

Tectonique/*Tectonics*

## Un bassin en compression d'âge oligo-miocène dans le sud de l'Altiplano bolivien

Patrice BABY, Thierry SEMPERE, Jaime OLLER, Luis BARRIOS, Gérard HERAIL  
et René MAROCCO

**Résumé** — Dans les Andes Centrales, l'Altiplano-Puna constitue un haut plateau dont la genèse est encore mal comprise. De nouvelles données de terrain et de sous-sol permettent de montrer que dans sa partie sud-est l'Altiplano bolivien correspond à un bassin intramontagneux d'avant-pays, d'âge Oligocène supérieur et Miocène.

### A Late Oligocene-Miocene intermontane foreland basin in the southern Bolivian Altiplano

**Abstract** — In the central Andes, the Altiplano-Puna is a high plateau, the development of which is still poorly understood. New field and subsurface data permit us to show that the southeastern part of the Altiplano functioned as an intermontane foreland basin during Late Oligocene and Miocene times.

**Abridged English Version** — The Altiplano-Puna high plateau is about 200 km-wide and 1,500 km-long, with an average altitude of 3,650 m [1]. The Bolivian Altiplano has been traditionally considered as a province of Cenozoic tensional troughs which were only episodically submitted to compression ([2] to [5]). However, recent field work and reinterpretation of geologic, seismic and gravity data lead to the proposal of a different model for its southern part.

**THE DATA.** — The southern Bolivian Altiplano is bounded in the east by a west-verging thrust system [San Vicente Fault (FSV), etc.] [Fig. 1]. The FSV thrusts Ordovician strata, deformed in Caradocian times [16], of the Cordillera Oriental onto the Cenozoic strata of the Altiplano ([6] to [8]). In the northwest, the southern Altiplano is deformed by a NNE-trending thrust system limited by the Khenayani Fault system (SFK), which is a major structural boundary [9]. In this area, thrusts transport Ashgillian and younger units toward the east ([7], [8], [10]).

In the central part of the area of interest (the Lipez basin, Fig. 1), seismic and gravity data are used and correlated (Fig. 2) to show the geometry and size of both thrust systems. Identification of the seismic reflectors in the Vilque well indicates that no Silurian is present in the eastern thrust system. The seismic data show that the basinal fill consists of two overlying sedimentary wedges. The lower wedge shows westward progradation on a downlap surface and is associated with the functioning of the eastern thrusts, whereas the upper wedge is associated with the functioning of the northwestern thrusts. This is confirmed by sedimentary analysis of the outcropping related deposits. The relative chronology of development of the two convergent thrust systems is thus deduced.

The southernmost part of the Lipez basin is characterized by the existence of flower-structures several kilometers in length. Two of these structures crop out at Pululus and Casa Grande (Fig. 1). They are made of Ordovician strata, deformed in the Caradocian, thrust by their boundary faults against the Potoco Formation (Eocene-Middle Oligocene, [11]) and the basal San Vicente Formation (Late Oligocene-Early Miocene, [11]), which show

Note présentée par Jean AUBOUIN.

there evidence of a N-S trending, left-lateral transcurrent deformation. Other similar flower-structures are observed on seismic documents, where they appear to be progressively post-dated by the basal San Vicente. This strike-slip deformation is anterior to the thrusts that bound the basin and, within it, that affect strata as young as Middle to Late Miocene age (Quehua Formation).

INTERPRETATION AND CONCLUSIONS. — The structural geometry of the part of the Lipez basin which has been deformed only by thrusting can be determined by a balanced cross-section, constructed with the seismic data (*Fig. 3*) by using current methods ([12] to [14]). The depths of the main detachments can also be calculated [15]. The restoration suggests that a sharp structural boundary between the Ashgillian-Silurian outcrop area and the pre-Ashgillian one must have existed somewhere between the SFK and the Vilque thrust. Field data obtained farther northeast [17] strongly suggest that this boundary coincides with the SFK and was the edge of the Ashgillian-Silurian basin. Hence it is likely that, at least locally, the SFK has been controlled by the Early Paleozoic paleogeography.

The Lipez basin of the southeastern Altiplano appears to have behaved, during Late Oligocene and Miocene times, as an intermontane foreland basin [6], which was mainly fed by the convergent thrust systems that bounded it. Thus it is likely, as it has been proposed recently ([18], [19]) that the very thick coeval accumulations described from the northern and central Altiplano were also deposited in settings similar to this intermontane foreland basin, and *not* in tensional troughs.

I. INTRODUCTION. — L'Altiplano-Puna est un haut plateau, large d'environ 200 km, qui s'étend sur près de 1 500 km de longueur depuis le Pérou (15 lat. S) jusqu'en Argentine (27 lat. S). Son altitude est comprise entre 3 500 et 4 700 m. avec une moyenne de 3 650 m [1]. Dans les Andes Centrales, il constitue, comme le Tibet par rapport à l'Himalaya, une particularité essentielle du dispositif orogénique.

Les épaisses séries sédimentaires cénozoïques (4-10 km) de l'Altiplano bolivien ont été traditionnellement interprétées comme le remplissage de bassins en distension épisodiquement et brièvement soumis à des conditions compressives ([2] à [5]). Cependant, des levés de terrain, effectués récemment dans la partie méridionale de l'Altiplano bolivien, ainsi que l'interprétation de données de géophysique (sismique-réflexion, gravimétrie) et de forage fournies par la Compagnie Nationale des Pétroles Boliviens (Y.P.F.B.) permettent, au moins dans cette région, de proposer un modèle différent.

II. LES DONNÉES DE SURFACE ET DE SOUS-SOL. — 1. *Les données structurales.* — L'Altiplano sud-bolivien est limité à l'est (*fig. 1*) par la Faille de San Vicente, qui correspond à un chevauchement N-S à vergence ouest transportant l'Ordovicien de la Cordillère Orientale sur le Tertiaire de l'Altiplano ([6] à [8]). Cette faille s'amortit vers le nord où elle est relayée par des chevauchements plus externes à vergence sud-ouest, émergents (faille de Vilque) ou aveugles (*fig. 1* et 2).

Le système de la Faille de Khenayani (SFK), qui correspond à un chevauchement de vergence est, prend en écharpe l'Altiplano sud (*fig. 1*) et constitue une frontière structurale majeure [9]. Au nord-ouest de cette limite, l'Altiplano présente de nombreuses structures d'orientation NNE-SSW ([7], [8], [10]), décelées en majorité par la géophysique. Les grands chevauchements visibles transportent vers l'est des formations ashgilliennes et siluriennes (et leur couverture crétacée et tertiaire) sur du Tertiaire. Des structures

complexes (coins extrusifs, duplex), directement observables ou déduites par construction, sont associées à ce système de chevauchements qui s'amortit progressivement vers le sud.

Le domaine qui s'étend entre le SFK et la Faille de San Vicente constitue le bassin des Lipez (*fig. 1*). Dans la partie centrale de la région étudiée, une section de sismique-réflexion (*fig. 2*) recoupe le SFK et le chevauchement de Vilque, et permet de suivre en profondeur le développement du dispositif structural. Certains réflecteurs peuvent être identifiés à partir du puits de Vilque et on peut voir que dans le système de chevauchements oriental le Mésozoïque repose directement sur l'Ordovicien. Les données de sismique-réflexion et les données gravimétriques se corrèlent (*fig. 2*). La présence de corps de densité relativement élevée (probablement des duplex de Paléozoïque) peut être mise en évidence au niveau des fronts de chevauchement de Corregidores et de Khenayani ainsi qu'au point 3 de la figure 2. Vers l'est, l'anomalie gravimétrique décroît, confirmant ainsi l'importante épaisseur des sédiments tertiaires (3 000 m), la présence de sel dans la zone du puits de Vilque et la faible implication du Paléozoïque dans les chevauchements visibles en sismique (*fig. 2*).

Dans la partie méridionale du bassin des Lipez, outre les chevauchements, deux structures en fleur constituées d'Ordovicien et limitées par des failles inverses N-S à NE-SW, affleurent à Pululus et à Casa Grande (*fig. 1*). La géométrie de ces structures en fleur et la présence le long de leurs bordures de plis kilométriques obliques, en échelon, d'axes subhorizontaux et plans axiaux subverticaux orientés N20E et N40E, témoignent d'un mouvement en décrochement sénestre N-S. Entre Pululus et Casa Grande, la sismique-réflexion montre qu'il existe en profondeur d'autres structures en fleur de même orientation, qui sont progressivement scellées par les premiers dépôts du remplissage sédimentaire.

2. *Géométrie et âge du remplissage sédimentaire.* — Dans le bassin des Lipez, la Formation San Vicente (Oligocène supérieur-Miocène inférieur [11]) et, pour une part, la Formation Quehua (Miocène moyen à supérieur [11]) constituent deux ensembles sédimentaires associés aux chevauchements. La Formation San Vicente comprend des faciès variés, déposés dans des environnements de cônes alluviaux (adossés à des failles), de plaine alluviale et de lacs, dans lesquels s'intercalent quelques volcanites. La Formation Quehua correspond à des environnements essentiellement fluviaux et lacustres; l'influence volcanique (tufs dacitiques notamment) y est importante.

La sismique-réflexion permet de décrire la géométrie du remplissage sédimentaire de la partie du bassin comprise entre le SFK et le chevauchement de Vilque (*fig. 2*). Un premier prisme sédimentaire repose sur la Formation Potoco (Eocène-Oligocène moyen [11]), et est essentiellement constitué par la Formation San Vicente. Ce prisme est adossé au système de chevauchements oriental et prograde vers l'ouest. Sa surface supérieure est sismiquement bien définie et constitue la base d'un second corps sédimentaire où les réflecteurs sont rares et dont la géométrie suggère qu'il est lié au fonctionnement des chevauchements occidentaux. La superposition de ces deux prismes indique que le fonctionnement des chevauchements occidentaux est en partie postérieur à celui des chevauchements orientaux.

En surface, l'analyse des dépôts oligo-miocènes [6] confirme que les reliefs créés par le fonctionnement du SFK et de la Faille de San Vicente ont fourni au bassin une part considérable des sédiments, comme en témoignent les paléo-cônes conglomératiques qui les jalonnent. Au sud, les structures en fleur constituaient des reliefs moins importants.

L'agencement vertical et horizontal des unités sédimentaires, et notamment des faciès conglomératiques, indique donc que des reliefs ont été tectoniquement produits et *maintenus* pendant une grande partie du dépôt de la Formation San Vicente et d'une partie de la Formation Quehua. On en déduit que les déformations compressives à l'origine de ces reliefs n'ont été ni épisodiques, ni brèves (à l'échelle de la stratigraphie locale).

III. DISPOSITIF STRUCTURAL DE L'ALTIPLANO SUD. — Le long de la seule ligne sismique disponible qui recoupe les deux systèmes de chevauchements (*fig. 2*), nous avons construit une coupe équilibrée afin d'illustrer la géométrie du dispositif responsable de la structuration générale actuellement visible de la région (*fig. 3*). La coupe est perpendiculaire au SFK mais oblique par rapport au système de chevauchements oriental (*fig. 1*); cependant l'erreur introduite est négligeable sur l'ensemble de la coupe équilibrée [12]. Les techniques de construction utilisées sont celle des structures déroulables [13] et celle de la surface totale [14]. Une telle construction permet de définir avec plus de précision la géométrie des deux systèmes de chevauchements et de calculer (méthode Chamberlain [15]) la profondeur des niveaux de décollement principaux qui ne sont pas observables par les méthodes géophysiques utilisées.

La coupe a été construite à partir du centre du bassin car cette zone n'est pas déformée, comme l'indiquent les données sismiques (*fig. 2*). A partir de ce point, chacun des deux systèmes de chevauchements a été construit indépendamment. Le système nord-occidental est constitué de lames chevauchantes émergentes et d'un duplex d'Ashgill-Silurien dans sa partie frontale. La quantité de raccourcissement totale produite par ces chevauchements est de 20 km, soit 36 %. En utilisant cette valeur, le niveau de décollement principal se trouverait à environ 4 800 m au-dessous du toit du Silurien. Il correspond, dans cette partie nord-occidentale de l'Altiplano sud, aux diamictites pélitiques de la Formation Cancañiri (Ashgill), que l'on observe souvent directement au toit des chevauchements.

Le système oriental s'est développé dans un domaine où le Mésozoïque repose directement sur l'Ordovicien, lequel présente une déformation plicative synschisteuse d'âge Caradoc [16]. Dans la zone frontale, les chevauchements se sont amortis dans les dépôts tertiaires syntectoniques, et au mur de la Faille de San Vicente, s'est développé un duplex d'Ordovicien. La valeur de raccourcissement totale due à ce système de chevauchements est de 31 km, soit 32 %, et la profondeur du niveau de décollement principal au-dessous de la base du Mésozoïque serait de 3 300 m.

La construction de la coupe équilibrée permet de préciser la géométrie des structures chevauchantes et de montrer que les deux systèmes ne décollent ni dans le même niveau stratigraphique, ni à la même profondeur. La reconstitution de l'état non déformé (*fig. 3*) montre qu'entre la Faille de Khenayani et Vilque, l'Ashgill-Silurien et l'Ordovicien entrent latéralement en contact brutal. Les recherches menées plus au nord suggèrent que ce contact correspond à la paléobordure du bassin ashgillien-silurien [17]. Il est probable qu'au moins localement le SFK ait été contrôlé par cet élément paléogéographique majeur.

IV. CONCLUSION. — La déformation responsable de l'architecture actuelle du bassin des Lipez a débuté avec le fonctionnement de décrochements senestres responsables de la formation, dans la partie méridionale, de structures en fleur qui paraissent être synchrones du début du dépôt de la Formation San Vicente (Oligocène supérieur). Les systèmes de chevauchements convergents se sont développés postérieurement. A leur fonctionnement est associée la formation d'un bassin d'avant pays d'âge Miocène inférieur

et moyen (Formations San Vicente et Quehua) dont les sédiments synchrones des chevauchements ont recouvert la plupart des structures en fleur antérieures. La géométrie des prismes associées aux deux systèmes de chevauchements montre que le système occidental est partiellement postérieur au système oriental.

Le sud-est de l'Altiplano bolivien apparaît donc comme un bassin intramontagneux en compression, d'âge Oligocène supérieur et Miocène *pro parte* [6]. Les importantes accumulations néogènes (3 000 m) du bassin des Lipez se sont ainsi déposées pendant au moins 15 Ma dans un contexte de bassin intramontagneux d'avant-pays, et non de « graben ». Comme le proposent certains travaux récents ([18], [19]), on est désormais en droit de se demander si les très épaisses accumulations de même âge décrites dans le nord et le centre de l'Altiplano ne se sont pas elles aussi déposées dans des contextes similaires.

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la Convention de recherche sur la Géologie de la Bolivie existant entre l'ORSTOM et Yacimientos Petroliferos Fiscales Bolivianos (Y.P.F.B.).

Nous remercions particulièrement M. Cirbian, O. Aranibar et E. Martinez, du projet d'Études de l'Altiplano à Y.P.F.B., pour leur concours.

Note remise le 29 novembre 1989, acceptée après révision le 5 juin 1990.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] B. L. ISACKS, *J. Geoph. Res.*, 93, n° B4, 1988, p. 3211-3231.
- [2] F. E. AHLFELD et L. BRANISA, *Geologia de Bolivia*, Don Bosco, La Paz, 1963, 245 p.
- [3] C. MARTINEZ, *Trav. Doc. ORSTOM*, n° 109, 1980, 352 p.
- [4] J. L. MERCIER, *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), XXVI, n° 3, 1984, p. 551-566.
- [5] A. LAVENU, *Thèse État*, Univers. Paris Sud Orsay, 1986, 434 p.
- [6] T. SEMPÈRE, R. MAROCCO et M. CIRBIAN, Résumé, *VII<sup>e</sup> Cong. Geol. Bol.*, La Paz, 1986, p. 50.
- [7] J. PAREJA et R. BALLON, *Mapa geológico de Bolivia*, éch. 1/1000 000, 1978, La Paz.
- [8] Y. P. F. B., *Mapa geológico del Altiplano*, éch. 1/500 000, 1989, Santa Cruz (en préparation).
- [9] T. SEMPÈRE, G. HERAIL et J. OLLER, *V Cong. Geol. Chil.*, Santiago, 1988, p. A127-A142.
- [10] J. CADIMA VALDEZ, Document Y.P.F.B., Santa Cruz, 1973, 59 p.
- [11] T. SEMPÈRE et J. OLLER, document Y.P.F.B., ORSTOM, Santa Cruz, 1987, inédit.
- [12] R. A. PRICE, *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, n° 9, 1981, p. 427-448.
- [13] C. D. A. DAHLSTROM, *Can. Journ. of Earth. Sci.*, 6, 1969, p. 743-757.
- [14] J. R. HOSSACK, *Journ. Geol. Soc. London.*, 136, 1979, p. 705-711.
- [15] R. C. CHAMBERLAIN, *Jour. Geol.*, 18, 1910, p. 228-251.
- [16] T. SEMPÈRE, *28<sup>e</sup> Cong. Geol. Int.* (Washington), 3, 1989, p. 73.
- [17] T. SEMPÈRE, P. BABY, J. OLLER et G. HERAIL, *C.R. Acad. Sci. Paris* (soumis).
- [18] T. SEMPÈRE, G. HERAIL, J. OLLER et P. BABY, *28<sup>e</sup> Cong. Geol. Int.* (Washington), 3, 1989, p. 72-73.
- [19] T. SEMPÈRE, G. HERAIL, J. OLLER et M. BONHOMME, Manuscrit soumis à *Geology*, 1989.

P. B. et T. S. : *ORSTOM*, CC 4875, Santa Cruz, Bolivie;

J. O. et L. B. : *G.X.G.-Y.P.F.B.*, CC 1659, Santa Cruz, Bolivie;

G. H. : *ORSTOM*, CC 9214, La Paz, Bolivie;

R. M. : *ORSTOM*, CC 6596, Quito, Equateur.

## EXPLICATIONS DE LA PLANCHE

Fig. 1. — Carte géologique du sud-est de l'Altiplano bolivien (carte Y.P.F.B. [8] modifiée). 1, sédiments plioquaternaires; 2, laves et tufs cénozoïques; 3, diapirs; 4, intrusifs; 5, sédiments tertiaires; 6, Crétacé; 7, Ashgill-Silurien; 8, Ordovicien.

Fig. 1. — *Geologic map of the southeastern Bolivian Altiplano (Y.P.F.B. map [8] modified)*. 1: *Plio-Quaternary sediments*; 2: *Cenozoic volcanics*; 3: *diapirs*; 4: *Cenozoic intrusions*; 5: *Tertiary sediments*; 6: *Cretaceous*; 7: *Ashgillian-Silurian*; 8: *Ordovician*.

Fig. 2. — Section sismique interprétée à travers le bassin des Lipez (localisation sur la figure 1) et courbe gravimétrique résiduelle correspondante (documents Y.P.F.B.). 1, Plio-Quaternaire; 2, Formations Quehua et/ou San Vicente; 3, Formation San Vicente; 4, Formation Potoco; 5, Crétacé et/ou Paléozoïque.

Fig. 2. — *Interpreted seismic section through the Lipez basin (location on Figure 1) and corresponding a residual gravity profile (Y.P.F.B. documents)*. 1: *Plio-Quaternary*; 2: *Quehua and/or San Vicente Formations*; 3: *San Vicente Formation*; 4: *Potoco Formation*; 5: *Cretaceous and/or Paleozoic*.

Fig. 3. — Coupe équilibrée à travers le bassin des Lipez (localisation sur la figure 1). Plio-Quaternaire; 2, Formations Quehua et/ou San Vicente; 3, Formation San Vicente; 4, Formation Potoco; 5, Crétacé; du fait de sa minceur (100 m) le Mésozoïque n'est pas représenté dans le système oriental; 6, Ashgill-Silurien; 7, Ordovicien.

Fig. 3. — *Balanced cross-section through the Lipez basin (location on the Figure 1)*. 1: *Plio-Quaternary*; 2: *Quehua and/or San Vicente Formations*; 3: *San Vicente Formation*; 4: *Potoco Formation*; 5: *Cretaceous*; *because of its thinness (100 m), the Mesozoic is not figured in the eastern system* 6: *Ashgillian-Silurian*; 7: *Ordovician*.

