

## La nappe de Calazaya : une preuve de raccourcissements majeurs gouvernés par des éléments paléostratigraphiques dans les Andes boliviennes

Thierry SEMPÈRE, Patrice BABY, Jaime OLLER et Gérard HERAIL

**Résumé** — Une nappe tectonique de flèche importante est mise en évidence à la limite Altiplano-Cordillère Orientale (Bolivie, 20°S). Sa mise en place découle du transport vers l'Est d'un vaste domaine allochtone à l'Oligocène supérieur-Miocène inférieur. Le décollement basal de l'allochtone se situe dans une unité stratigraphique dont la géométrie en 3 dimensions a gouverné celle de la déformation.

### The Calazaya nappe: evidence for major shortening controlled by paleostructural elements in the Bolivian Andes

**Abstract** — A tectonic nappe showing important horizontal displacement is evidenced at the Altiplano-Cordillera Oriental transition in Bolivia (20°S). Its emplacement is related to the eastward transport of a large allochthon domain in the late Oligocene-early Miocene. The basal décollement of the allochthon is located in a stratigraphic unit whose 3-dimensional shape controlled the geometry of deformation.

**Abridged English Version** — The central Andes have been traditionally considered as a cordillera built along an active by essentially vertical tectonics ([1] to [5]). However, several scientific currents now coincide in the search for important crustal shortenings in the Andes of Bolivia and southern Peru ([6] to [14]). Recent work ([15], [16]) suggests that shortenings in the Bolivian Andes might be considerable. In this paper we describe the Calazaya tectonic nappe, which occurs at the junction of the east-verging Main Altiplanic thrust (CALP) with the Khenayani fault system (SFK) (Fig. 1). The Uyuni allochthon is overthrust over the Ayoma-Atocha (relative) autochthon by means of both the CALP and SFK.

The horizontal displacement of the Calazaya nappe (Fig. 2) was at least 42 km, assuming that transport direction was perpendicular to the main structures in the allochthon, *i.e.* toward the ENE. Several differences in stratigraphy, facies and thicknesses exist between allochthon and autochthon (Fig. 3). Several klippen show the initial extension of the nappe and define its "envelope". Structural complexity and irregularity suggest that paleostructural elements deeply influenced the Andean deformation in the area. Details concerning the nappe structure are to be presented elsewhere [17].

The Khenayani-Turuchipa structural corridor (CPKT), which crosses the study area, is a major paleogeographic feature of SW Bolivia [19], which interfered with or controlled Andean deformations and, more particularly, the development of the SFK [18]. It coincides with the NW front of the "Olocyclic" (*see* [23]), *i.e.* Llandeilian-Caradocian [19], deformation, and with the SE edge of the Ashgillian-Silurian basin. The thickness of the Ashgillian [19] Cancañiri Formation also quickly decreases east of the CALP [20]. Influence of the CPKT on sedimentation and/or deformation is episodically perceptible till Cretaceous time [19].

The late Oligocene-early Miocene Lipez and Bolívar-Mondragón basins (Fig. 1) are the foreland basins of the CALP-SFK system ([18], [22]). Thus the functioning of the CALP-SFK is coeval with the major tectonic crisis known in many parts of Andean

Note présentée par Jean AUBOUIN.

Bolivia ([9], [10], [18], [21]). Field relations show that the nappe emplacement occurred relatively lately, and is thus probably early Miocene in age.

The geometry of the Ashgillian basin, filled with the non-stratified fine-grained diamictites of the Cancañiri Formation in which the basal décollement is located, appears to have controlled the geometry of the Uyuni allochthon. Such paleostructural and stratigraphic controls on Andean-age deformations have been evidenced in some areas of the central Andes ([15], [16], [23]), and should be searched for at all scales in the whole Bolivian Andes.

Les Andes centrales ont été traditionnellement considérées comme une chaîne construite le long d'une marge active par des mouvements tectoniques essentiellement verticaux ([1] à [5]), par conséquent à l'origine des raccourcissements relativement faibles. Pour les Andes boliviennes, ceux-ci étaient estimés inférieurs à 20 % [3], soit moins de 70 km sur une transversale Oruro-Santa Cruz.

Cependant, plusieurs courants scientifiques s'accordent désormais à rechercher dans les Andes boliviennes et sud-péruviennes, des raccourcissements crustaux importants ([6] à [11]). De nombreuses failles considérées antérieurement comme inverses et subverticales se sont révélées être des chevauchements ([11] à [14]). Le raccourcissement minimum au niveau d'une transversale Oruro-Santa Cruz est de 210 km, soit 36 % [15]. Pour la seule zone subandine, des raccourcissements minima de 136 km (51 %) à 15°S et 139 km (53 %) à 20°S ont été calculés [16]. Ceci suggère que les raccourcissements correspondants aux Andes proprement dites sont au moins du même ordre de grandeur, et donc considérables. Par ailleurs, d'importants raccourcissements semblent se « concentrer » sur des structures spécifiques [14]. Nous exposons ici la découverte d'une nappe tectonique dans la zone de transition entre l'Altiplano et la Cordillère Orientale, à environ 20°S (*fig. 1*), en nous attachant à en souligner le contrôle par des éléments paléostructuraux. L'intérêt purement structural présenté par cette nappe sera exposé ailleurs [17].

**DONNÉES CARTOGRAPHIQUES.** — Dans la région étudiée (*fig. 2*), un contact anormal majeur, de pendage inférieur à 15°, fait reposer le domaine allochtone d'Uyuni sur le domaine d'Ayoma-Atocha (autochtone relatif) et définit ainsi la « nappe de Calazaya ». Il constitue la prolongation méridionale du Chevauchement Altiplanique Principal (CALP) défini vers 19°S ([12] à [14]).

La nappe de Calazaya « s'enracine » à l'Ouest dans le domaine d'Uyuni, dont la limite sud-orientale est le système chevauchant de la Faille de Khenayani (SFK, *fig. 1*). Si l'on admet que la direction du transport tectonique a été perpendiculaire aux structures de l'allochtone, la flèche du recouvrement est supérieure ou égale à 42 km (*fig. 2*). Plusieurs klippes, dégagées par la capture des écoulements locaux par le bassin du Río de la Plata, témoignent de l'extension initiale de la nappe et en définissent « l'enveloppe » (*fig. 2*). La complexité de la carte et l'irrégularité des structures suggèrent que des éléments paléostructuraux ont profondément influencé la déformation andine dans la région.

**LE COULOIR PALÉOSTRUCTURAL KHENAYANI-TURUCHIPA (CPKT).** — Le CPKT, large d'environ 30 km, constitue un élément paléogéographique important du Sud-Ouest bolivien (*fig. 1*). Au Nord-Est, il sépare le domaine d'Ayoma-Atocha en deux sous-domaines de caractéristiques différentes et son influence sur les plis andins se traduit par le plongement de leur axe vers le NNO dans la zone d'intersection. Au Sud-Ouest, il

coïncide avec le système chevauchant à composante dextre du SFK, dont il a certainement contrôlé le développement [18].

LES SÉRIES IMPLIQUÉES ET LEUR PALÉOGÉOGRAPHIE. — Les unités stratigraphiques affleurantes sont pratiquement les mêmes dans les deux domaines (*fig. 3*). Elles présentent toutefois certaines différences de faciès et d'épaisseur. Le rejet stratigraphique entre allochtone et autochtone est d'environ 2 km. L'influence du CPKT sur les paléogéographiques et structures paléozoïques et mésozoïques se traduit diversement [19].

L'Ordovicien anté-Caradoc est affecté par des déformations probablement d'âge Llandeilo-Caradoc dont l'intensité croît vers le Sud (plis à toutes les échelles, schistosité) et dont le front nord-occidental coïncide apparemment avec le CPKT.

La Formation Tokochi [19] (Caradoc supérieur?), constituée de lutites noires, marque un approfondissement rapide lié à l'individualisation du bassin ashgillo-silurien au nord-ouest du CPKT.

La Formation Cancañiri qui succède à la Formation Tokochi est la plus ancienne formation qui soit présente dans les deux unités tectoniques, car le décollement basal de l'unité allochtone d'Uyuni se situe dans sa partie supérieure (*fig. 3*). D'âge Ashgill, elle se compose dans la région étudiée de diamictites glacio-marines à matrice pélitique et présente en règle générale une *absence de stratification*. La limite sud-orientale de ses affleurements coïncide avec le CPKT. Près de cette limite, la matrice des diamictites devient gréseuse, tandis que la taille et l'abondance des olistolites augmentent. Ceci suggère que le CPKT correspondait, en première approximation, à la bordure sud-orientale, tectoniquement active, du bassin ashgillien. Par ailleurs, l'épaisseur de la Formation Cancañiri décroît rapidement à l'est du CALP [20], probablement en relation avec l'existence d'un système de failles normales à regard OSO qui devait contrôler le bassin (Dr R. Suárez, travaux en cours).

Cette unité est surmontée par la Formation Llallagua (Silurien inférieur), constituée de turbidites gréseuses. Elle est généralement épaisse d'une à plusieurs centaines de mètres dans l'allochtone, alors que dans l'autochtone, son épaisseur ne dépasse pas quelques dizaines de mètres dans les quelques lieux où elle n'a pas été totalement érodée avant le dépôt du Mésozoïque.

Dans l'autochtone, les structures andines subméridiennes ont repris des grands plis pré-mésozoïques d'orientation NO-SE (*fig. 2*), c'est-à-dire perpendiculaire au CPKT. Les manifestations les mieux marquées (angularités) de la discordance mésozoïque s'alignent, dans l'autochtone comme dans l'allochtone, selon des directions NE-SO. Tout ceci suggère que le CPKT a joué un rôle lors des déformations intervenues après le Silurien et avant le Jurassique [19].

Deux événements distensifs importants, d'âges respectifs kimméridgien et coniacien, sont connus en Bolivie andine. Les répartitions et les faciès des dépôts associés, ainsi que les paléocourants correspondants, suggèrent fortement que la préexistence du CPKT a influencé les géométries structurales alors produites, en particulier dans la région étudiée [19]. Le CPKT est également intervenu au moins pendant le dépôt du Sénonien, qui présente un onlap vers le Sud-Est; l'épaisseur du seul Maastrichtien s'accroît notablement au nord-ouest du CPKT.

On ne perçoit pas d'influence appréciable du CPKT dans la paléogéographie des dépôts postérieurs jusqu'à l'Oligocène supérieur, époque à laquelle se développe une crise tectonique majeure dans au moins une grande partie des Andes boliviennes ([9], [10], [18], [21]).

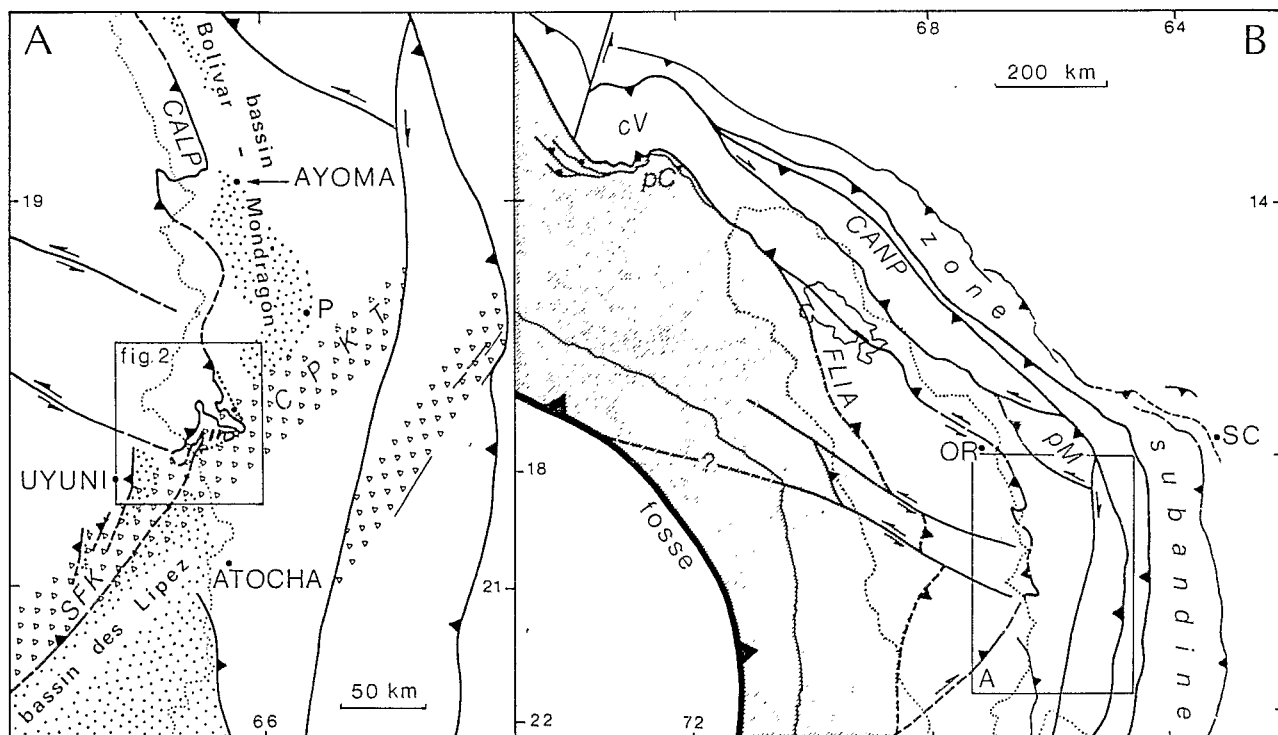


Fig. 1. — Localisation de la région étudiée dans le cadre structural des Andes boliviennes (A) et centrales (B).

A : la ligne finement pointillée figure la ligne de partage des eaux; CALP : Chevauchement Altiplanique Principal; CPKT : Couloir Paléostrucural Khenayani-Turuchipa (triangles); P : Potosí; SFK : Système de la Faille de Khenayani. B (d'après [9] et [10]) : la ligne finement pointillée figure la limite du bassin endoréique actuel de l'Altiplano; encadré : localisation de la figure 1 A; domaine hachuré : « terrains andins occidentaux »; FLIA : Faille-Limite Intra-Andine; CANP : Chevauchement Andin Principal; bC : butoir du Chapare; cV : charnière de Vilcabamba; pC : poinçon de Cuzco; pM : poinçon (écrasé) de Mizque; OR : Oruro; SC : Santa Cruz.

Fig. 1. — Location of the studied area in the structural framework of the Bolivian (A) and central (B) Andes. A : fine dot line: drainage divide; CALP: Main Altiplanic thrust; CPKT: Khenayani-Turuchipa paleostructural corridor (triangles); P: Potosí; SFK: Khenayani fault system. B (after [9] and [10]): fine dot line: boundary of the present-day endoreic Altiplano basin; framed: location of Figure 1 A; shaded area: Andean "western belt"; FLIA: Intra-Andean Boundary Fault, CANP: Main Andean thrust; bC: Chapare buttress; cV: Vilcabamba hinge; pC: Cuzco indenter; pM: Mizque (crushed) indenter; OR: Oruro; SC: Santa Cruz.

CHRONOLOGIE DE LA DÉFORMATION ET BASSINS D'AVANT-PAYS ASSOCIÉS. — Les chevauchements paraissent, dans leur ensemble, postérieurs à une déformation transcurrente sénestre subméridienne qui n'est marquée que par des structures observables à l'échelle des affleurements. Celles-ci suggèrent un caractère continu et diffus pour cette déformation qui se poursuit vers le Sud et est probablement d'âge Oligocène supérieur [18].

L'autochtone est affecté par des chevauchements qui « s'amotissent » souvent latéralement dans les diamictites fines de la Formation Cancañiri (où il est en fait impossible de les suivre faute de bancs repères). La cartographie montre que la nappe de Calazaya leur est postérieure. Deux spectaculaires zones de duplex, liées à ces chevauchements, s'observent à Tojra Palca et à Ticatica (fig. 2); la structuration de ces duplex est effectivement antérieure à la mise en place de la nappe, qui les a écrétés [17]. D'autre part, la structure interne de la nappe montre que son matériel a été déformé par des plis et des failles d'orientation NNO à NNE avant et/ou pendant le charriage.

Dans l'allochtone comme dans l'autochtone, les vergences apparentes sont orientales à nord-orientales dans leur grande majorité. Ceci corrobore l'enracinement occidental de la nappe et invite à rechercher à l'Est des dépôts corrélatifs de la déformation. Or deux bassins sédimentaires, séparés par le CPKT et remplis par des couches rouges fluviales d'âge Oligocène supérieur-Miocène inférieur, bordent le système CALP-SFK à l'Est (fig. 1). Le bassin des Lipez constitue le bassin d'avant-pays du SFK [18]. Le bassin des formations Bolívar et Mondragón est très probablement le bassin d'avant-pays du CALP [22]. Dans le domaine d'Uyuni, on peut noter l'existence de plusieurs bassins en « piggyback » de même âge, comme celui de Pulacayo (fig. 2).

Ceci suggère que le système chevauchant formé par le CALP et le SFK a fonctionné à l'Oligocène supérieur-Miocène inférieur, et que la nappe de Calazaya, qui se situe à leur jonction, a probablement un âge Miocène inférieur, puisqu'elle s'est mise en place tardivement par rapport aux premiers chevauchements.

CONCLUSIONS. — Le développement du système CALP-SFK a culminé dans la région étudiée par la mise en place de la nappe de Calazaya. Les données cartographiques montrent que le raccourcissement correspondant est considérable, supérieur ou égal à 42 km pour la nappe seule.

Le domaine allochtone d'Uyuni semble coïncider avec le paléodomaine profond du bassin ashgillo-silurien, qui était contrôlé par le CPKT et probablement par des failles normales (listriques?) à regard OSO, et présentait à sa base des faciès particulièrement favorables aux décollements. La géométrie en trois dimensions de la Formation Cancañiri, dans laquelle se situe le décollement basal de l'allochtone, paraît donc avoir gouverné la géométrie de la déformation. La pérennité du rôle du CPKT dans la sédimentation et la déformation est à souligner.

De telles influences paléostructurales et stratigraphiques sur les déformations d'âge andin ont été mises en évidence dans certaines régions des Andes Centrales ([15], [16], [23]). Elles sont désormais à envisager à toutes les échelles dans l'ensemble des Andes Andines.

Nous remercions Gérard Laubacher (ORSTOM-Montpellier) pour nous avoir fourni un exemplaire de la scène *Spot*, traitée par ses soins, qui couvre une partie de la région étudiée. Nous remercions la Brigade 10 d'exploration de YPFB pour les facilités logistiques accordées sur le terrain.

Convention YPFB-ORSTOM.

Note remise le 27 avril 1990, acceptée après révision le 21 novembre 1990.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] F. MEGARD, *Travaux et Documents ORSTOM*, 86, 1978, 310 p.
- [2] B. DALMAYRAC, G. LAUBACHER et R. MAROCCO, *Travaux et Documents ORSTOM*, 122, 1980, 501 p.
- [3] C. MARTINEZ, *Travaux et Documents ORSTOM*, 119, 1980, 352 p.
- [4] A. LAVENU et R. MAROCCO, *Bull. Rech. Expl. Prod. Elf-Aquitaine*, 8, 1984, p. 57-70.
- [5] M. SEBRIER, A. LAVENU, M. FORNARI et J. P. SOULAS, *Géodynamique*, 3, 1988, p. 85-106.
- [6] H. LYON-CAEN, P. MOLNAR et G. SUAREZ, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 75, 1985, p. 81-92.
- [7] B. L. ISACKS, *J. Geoph. Res.*, 93, 1988, p. 3211-3231.
- [8] D. ROEDER, *Tectonics*, 7, 1988, p. 23-29.
- [9] T. SEMPÈRE, G. HERAIL, J. OLLER et P. BABY, 28<sup>e</sup> Congr. Géol. Int., 3, 1989, p. 72-73.
- [10] T. SEMPÈRE, G. HERAIL, J. OLLER, P. BABY, L. BARRIOS et R. MAROCCO, *Int. Symp. on Andean Geodyn.*, Grenoble, 1990, p. 167-170.
- [11] J. C. VICENTE, F. SEQUEIROS, M. A. VALDIVIA et J. ZAVALA, *Bol. Soc. Geol. Perú*, 61, 1979, p. 67-99.

- [12] T. SEMPERE, H. CHAVEZ et E. VARGAS, 8<sup>e</sup> Congr. Geol. Boliv., 1986, p. 48-49.  
 [13] H. CHAVEZ, 5<sup>e</sup> Congr. Géol. Chil., 1, 1988, p. 143-156.  
 [14] T. SEMPERE, G. HERAIL et J. OLLER, 5<sup>e</sup> Congr. Géol. Chil., 1, 1988, p. A 127-142.  
 [15] B. SHEFFELS, Ph. D., M.I.T., 1988, 170 p.  
 [16] P. BABY, G. HERAIL, M. LOPEZ, O. LOPEZ, J. OLLER, J. PAREJA, T. SEMPERE et D. TUFÍÑO, C.R. Acad. Sci. Paris, 309, série. II, 1989, p. 1717-1722.  
 [17] P. BABY, T. SEMPERE, J. OLLER et G. HERAIL, *Tectonophysics* (soumis).  
 [18] P. BABY, T. SEMPERE, J. OLLER, L. BARRIOS, G. HERAIL et R. MAROCCO, C.R. Acad. Sci. Paris, 311, série II, 1990, p. 341-347.  
 [19] T. SEMPERE, P. BABY, J. OLLER et G. HERAIL, *Rev. Técn. Y.P.F.B.*, Cochabamba (sous presse).  
 [20] L. A. RODRIGO, A. CASTAÑOS et R. CARRASCO, *Rev. Geoci. U.M.S.A.*, La Paz, 1, 1977, p. 1-22.  
 [21] T. SEMPERE, G. HERAIL, J. OLLER et M. G. BONHOMME, *Geology*, 1990 (sous presse).  
 [22] T. SEMPERE, H. CHAVEZ et M. PEREZ, 8<sup>e</sup> Congr. Geol. Boliv., 1986, p. 45-46.  
 [23] R. W. ALLMENDINGER, V. A. RAMOS, T. E. JORDAN, M. PALMA et B. L. ISACKS, *Tectonics*, 2, 1983, p. 1-16.

T. S. : ORSTOM, CC 4875, Santa Cruz, Bolivie.

Adresse actuelle : C.G.G.M., École des Mines,  
35, rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau Cedex;

P. B. : ORSTOM, CC 4875, Santa Cruz, Bolivie;

J. O. : Yacimientos Petroliferos Fiscales Bolivianos, Gerencia de Exploración,  
CC 1659, Santa Cruz, Bolivie;

G. H. : ORSTOM, CP 9214, La Paz, Bolivie.

#### EXPLICATIONS DE LA PLANCHE

Fig. 2. — Carte géologique de la région de Calazaya (localisation sur figure 1A). Sources des données : Geobol, feuilles au 1/100 000 d'Uyuni et d'Ubina, 1966; J. Oller, carte géologique inédite, 1973; levés de terrain ORSTOM-YPFB, 1988-89; images Spot et Landsat. 1 : contact basal de la nappe de Calazaya et, en pointillés, « enveloppe » de celle-ci; 2 : autres failles; C : Calazaya; P : Pulacayo, Tk : Tokochi; TP : Tojra Palca; Tt : Ticatica; U : Uyuni; Y : Yura; la ligne tiretée au sein du Kimméridgien-Eocène figure un horizon repère d'âge Campanien terminal.

Fig. 2. — Geologic map of the Calazaya area (location on Figure 1A). Sources of data: Geobol, 1/100 000 sheets "Uyuni" and "Ubina", 1966; J. Oller, unpublished geological map, 1973; ORSTOM-YPFB field mapping, 1988-89; Spot and Landsat satellite imagery. 1: basal overthrust of the Calazaya nappe and, in dots, "envelope" of the nappe; 2: other faults; C: Calazaya; P: Pulacayo; Tk: Tokochi; TP: Tojra Palca; Tt: Ticatica; U: Uyuni; Y: Yura; the dashed line within the Kimmeridgian-Eocene is a guide level of latest Campanian age.

Fig. 3. — Stratigraphies schématiques de l'allochtone et de l'autochtone (voir texte).

Fig. 3. — Schematic stratigraphies of the allochthon and autochthon (see text).

