

DERNIERS RÉSULTATS ACQUIS CONCERNANT LES ÉTUDES NÉOTECTONIQUES EN BOLIVIE

Alain LAVENU

O.R.S.T.O.M., C.P. 8714, La Paz, Bolivie

RÉSUMÉ

Les résultats des études néotectoniques obtenus depuis 1978 sont rapidement exposés ici. Ils montrent que l'évolution géodynamique de la bordure continentale pacifique au niveau des Cordillères et de l'Altiplano boliviens se fait essentiellement en distension, du moins en surface. Cette évolution est cependant interrompue par des crises compressives importantes mais très brèves.

ABSTRACT

LAST RESULTS OBTAINED CONCERNING THE NEOTECTONIC STUDIES IN BOLIVIA

The results of the neotectonic studies obtained since 1978 are rapidly exposed. The geodynamic evolution of the pacific continental margin, on a level with the bolivian Cordilleras and Altiplano, is essentially in distension, at least in surface. Still, this evolution is interrupted by important but short compressive crisis.

RESUMEN

ÚLTIMOS RESULTADOS ADQUIRIDOS A PROPOSITO DE LOS ESTUDIOS NEOTECTONICOS EN BOLIVIA

Los resultados de los estudios neotectonicos obtenidos desde 1978 son rapidamente expuestos. Muestran que la evolución geodinámica del borde continental pacifico, al nivel de las cordilleras y del Altiplano bolivianos se hace esencialmente en distensión, por lo menos en superficie. Esta evolución se encuentra, sin embargo, interumpida por crisis compresivas importantes pero muy breves.

Ces études ont été entreprises en 1976. Les premiers résultats ont été publiés en 1977 et 1978. Depuis 1978, la poursuite de ces études sur l'Altiplano et dans les Cordillères Occidentale et Orientale a donné lieu à diverses publications déjà éditées ou en cours d'impression en français, espagnol et anglais. Nous reprenons ici rapidement les résultats de ces publications plus détaillées dont la liste est en première partie de la bibliographie (1).

LA PÉRIODE DE SÉDIMENTATION DE L'OLIGO-MIOCÈNE

Durant plus de 20 MA, une phase de distension affecte les Cordillères Occidentale et Orientale ainsi que le bassin de l'Altiplano (fig. 1).

Cette distension favorise une forte subsidence du bassin dans le centre de l'Altiplano, entre la faille de San Andres et la Cordillère Orientale (fig. 2). Là, les couches présentent une lithologie essentiellement terrigène. Elles sont épaisses (entre 6.500 et 10.000 m) de couleur rouge : alternances de grès, argiles, siltites et des niveaux de tufs.

A l'ouest de la faille San Andres, la subsidence est beaucoup plus faible. L'Oligo-Miocène est constitué d'une série volcano-sédimentaire, épaisse seulement de 500 m environ.

Dans la Cordillère Orientale se mettent en place de nombreuses roches granitoïdes sous forme de batholites.

Le magmatisme, important dans la Cordillère

(1) Les travaux, en ce qui concerne la Bolivie, ont été réalisés dans le cadre de la Convention UMSA/O.R.S.T.O.M. et ont bénéficié du support financier de l'ATP Géodynamique Projet Andes.

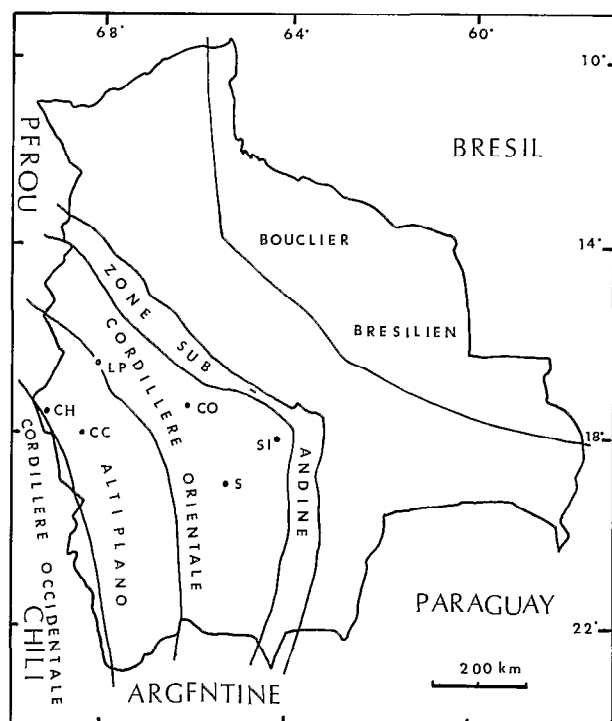


FIG. 1. — Principales unités morpho-structurales de Bolivie. CC : Curahuara de Carangas, CH : Charaña, Co : Cochabamba, LP : La Paz, S : Sucre, SI : San Isidro.

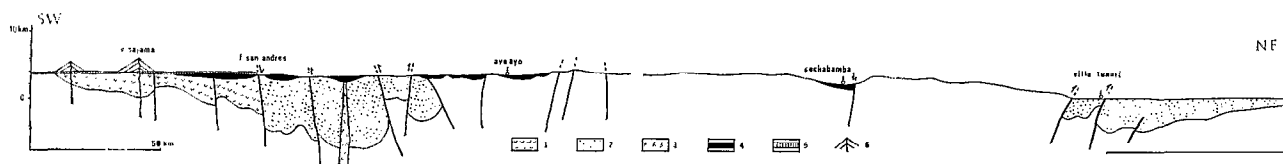


FIG. 2. — Coupe schématique des Andes de Bolivie (selon SÉBRIER *et al.*, à paraître AAPG). 1 : Oligo-Miocène volcano-sédimentaire, 2 : Oligo ? Miocène sédimentaire, 3 : intrusifs, 4 : Pliocène, 5 : ignimbrite Perez, 6 : volcans quaternaires.

A la fin du Miocène, la chaîne des Andes dans son ensemble aurait donc à peu près la même altitude qu'actuellement (SÉBRIER *et al.*, à paraître).

LA PÉRIODE DE DISTENSION DU PLIOCÈNE INFÉRIEUR

Bien qu'elle n'ait pas encore été démontrée de façon nette par une analyse tectonique (difficultés de mettre en évidence des failles synsédimentaires en bordure du bassin), la distension du Pliocène inférieur est importante dans ses effets.

Au niveau de la Cordillère Occidentale, elle est mise en évidence par le volcanisme Cerke, édifice important en cours de datation.

Sur l'Altiplano, dès le Miocène Terminal la sédi-

mentation reprend, accompagnant une nouvelle subsidence du bassin. Sur le piedmont de la Cordillère Occidentale, la sédimentation est faible et détritique (sables et grès peu consolidés).

LA PHASE DE COMPRESSION DU MIOCÈNE TERMINAL

Cette phase qui affecte l'ensemble du domaine andin étudié, sera intense et brève à la fois.

Elle est datée entre 6,4 et 7,25 MA selon des âges donnés par EVERNDEN *et al.* (1966-1977).

Dans la Cordillère Occidentale et l'Altiplano, le style est surtout cassant accessoirement souple. Les structures représentées sont d'importantes failles en décrochement et inverses associées à des plis.

Dans la Cordillère Orientale, le style est cassant.

Il est plus souple dans la zone subandine.

De façon générale, cette phase montre une prépondérance de la tectonique cassante.

Sur l'Altiplano, les résultats que nous avons pu obtenir par l'analyse tectonique et microtectonique montrent un raccourcissement $Z = N - S$ à $N 30$. La faille de San Andrés, accident régional majeur de direction $N 155/160$ a un jeu dextre à cette époque.

Cette phase est responsable d'un fort soulèvement de la chaîne attesté par l'incision des vallées au niveau actuel sur le versant Pacifique mais aussi sur le versant amazonien de la chaîne.

L'étude des bassins intramontagneux (Cochabamba, Sucre et San Isidro en particulier) a permis d'y montrer l'existence du Pliocène.

Dans la région de Cochabamba, où existent plusieurs petits bassins tertiaires, les sédiments lacustres peuvent atteindre une épaisseur de plusieurs centaines de mètres.

Ce sont des alternances de sable et argile avec intercalations de niveaux volcaniques. Nous avons trouvé dans les sables de nombreux restes de mammifères pliocènes (détermination de C. VILLAROEEL).

A Sucre, on trouve des sédiments présentant une lithologie similaire. Pour l'instant, en l'absence de preuves paléontologiques, nous les supposons pliocènes.

Toujours dans la Cordillère Orientale, mais sur sa bordure est, près de la zone subandine, dans le petit bassin de San Isidro, affleurent aussi des terrains tertiaires. Une étude des diatomés a permis de montrer que ces terrains étaient eux aussi d'âge Pliocène (S. SERVANT *com. orale*).

LA PHASE DE COMPRESSION DU PLIOCÈNE

Cette déformation en compression est actuellement bien connue dans tout le domaine andin du sud Pérou et de l'ouest de la Bolivie. Cependant elle est mal caractérisée dans la Cordillère Occidentale et dans la zone subandine.

Cette déformation a d'abord été datée en Bolivie : elle est antérieure à 2,5 MA.

Sur l'Altiplano entre les deux Cordillères, cette tectonique s'exprime par des plis et des failles décrochantes et inverses.

Dans la Cordillère Orientale, on observe aussi des plis et des failles décrochantes et inverses. On note une très nette prépondérance du jeu des accidents décrochants observable en surface directement par le rejeu des failles, ou bien indirectement par la création de structures souples à l'aplomb des accidents.

Partout où nous avons pu réaliser une analyse tectonique et microtectonique, celle-ci montre un raccourcissement proche de E-W (N 080) (Tabl. I). Ainsi les grands accidents de direction andine (NW-SE) ont généralement un rejeu sénestre ; c'est le cas de la faille San Andres.

Dans les bassins intramontagneux, on trouve aussi plis et failles associés, bien que les effets de la tectonique soient moins importants que sur l'Altiplano. La direction de raccourcissement est, aussi, Z = EW à ENE-WSW dans la région de Cochabamba et celle de Sucre. A San Isidro Z est NE-SW.

ACTUEL	L. TITICACA 10	(X)
HOLOCÈNE		(X)
		(Z)
PLÉISTOCÈNE	L. TAUCA 11 gl. CHOQUEYAPU 2	(X)
	L. MINCHIN 12 gl. CHOQUEYAPU 1	(X)
	L. BALLIVIAN 13 gl. SORATA	(X)
	L. (3900 m) 14	(X)
	L. (3970 m) 15 F. ANCIENNES 16	(X)
		(Z)
PASSAGE PLEISTOCÈNE INF. PLIOCÈNE SUP.		(Z)
PLIOCÈNE SUP.	F. PEREZ (2,5 MA)	(Z)
PLIOCÈNE INF.	3,27 MA F. LA PAZ - UMALA 5,4 - 6,4 MA	(Z)

TABLEAU I

Interprétation chronologique des déformations plio-quaternaires

LA DISTENSION DU PLIOCÈNE TERMINAL ET LES ÉPANCHEMENTS VOLCANIQUES

Le Pliocène terminal est caractérisé par les épanchements volcaniques de la Cordillère Occidentale. Les dépôts ignimbricitiques de la F. Perez datés à 2,5 MA en sont les principaux témoins. Les dépôts seraient la conséquence d'une distension permettant un volcanisme fissural connu aussi au Chili et au Pérou.

Pour l'instant on ne connaît pas de niveaux équivalents datés sur l'Altiplano ni dans la Cordillère Orientale. Mais des travaux en cours (Ph. DE PACHÈRE) sur la Meseta de Morococala et près du lac Titicaca tendraient à montrer l'existence d'épanchements volcaniques Pliocène terminal à Quaternaire.

LA COMPRESSION DU PLEISTOCÈNE INFÉRIEUR

Celle-ci est très discrète quant à ses effets. Elle affecte l'ignimbrite Perez dans la région de Charaña.

Ici, la F. Charaña, datée du Pleistocène ancien à moyen par Branisa et Hoffstetter (*in* BLANCO, 1980) n'est pas affectée.

On retrouve cette déformation de la F. Perez plus au SE dans la zone de C. de Carangas en plusieurs points (Est. Viscachani, Chiriquiña et Tirata).

Dans le bassin de La Paz, on ne connaît pas de série d'âge équivalent à la F. Perez et c'est dans le Pliocène inférieur déjà plissé que l'on trouve la manifestation de cette déformation.

Elle a pour effet le développement de failles inverses souvent très peu inclinées (Cordillère Occidentale en particulier).

De façon générale, l'analyse microtectonique de ces failles indique une compression Z de direction proche de N-S (N 025).

L'ÉVOLUTION QUATERNAIRE

Dans la zone étudiée actuellement, le N de l'Altiplano et les piedmonts des Cordillères Occidentale et Orientale, le Quaternaire est caractérisé néotectoniquement par la succession de périodes de distension, brèves (marquées par de nombreuses failles normales) lesquelles s'intercalent dans des périodes de sédimentation (dépôts glaciaires, fluvio-glaciaires et lacustres) et des périodes de morphogénèse (élaboration de grands glacis d'ablation).

Après le dernier épisode compressif du Pleistocène ancien, on observe une distension relativement importante qui affecte les dépôts du Pliocène inférieur (F. La Paz, Umala, etc.) et ceux du Pliocène supérieur/terminal (F. Perez) quand ceux-ci existent.

Dans la Cordillère Occidentale, la F. Perez est affectée par des failles normales antérieures à la F. Charaña et postérieures à la compression Z = N-S (superposition de stries sur un même miroir).

Dans la région de La Paz, des failles normales à rejet de quelques dizaines de mètres affectent le Pliocène inférieur sans affecter le Quaternaire susjacent (fig. 3)

L'analyse de ces failles montre que la direction d'allongement X est N-S.

Le Quaternaire du bassin de La Paz débute par le dépôt des premières séries glaciaires et interglaciaires du piedmont de la Cordillère Orientale dans lesquelles s'intercalent au moins deux glacis d'ablation, S6 et S5 : série fluviale pré-Calvario, glaciation Calvario, formation Purapurani et glaciation Kaluyo, le tout réuni sous le nom de Formations anciennes. Les équivalents lacustres (fin glaciation Calvario et fin glaciation Kaluyo) sur l'Altiplano correspondraient à des dépôts se trouvant à des altitudes respectives de 3 970 m et 3 900 m correspondant aux surfaces d'ablation S5 et S4 (note en cours).

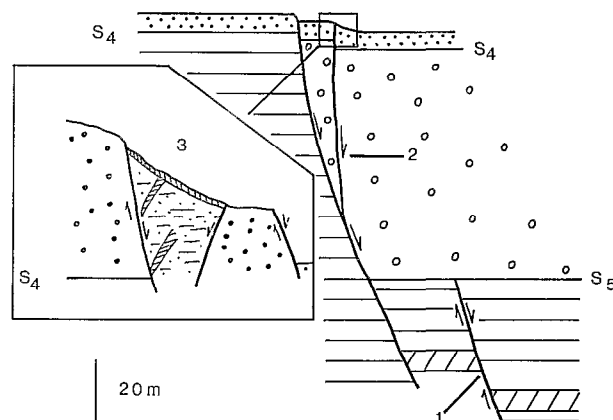


FIG. 3. — Schéma de faille hectométrique due à la distension N-S ante S6 et à la distension holocène N-S post S4 (modifié, selon Lavenu, 1981, sous presse). 1 : distension limite Plio-Pleistocène, 2 : distension Pléistocène, 3 : distension holocène.

Durant la période qui sépare les deux surfaces d'ablation S5 et S4, on note une importante déformation en distension qui décale fortement les séries (on observe des failles à rejet de plusieurs centaines de mètres, fig. 4). L'analyse microtectonique de ces failles a montré que la direction d'allongement est X = N-S.

Cette distension marque le début de la formation de la fosse que nous connaissons actuellement à l'emplacement du lac Titicaca.

Une fois le glacis d'ablation S4 mis en place, celui-ci est entaillé par de profondes vallées. Deux hypothèses peuvent être évoquées : soit une nouvelle période de distension avec léger soulèvement de la Cordillère Orientale par rapport à l'Altiplano, mais nous n'avons pas d'argument tectonique pour appuyer cette hypothèse, soit un changement climatique entraînant une augmentation du pouvoir érosif des rios et donc leur enfoncement.

Après le dépôt des sédiments de la glaciation Sorata et l'extension du lac Ballivian (altitude du plan d'eau 3 860 m lequel correspond à la terrasse t3), on assiste de nouveau à une période de déformation marquée sur le piedmont par de nombreux reliefs de failles dont la morphologie (en l'absence de miroirs) semble indiquer, là encore, une distension. Nous en ignorons la direction d'allongement.

À l'Holocène, après les avancées des deux dernières glaciations (Choqueyapu I et II \approx Riss et Würm) et les deux maximums lacustres correspondants (L. Minchin = terrasse t2 et L. Taucá = terrasse t1 ou « terrasse Holocène ») une déformation en compression de direction de raccourcissement Z = N 130 affecte la chaîne andine du Pérou à la Bolivie.

Cette compression aux effets peu marqués est suivie par une déformation en distension de direction

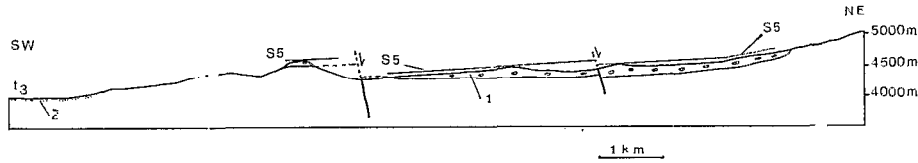


Fig. 4. — Coupe montrant la distension post S5 entre La Paz et le lac Titicaca. 1 : « Formations anciennes » Pléistocènes, 2 : Quaternaire récent.

d'allongement $X = N-S$. Actuellement le régime de la déformation est toujours en distension. Cela est démontré par l'étude des mécanismes au foyer de quelques séismes récents.

En conclusion aux rappels de ces résultats acquis depuis 1978, nous noterons que depuis l'Oligo-Miocène nous observons l'existence de deux phases de compression importantes : la phase fini-Miocène et la phase fini-Pliocène. Bien qu'importantes au point de vue de la déformation et de ses conséquences, ce sont des phases de courte durée, des « à-coups » dans l'évolution géodynamique de la bordure Continentale.

Par contre, en dehors de ces crises compressives,

depuis le Miocène jusqu'au Quaternaire, on assiste à une importante subsidence des bassins (c'est le cas de l'Altiplano comme exemple le plus marquant), et, donc, à une importante distension de cette région à l'aplomb de la zone de subduction.

Le magmatisme, très développé dans cette partie des Andes apparaît bien comme lié à la tectonique en distension depuis le Miocène jusqu'à l'actuel, période qui nous intéresse ici.

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

BIBLIOGRAPHIE

1^{re} partie

- LAVENU (A.), 1979. --- Neotectonica de los sedimentos plio-cuaternarios del Norte del Altiplano. *An. VI Conv. Nac. Geol.*, Vol. VI, t. 2 : 449-463.
- LAVENU (A.), BALLIVIAN (O.), 1979. — Estudios neotectonicos de las cuencas de las regiones de Cochabamba, Sucre, Tarija — Cordillera Oriental — Bolivia. *Rev. Acad. Nac. Cien.*, año 2, n° 3 : 107-129.
- BLES (J. L.), GOGUEL (J.), LAVENU (A.), MASURE (Ph.), 1980. — Neotectonique et sismicité du site de La Paz (Bolivie) : un exemple de failles récentes sans trace de sismicité historique ; conséquences pratiques pour le développement urbain. *Cong. Géol. Int.* 26, 1980, Paris, BRGM.
- LAVENU (A.), SEBRIER (M.), SERVANT (M.), 1980. — Néotectonique des Andes Centrales : Pérou, Bolivie. *Bull. INQUA Neotectonics, Commission* n° 3 : 56-58.
- LAVENU (A.), SERVANT (M.), 1980. — Déformation en distension et morphogenèse quaternaire des hauts plateaux andins en Bolivie. *Cong. Géol. Int.* 26, 1980, Paris, BRGM : 2-667.
- SEBRIER (M.), LAUBACHER (G.), LAVENU (A.), MAROCCO (R.), SERVANT (M.), 1980. — Évolution tectonique cénozoïque des Andes Centrales (Sud Pérou - Bolivie). *Cong. Géol. Int.* 26, 1980, Paris BRGM : 1-387.
- SEBRIER (M.), LAVENU (A.), SERVANT (M.), 1980. — Apuntes recientes sobre la neotectonica en los Andes Centrales (Peru, Bolivia). *Bull. I.F.E.A.* IX, nos 1-2 : 1-3.
- LAVENU (A.), 1981. — Origine et évolution néotectonique du lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. trop.* 14 (4) : 289-297.
- LAVENU (A.), 1981. — Neotectonic evolution in the Northern Bolivian Altiplano and the Eastern and Western Cordilleras during upper Tertiary and Quaternary (à paraître, *Bull. INQUA. Neol. Comm.* 1981).
- LAVENU (A.), MERCIER (J.-L.). — Extensional/Compressional tectonics in the Bolivian Altiplano during upper Miocene/Pleistocene (à paraître).
- SEBRIER (M.), LAVENU (A.), FORNARI (M.), SOULAS (J.-P.). — Miocene to present tectonics and uplift in the Andes of Southern Peru and Northern Bolivia (à paraître AAPG).

2^e partie

- 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.
- CLAPPERTON (C. M.), 1979. — Glaciation in Bolivia before 3,27 My. *Nature*, Vol. 277 : 375-377.
- 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 - Argón. Servicio Geológico Boliviano, Hoja inf. n° 1. La Paz.
- EVERNDEN (J. F.), KRIZ (S. J.), CHERRONI (C. M.), 1977. — Potassium-Argon ages of some bolivian rocks. *Econ. Geol.*, Vol. 72 : 1042-1061.
- MARTINEZ (Cl.), 1980. — Géologie des Andes boliviennes. *Trav. et doc. O.R.S.T.O.M.*, n° 119, 352 p. Paris.
- RODRIGUEZ (R.), VEGA (A.), 1976 a. — El terremoto del 12 de mayo de 1972 en Cochabamba. *Inst. Pan. Geog. Hist., Rev. Geog.*, n° 5 : 161-171.
- RODRIGUEZ (R.), VEGA (A.), 1976 b. — Sismo del 22 de febrero de 1976 en el sur de Cochabamba. Obs. San Calixto, Publ. n° 27.