrique de la distension N-S ante GIII (point 2, fig. 2)
 1. Formations ante-pleistocène ; 2. Formations « anciennes » pleistocènes ; 3. Quaternaire récent

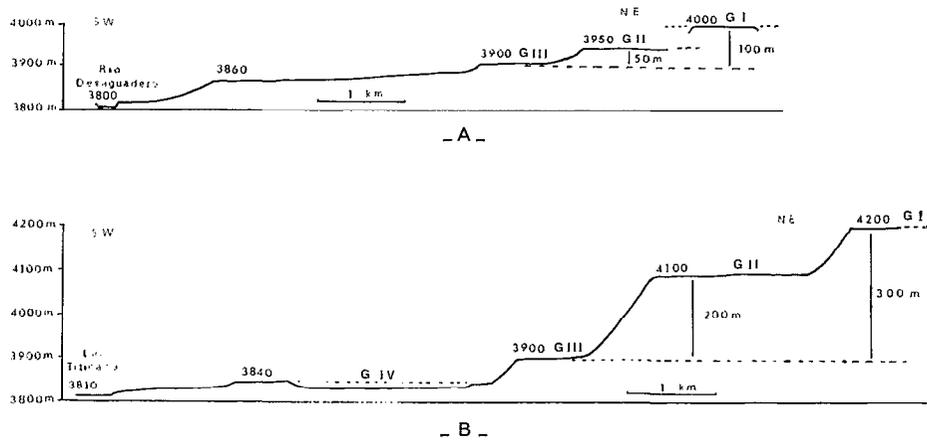


FIG. 4. -- Coupes schématiques montrant les dénivelées entre les glacis GI/GII et GIII = A. au centre de l'Altiplano (zone de Corocoro, fig. 1) ; B. au pied de la Cordillère Orientale en rive Est du lac Titicaca région de Carabuco

ACTUEL		(X)
HOLOCENE		(X) ↑ ↓
PLEISTOCENE	L. TAUCA gl. CHOQUEYAPU 2	(Z)
	L. MINCHIN gl. CHOQUEYAPU 1	(X)
	L. BALLIVIAN gl. SORATA	(X)
	G 4	(X)
	G 3	(X) ↑ ↓
	F. ANCIENNES G 2 G 1	(X) ↑ ↓
PASSAGE PLEISTOCENE INF PLIOCENE SUP	1,8 - 2 MA	(X) ↑ ↓
PLIOCENE SUP	F. PEREZ	(Z)
PLIOCENE INF	F. LA PAZ / UMALA	(Z) ↑ ↓

dillère Orientale, avant le développement de GIII, se produit une déformation qui provoque le soulèvement relatif de la Cordillère par rapport à l'Altiplano.

1.2. L'extension du Pleistocène moyen/supérieur

La distension est responsable de la création de la dépression qui s'est formée au pied de la Cordillère Orientale, et qui a donné naissance au futur lac Ballivián-Titicaca.

Un lac pré-Ballivián a occupé cette fosse. Ses dépôts ont envahi le N de l'Altiplano en dépassant légèrement les limites de l'extension du futur lac Ballivián. On retrouve en particulier ces dépôts au Pérou, au SW de Juliaca et dans la zone d'Azangaro où le sommet de la formation atteint la côte 3900 m (fig. 5). La lithologie de ces dépôts est essentiellement détritique (série de laminites à argile et sable bleutées et rouges avec des bancs de grès et de graves). Ces dépôts n'ont pas été reconnus du côté bolivien.

Le glacier GIII recoupe l'ensemble de ces dépôts anciens. Son niveau de base autour du lac était proche de 3900 m puisque, même en Bolivie, on

retrouve des entailles d'érosion subhorizontales à cette altitude.

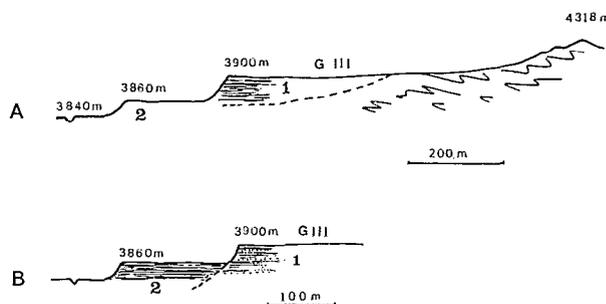


Fig. 5. — Coupes schématiques montrant les relations entre les dépôts lacustres pré-Ballivian (1), le glacier GIII et les dépôts du lac Ballivian (2). A. Entre Azangaro et le lac Arapa (point n° 3, fig. 2) ; B. à l'W. de Juliaca (point n° 4, fig. 2)

2. LE PLÉISTOCÈNE SUPÉRIEUR

2.1. L'époque du lac Ballivian

Lors de son extension maximum, le lac Ballivián couvrait 1,5 fois la superficie du lac Titicaca actuel (AHLFELD et BRANISA, 1960). Les limites extrêmes des dépôts (appelés F. Ulloma en Bolivie et F. Azangaro au Pérou) sont indiquées approximativement sur la figure 6. Les témoins de cette avancée, rarement conservés, se situent à une altitude actuelle de 3860 m tout autour du bassin. TROLL (1927), AHLFELD et BRANISA (1960), et SERVANT et FONTES (1978) ont montré que les sédiments de ce lac (F. Ulloma) sont composés essentiellement de sables fins, bien lités, parfois à nodules calcaires avec des argiles dans la partie supérieure des dépôts. On trouve, intercalés dans cette série, des bancs de cinérites et diatomites.

Ces dépôts s'emboîtent dans le glacier GIII qui a subi une forte érosion; en particulier dans la Cordillère Orientale où les glaciers de la glaciation Sorata ont pénétré dans des vallées profondes (ARGOLLO, 1979). Cet enfoncement est l'indice d'un nouveau soulèvement de la Cordillère Orientale marqué par des failles affectant le glacier GIII et ante Sorata. Sur la figure 7, on peut voir l'emplacement des moraines Sorata et la répartition du lacustre Ballivián, contemporain de la période de récession des glaciers Sorata.

2.2. L'époque du lac Minchin

Autour du lac Titicaca, et en particulier au Sud et à l'Est on trouve des terrasses qui se sont développées à 10-15 m au-dessus du niveau actuel. Ces

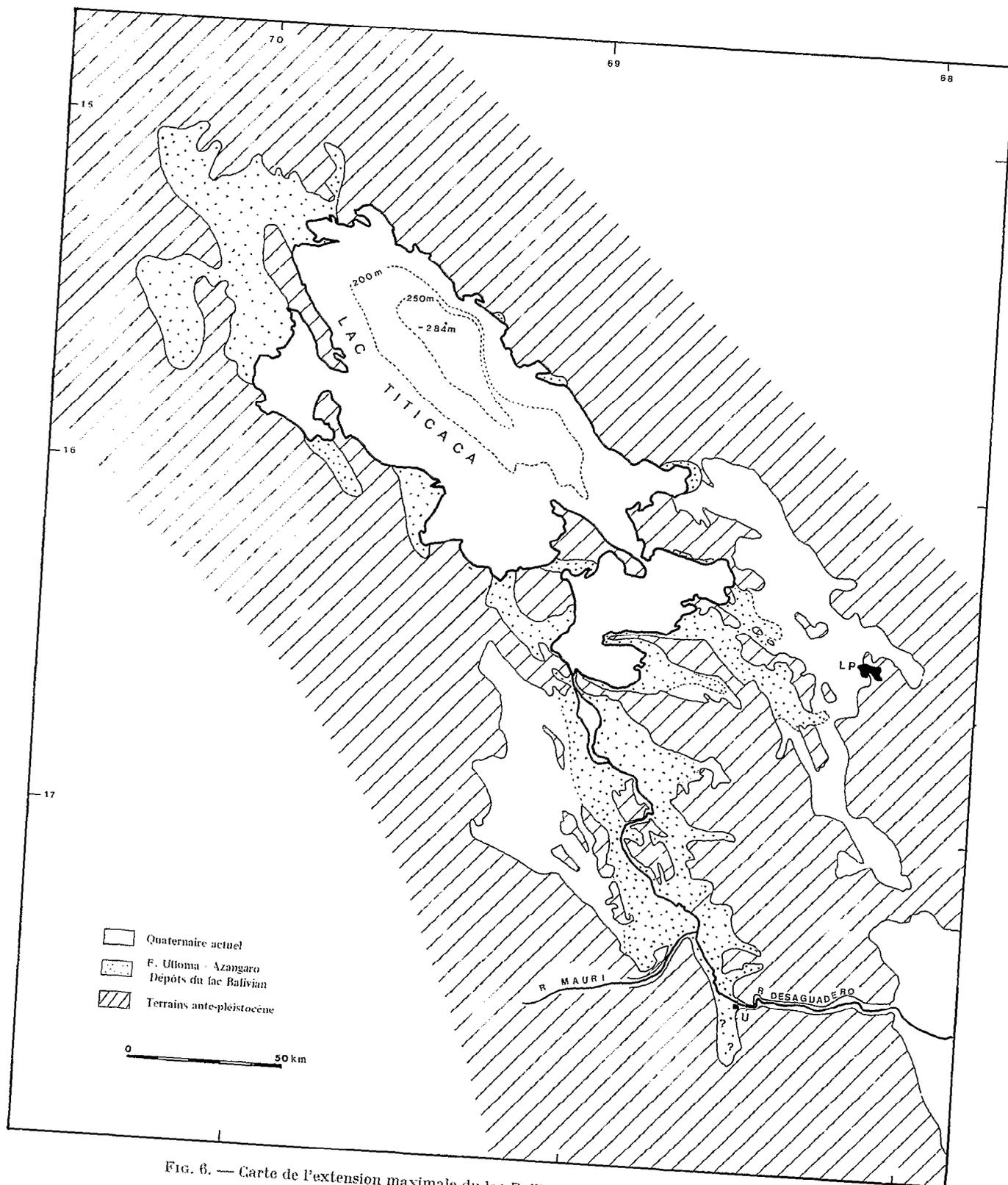


FIG. 6. — Carte de l'extension maximale du lac Ballivian et de ses dépôts (F. Ulloma)

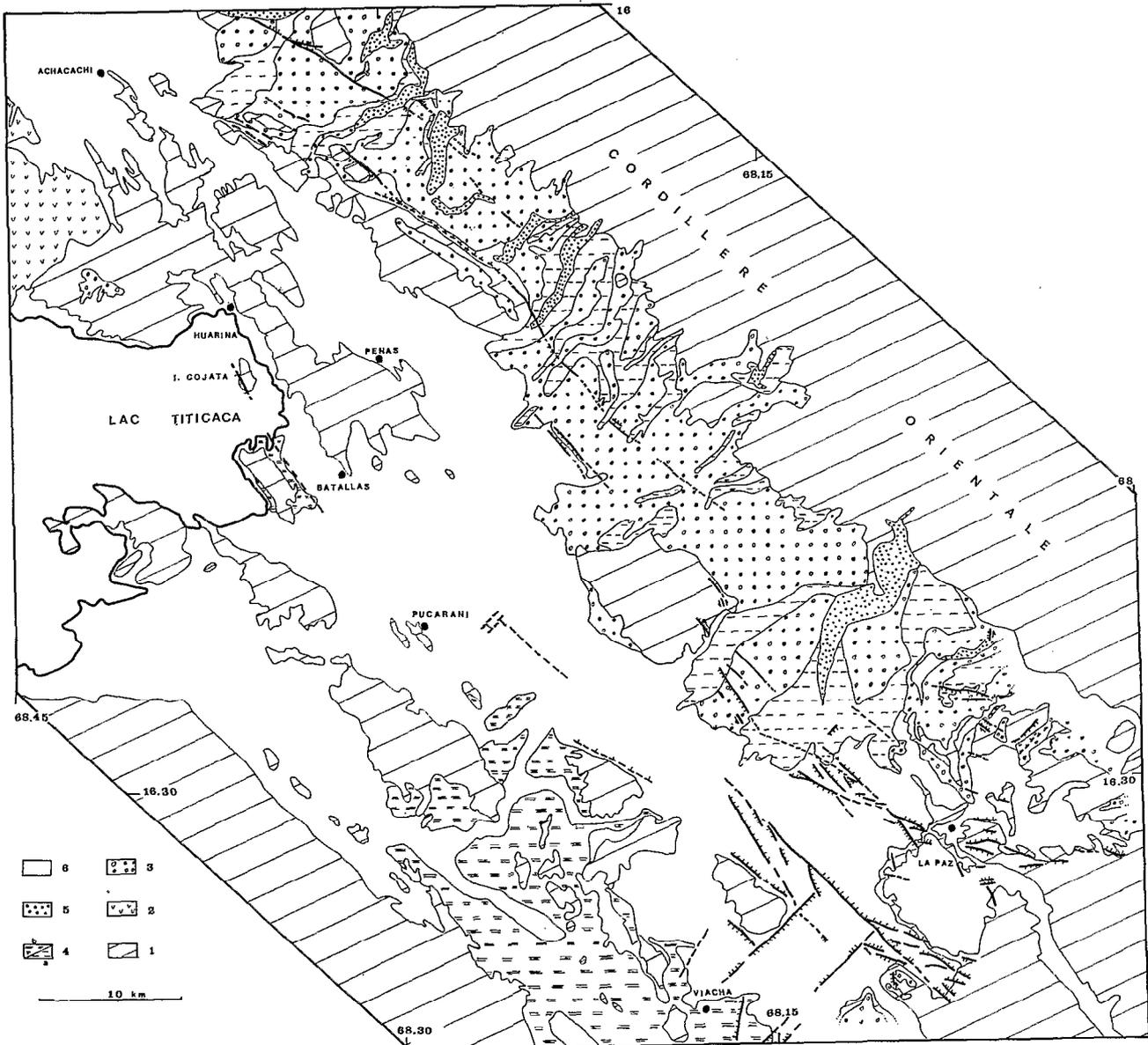


FIG. 7. — Schéma structural de la zone comprise entre le lac Titicaca et la ville de La Paz (d'après les cartes géologiques de GEOBOL, Plan de DESARROLLO, de La Paz, H.A.M., inf. n° 2, levés de J. ARGOLLO et levés personnels)
 1. Formations ante Pleistocène ; 2. Volcanisme quaternaire ; 3. Formations anciennes ; 4. (a) Glaciation Sorala, (b) F. Ulloma ;
 5. Glaciation Choqueyapu ; 6. Quaternaire récent

terrasses indiquent le niveau de stabilité d'un nouveau plan d'eau : c'est la période du lacustre Minchin qui, dans le centre de l'Altiplano, est représenté par plusieurs terrasses d'abrasion dont une, intermédiaire, a pu être datée à 27.000 ans B.P. (SERVANT et FONTES, 1978). Sur l'île Cojata, au Sud de Huarina, la terrasse Minchin est à environ 15-

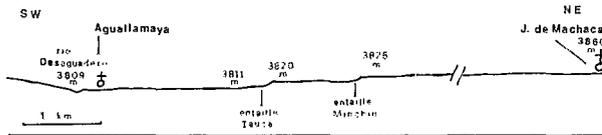


FIG. 8. — Profil entre Aguallamaya et Jésus de Machaca indiquant les niveaux des différentes périodes lacustres

17 m au-dessus du lac (cette hauteur anormale peut s'expliquer par le fait que la terrasse est bordée par une faille). Dans la plaine du rio Desaguadero, entre Aguallamaya et Jesus de Machaca, une coupe dans les sédiments de la formation Ulloma montre (fig. 8) une entaille entre 3820 et 3825 m qui correspond aussi au niveau du lac Minchin.

2.3. L'époque du lac Tauca

Entre 12.500 et 10.000 ans B.P. (SERVANT et FONTES, 1978), le lac se stabilise 5 m au-dessus du niveau actuel. Le nouveau plan d'eau correspond à la période lacustre Tauca. A la pointe W de la presqu'île de Taraco (fig. 6), on note la présence d'une terrasse à cailloutis et grave à 3815 m. De même, sur la coupe Aguallamaya-Jesus de Machaca (fig. 8) une entaille entre 3811 et 3820 m est due à ce plan d'eau. On l'observe aussi au N du lac Titicaca dans la partie péruvienne, au Sud du lac Arapa.

3. DE L'HOLOCÈNE À L'ACTUEL

Postérieurement à cette période lacustre qui correspond à la fin de la dernière glaciation dans la Cordillère Orientale (Choqueyapu), on a pu mettre en évidence une déformation en compression en direction $Z = NW-SE$ (LAVENU, 1977, 1978) affectant des dépôts holocènes (DOBROVOLNY, 1962). Cette déformation se manifeste essentiellement par le jeu de microfailles en décrochement. Elle est générale dans les Andes Centrales : on la connaît actuellement depuis la Cordillère blanche au Pérou (SOULAS, 1975) jusqu'au bassin de Sucre en Bolivie (LAVENU et BALLIVIAN, 1979). Cependant, en Bolivie, la direction $Z = NW-SE$ n'est pas encore bien démontrée. Nous nous heurtons pour l'instant à un problème de tri de failles.

Une déformation en distension ($X = N-S$), suit cette compression. Elle se déroule en plusieurs étapes successives jusqu'à l'Actuel. Le rejet cumulé de certaines familles de failles normales peut atteindre 30 à 40 m et à l'W de La Paz, les derniers dépôts holocènes sont affectés (fig. 3).

Les quelques rares études de sismicité effectuées en Bolivie ces dernières années, montrent que l'Altiplano et, plus particulièrement, la Cordillère Orientale, sont soumis à une tectonique en distension (RODRIGUEZ et VEGA, 1976 a, 1976 b). Néanmoins, MENDIGUREN et RICHTER (1978) ont montré que le centre de l'Amérique du Sud (zone du bouclier brésilien) est soumis actuellement à une compression horizontale NW-SE. C'est la direction de compression que l'on trouve sur l'Altiplano au Quaternaire récent. Toutefois, il est difficile de comparer le comportement d'une zone mobile comme les Cordillères et l'Altiplano, et celui d'une zone stable comme le bouclier brésilien. Par contre, STAUDER (1975) montre que la côte péruvienne et le rebord pacifique de la Cordillère Occidentale du centre du Pérou sont soumis actuellement à une compression E-W.

Le tableau I résume l'évolution néotectonique du Nord de l'Altiplano et, en particulier, du bassin du lac Titicaca.

4. CONCLUSION

Après la période de sédimentation du Pliocène, limité à l'Est par le relief de la Cordillère Orientale et à l'W par celui de la Cordillère Occidentale, et après la phase de compression andine E-W qui affecte le Pliocène inférieur et les épisodes de compression N-S qui affectent le Pliocène Supérieur/Pléistocène ancien (Post-Perez), l'Altiplano entre dans une période de distension qui va caractériser tout le Quaternaire (épandements volcaniques, création des bassins lacustres de l'Altiplano, soulèvement, etc.).

A la fin du Pléistocène ancien, on assiste à une importante déformation en distension ($X = N-S$) responsable en particulier de la création de la fosse du lac Ballivián puis du lac Titicaca. Cette distension est marquée par des failles à rejet hectométrique qui effondre les sédiments au pied de la Cordillère et qui provoque un soulèvement de celle-ci.

Les dépôts du lac Ballivián et les formations glaciaires et interglaciaires correspondantes (glaciation Sorata) sont affectés par une nouvelle déformation en distension (dont la direction X n'est pas encore connue).

Au début de l'Holocène, une déformation en compression ($Z = NW-SE$) aux effets relativement

faibles, mais de répartition générale, affecte l'ensemble des Cordillères Occidentale et Orientale, ainsi que l'Altiplano, depuis la Cordillère Blanche du Pérou jusqu'au bassin de Sucre en Bolivie.

Sur l'Altiplano Nord bolivien, le régime en distension se poursuit durant tout le reste de l'Holocène,

jusqu'à nos jours. Ceci est vérifié par des mouvements de failles historiques et l'étude des séismes.

Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M., le 17 août 1981

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AHLFELD (F.), BRANISA (L.), 1960. — Geología de Bolivia, 245 p., 1 carte h.-t. Edit. Don Bosco, La Paz.
- ARGOLLO (J.), 1980. — Los piedemontes de la Cordillera Real, entre los Valles de La Paz y Tuní. Estudio Geológico, evolución Plio-Cuaternaria. Tesis U.M.S.A., La Paz.
- BLANCO (M.), 1980. — Evolución Plio-Cuaternaria de la Cuenca de Charaña (Cordillera Occidental de Bolivia). Tesis U.M.S.A., La Paz.
- DOBROVOLNY (E.), 1962. — Geología del Valle de La Paz. *Dep. Nac. Geol., Minist. Min. Petr., Bol. 3*, La Paz.
- EVERNDEN (J. F.), KRIZ (S. J.), CHERRONI (C. M.), 1966. — Correlaciones de las formaciones terciarias de la Cuenca altiplánica a base de edades absolutas, determinadas por el método Potasio. Argon. *Serv. Geol. Bol.*; Hoja inf. I, La Paz.
- EVERNDEN (J. F.), KRIZ (S. J.), CHERRONI (C. M.), 1977. — Potassium - Argon ages of some bolivian rocks *Economy Geology*, 72 : 1042-1061.
- LAVENU (A.), 1977. — Neotectonica de los sedimentos Pliocuarternarios de la cuenca de La Paz (Bolivia). *Rev. de Geoc.*, 1 (1) : 31-56. U.M.S.A.
- LAVENU (A.), 1978. — Néotectonique des sédiments plioquaternaires du Nord de l'Altiplano bolivien (région de La Paz, Ayo Ayo, Umala) *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.*, 10 (1) : 115-126.
- LAVENU (A.), BALLIVIAN (O.), 1979. — Estudios neotectónicos de las cuencas de las regiones de Cochabamba, Sucre, Tarija - Cordillera Oriental Boliviana. *Rev. Acad. Nac. Cien. Bolivia*. Año 2, 3 : 107-129.
- MARTINEZ (C. L.), 1980. — Géologie des Andes boliviennes. *Trav. et Doc. de l'O.R.S.T.O.M.*, 119, 352 p.
- MENDIGUREN (J.), RICHTER (F.), 1978. — On the origin of compressional intraplate stresses in South America. *Physics of the Earth and Planet.*, 16 : 318-326.
- RODRIGUEZ (R.), VEGA (A.), 1976 a. — El terremoto del 12 de Mayo de 1972 en Cochabamba. *Inst. Pan. Geog. Hist. Rev. Geog.*, 5 : 161-171.
- RODRIGUEZ (R.), VEGA (A.), 1976 b. — Sismo del 22 de febrero de 1976 en el Sur de Cochabamba. *Observ. San Calixto*, Publ. n° 27.
- SERVANT (M.), 1977. — Le cadre stratigraphique du Plioquaternaire de l'Altiplano des Andes tropicales en Bolivie. *Bull. A.F.E.Q., supplément I.N.Q.U.A., Recherches françaises sur le Quaternaire*, 1, n° 50 : 324-327.
- SERVANT (M.), 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.*, 10 (1) : 9-23.
- SOULAS (J.-P.), 1975. — La chaîne du Pérou central. Chronologie, orientation et style des phases tectoniques du Tertiaire Supérieur. Aperçus sur la tectonique Quaternaire. *Bull. I.F.E.A.*, IV, 3-4 : 127-157.
- STAUDER (W.), 1975. — Subduction of Nazca plate under Peru as evidence by Focal Mechanism and by seismicity. *J. Geophys. Res.*, 80 : 1053-1064.
- TROLL (C.), 1927-1928. — Forschungsreisen in den Zentralen Anden von Bol. und Perú. *Patern. Mitll.*, 73 : 41-43 ; 218-222, 1927 — 74 : 100-103.