

Structure de la Zone Subandine de Bolivie : influence de la géométrie des séries sédimentaires antéorogéniques sur la propagation des chevauchements

Patrice BABY, Gérard HERAIL, Jorge Marcimio LOPEZ, Oscar LOPEZ, Jaime OLLER, Jorge PAREJA, Thierry SEMPÈRE et David TUFÍÑO

Résumé — La structure de la Zone Subandine de Bolivie varie considérablement du Nord au Sud du pays comme le montrent les deux coupes équilibrées présentées. Cette différence est due aux caractéristiques géométriques et stratigraphiques des séries préorogéniques antérieurement à leur déformation.

Structure of the Subandean belt of Bolivia: influence of the pre-orogenic sedimentary pile geometry on thrust propagation

Abstract — The structure of the Bolivian Subandean belt considerably varies from northwest to south, as evidenced by two balanced cross-sections. This differentiation is due to the geometrical and stratigraphic characteristics of the pre-orogenic strata prior to their deformation.

Abridged English Version — In the Subandean fold-thrust belt of Bolivia ([1] to [6]), the Chapare buttress separates two different branches. The 60-80 km-wide Northwestern Subandean is characterized by broad synclines and a lack of blind structures below the Beni plain. The 100-140 km-wide Southern Subandean shows relatively narrow synclines and anticlines and deformation continues below the Chaco plain. Two balanced cross-sections, respectively located close to the Peruvian border and north of the Argentine border (*Fig.*), allow to point out important structural differences between these two branches and detailing the influence of décollements geometry on the variation in deformation style along the belt.

GEOMETRY OF THE PRE-OROGENIC SEDIMENTARY PILE. — In the northwestern Subandean (between 14 and 15°S), the pre-orogenic sedimentary pile covers, with notable interruptions, Ordovician-Maestrichtian interval [4]. The Ordovician strata thickness thins from 4,000 m in the southwest to 600 m in the northeast ([4], [10]). Silurian shaly strata only deposited in the Southwest. Thick Latest Silurian and Devonian shales are known in all the northwestern Subandean. Permian-Carboniferous sandstones, diamictites, shales and limestones thin out in a northeasterly direction because of beveling below the Mesozoic Beu Formation, suggesting pre-Beu tilting of the Paleozoic sedimentary pile down to the southwest. General NE-tapering of Ordovician, Silurian and Permian-Carboniferous strata is thus noteworthy. The two main décollement levels are located in the Mid-Ordovician and Early Devonian shales, and a secondary décollement may occur in the Silurian shales where present. Because of the pre-Beu tilting and the pronounced NE-tapering of the sedimentary pile, the basal décollement angle is high (about 5°).

In the southern Subandean (at about 21°50'), the deformed pre-orogenic series is practically continuous from Silurian to Mesozoic. The main décollement levels are located in organic-rich shales of Early Silurian, Emsian, Givetian and Frasnian age. The Silurian-Devonian succession is covered by more than 2,000 m of Late Paleozoic and Mesozoic sandstones with

Note présentée par Jean AUBOUIN.

no potential decollement levels. In contrast with the northwestern Subandean, the decollement levels are multiple, continuous, regular and relatively deep, and their angle is constant and less than 2° .

STRUCTURAL STYLE. — In the northwestern Subandean (*Fig.*, A-B cross-section), two structurally different strips are distinguished. The southwestern Serranías de Beu and Toregua are made of thick imbricates, deformed by later development at depth of duplexes in the Ordovician. This unit was northeasterly thrust onto the synorogenic sediments accumulated in the Madidi-Yuama syncline, while a tectonic wedge is formed at depth. The northeastern Serranía de Caquiahuaca, which marks the external boundary of the Subandean belt in this area, has a complex structure of Ordovician duplexes evolving to a tectonic wedge. The shortening due to this structure at depth is compensated at the surface by the emergence of other thrusts. This suggests that it originated because of blocking of thrust propagation (no blind structures exist below the nearby Beni plain). The balanced cross-section shows that such blocking is probably due to the tapering of Ordovician strata and the related increase of the basal decollement angle. Shortening is considerable (136 km, *i. e.* 51%) and seems to “concentrate” on both sides of the Madidi-Yuama syncline.

In the southern Subandean (*Fig.*, C-D cross-section), the structural style is very different. From west to east, imbricate structures, with ramp anticlines, pass to stack anticlines and then to ramp anticlines associated with blind thrusts below the Chaco plain. Progression of deformation involved duplexing, evolving to wedging, and relieving of shallow thrusts by deeper decollements. Whatever their position in the southern Subandean, the anticlinal structures are often easterly transported, after formation, by thrusts originated from a deep decollement in the Silurian shales. On our cross-section, shortening, though less than in the northwest, is still significant (90 km, *i. e.* 38%).

CONCLUSIONS. — Though they developed contemporaneously and in a similar geotectonic setting, the northwestern and southern Subandean show very different structural characteristics. This is explained by a specific tectonic behaviour of the sedimentary pile, related to the basal decollement angle. In the south, the multiplicity and regularity of the decollement levels, the limited thickness variation of the stratigraphic units and the low basal decollement angle facilitated the easterly propagation of deformation and the relieving of shallow thrusts by deeper and more external ones when the first blocked. In the northwest, on the contrary, the existence of only two main continuous decollement levels, the high basal decollement angle and the NE-tapering of various stratigraphic units explain that the northeasterly propagation of deformation frequently blocked, leading to notable tectonic imbrication and backward development of thrusts. These stratigraphic and paleostructural heterogeneities were directly inherited from the geometrical configuration of the basin in which the pre-orogenic series deposited and from the tectonic tiltings that affected it.

La Zone Subandine de Bolivie correspond à une ceinture de plis et chevauchements dont la structuration a débuté à la fin de l'Oligocène [1] et s'est développée au cours du Néogène ([2] à [5]). Cet ensemble est limité du côté andin par le Chevauchement Frontal Principal (C.F.P.) [6], alors qu'à l'Est, les chevauchements subandins s'amortissent dans les plaines du Beni et du Chaco.

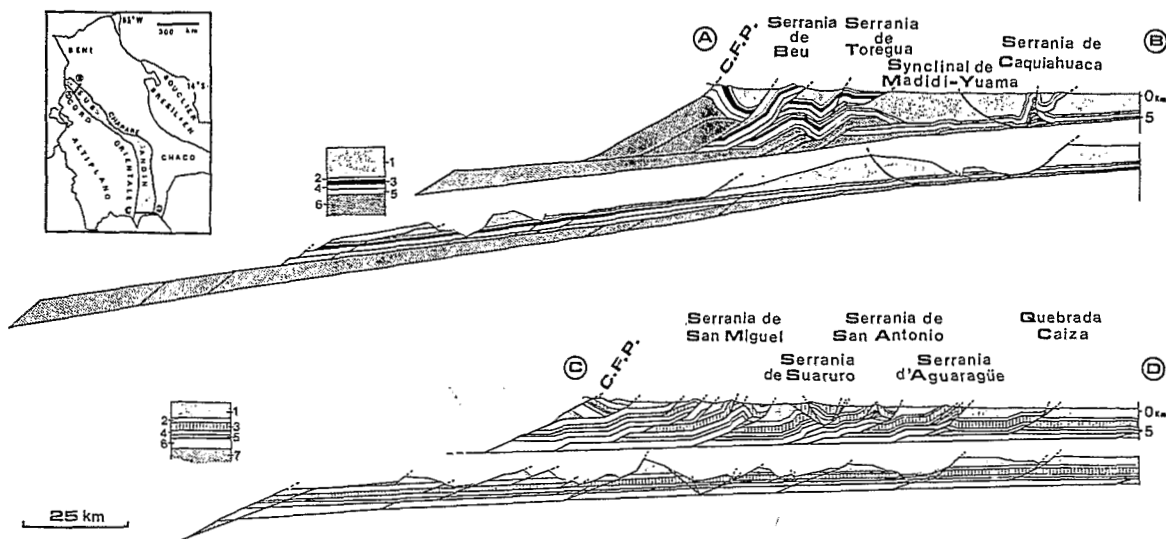
La présentation de deux coupes équilibrées (*fig.*) perpendiculaires aux structures, l'une située près de la frontière péruvienne, l'autre près de la frontière argentine, montre qu'il existe d'importantes différences régionales dans la structure de la Zone Subandine. Au

Nord-Ouest, la Zone Subandine, large de 60 à 80 km, se caractérise par la présence d'amples synclinaux (jusqu'à 30 km de largeur) et par l'absence de structures aveugles sous la plaine du Beni. Au Sud, la Zone Subandine, plus large (100 à 140 km), est constituée de synclinaux et anticlinaux relativement étroits (moins de 15 km de largeur); la déformation s'y poursuit sous la plaine du Chaco. Ces deux coupes permettent, en outre, de décrire certaines structures caractéristiques et de montrer l'influence de la géométrie des séries antéorogéniques déformées (nombre, profondeur et pente des niveaux de décollement) sur l'évolution du style de la déformation le long de la Zone Subandine de Bolivie.

Les deux coupes équilibrées présentées ont été construites en utilisant des techniques classiques ([7] à [9]). Les données utilisées proviennent de levés géologiques mais aussi d'une abondante information de sismique réflexion (commerciale et confidentielle) ainsi que des forages pétroliers. Dans la plaine du Beni et dans celle du Chaco, ainsi que dans les structures les plus orientales (synclinal de Madidi-Yuama et front nord-est de la Serranía de Toregua, Serranía de San Antonio, Serranía d'Aguaragüe) la construction des coupes est bien contrôlée par les données de sous-sol. Plus à l'Ouest, ce sont surtout des données de subsurface qui ont été utilisées.

I. GÉOMÉTRIE DES SÉRIES SÉDIMENTAIRES ANTÉOROGÉNIQUES. — Au Nord (entre 14 et 15° de latitude Sud), la série sédimentaire antéorogénique impliquée dans la déformation va, avec plusieurs discontinuités, de l'Ordovicien au Maastrichtien [4]. L'Ordovicien est composé de grès massifs succédant en transition à une série lutitique qui constitue le principal niveau de décollement. L'épaisseur de l'Ordovicien s'accroît du Nord-Est (600 m environ) vers le Sud-Ouest où il dépasse 4 000 m ([2], [4], [10]). Dans la partie nord-est de la Zone Subandine, l'Ordovicien est directement recouvert par une série essentiellement lutitique d'âge Silurien supérieur-Dévonien. Le Silurien complet (surtout lutitique) comme le Permo-Carbonifère (grès, diamictites, lutites et calcaires) n'existent qu'au sud-ouest du synclinal de Madidi-Yuama [4]. L'ensemble des terrains paléozoïques est recouvert en discordance par les grès mésozoïques de la Formation Beu qui en biseaute fortement les termes supérieurs. Ainsi, dans le Subandin nord-occidental la pile sédimentaire déformée est caractérisée d'une part par la présence de quatre niveaux de décollement continus (base des grès de l'Ordovicien, base du Dévonien discordant sur l'Ordovicien, base et sommet du Silurien lorsqu'il existe). La sismique réflexion montre que vers le Nord-Est la puissance de l'Ordovicien diminue, on observe également dans cette région un biseau-tage des séries siluriennes, carbonifères et permienues [4]. Le niveau de décollement basal situé à la base des grès de l'Ordovicien apparaît dans la région frontale de la Zone Subandine avec une pente régulière et forte (β de l'ordre de 5°). Au Sud-Ouest du synclinal de Madidi-Yuama, la pile sédimentaire est complète et nettement plus épaisse ce qui implique un approfondissement du niveau de décollement basal.

Au Sud, près de la frontière argentine, la série antéorogénique déformée est pratiquement continue depuis le Silurien jusqu'au Mésozoïque. Les lutites riches en matière organique du Silurien inférieur et moyen constituent le niveau de décollement basal. Au-dessus se superposent des grès du Silurien supérieur et Dévonien basal, des lutites emsiennes, puis des grès eiféliens et enfin les lutites de la Formation Los Monos d'âge givétien à frasien. Toute cette succession dévonienne est recouverte par plus de 2 000 m de grès d'âge paléozoïque supérieur et mésozoïque dans lesquels les niveaux pélitiques sont très rares. Ainsi la pile sédimentaire antéorogénique de la Zone Subandine méridionale est caractérisée par l'alternance de niveaux gréseux et de niveaux pélitiques siluro-dévonienues



Coupes équilibrées dans la Zone Subandine de Bolivie. Coupe A-B (localisation sur la carte) : 1, sédiments synorogéniques (Oligocène à Actuel); 2, Mésozoïque; 3, Permo-Carbonifère; 4, Dévonien; 5, Silurien; 6, Ordovicien. Coupe C-D (localisation sur la carte) : 1, sédiments synorogéniques (Oligocène à Actuel); 2, Mésozoïque; 3, Permo-Carbonifère; 4, Formation Los Monos (Givetien à Frasnien); 5, Silurien supérieur et Dévonien inférieur à moyen; 6, Silurien inférieur et moyen; 7, Ordovicien. C.F.P. : Chevauchement Frontal Principal.

Balanced cross-sections in the Subandean thrust fold belt of Bolivia. A-B Cross-section (located in the map): 1, synorogenic sediments (Oligocene to Present); 2, Mesozoic; 3, Permian and Carboniferous; 4, Devonian; 5, Silurian; 6, Ordovician. C-D Cross-section (located in the map): 1, synorogenic sediments (Oligocene to Present); 2, Mesozoic; 3, Permian and Carboniferous; 4, Los Monos Formation (Givetian to Frasnian); 5, Upper Silurian and lower to middle Devonian; 6, Lower to middle Silurian; 7, Ordovician. C.F.P.: Main Frontal Thrust.

continus et relativement profonds, ce qui est favorable au départ de décollements importants et au développement de duplex. Contrairement à la Zone Subandine nord-occidentale l'épaisseur des différents termes de la série varie peu et la pente des niveaux de décollement est faible (β de l'ordre de 2°) et régulière comme le montre la sismique réflexion qui permet de suivre ce plan de décollement jusqu'à la Serranía de San Antonio (fig.).

Les différences importantes mises en évidence dans la géométrie de la pile sédimentaire pré-orogénique entre les secteurs nord et sud de la Zone Subandine sont, pour une part, dues à une déformation en extension (d'orientation approximative NE-SW) affectant le Permien et diachroniquement scellée par des unités mésozoïques. La zone traversée par la coupe C-D (fig.) se situe dans une vaste région qui fut abaissée par ces mouvements et enregistra continûment la sédimentation. Au contraire, la zone traversée par la coupe A-B (fig.) est localisée dans une partie du bassin paléozoïque qui a globalement été basculée vers le Sud-Ouest; des failles normales, scellées par le Mésozoïque, sont observables sur certaines des sections de sismique réflexion réalisées dans la plaine du Beni.

II. STYLE STRUCTURAL. — Dans la Zone Subandine nord-occidentale (fig., coupe A-B) se distinguent deux domaines structurellement différents. Les Serranías de Beu et de Toregua au Sud-Ouest sont constituées d'épaisses écailles qui, une fois mises en place, furent redéformées par le développement postérieur d'un duplex d'Ordovicien. Au Nord-Est, cet ensemble a chevauché en surface les sédiments synorogéniques accumulés dans

le synclinal de Madidi-Yuama tandis qu'en profondeur s'est formé un prisme intracutané qui explique le brusque relèvement du flanc sud-ouest du synclinal de Madidi-Yuama apparaissant en sismique réflexion. Sur son flanc nord-est, ce synclinal est limité par la Serranía de Caquiahuaca qui constitue localement la frontière externe de la Zone Subandine; il s'agit d'une structure complexe constituée d'un duplex évoluant en prisme intracutané. Le raccourcissement dû au développement de cette structure profonde est compensé en surface par l'émergence d'un chevauchement progressivement déformé en synclinal et recoupé ensuite, à l'arrière, par un autre chevauchement. Ce type de structuration suggère un blocage dans la propagation de la déformation et les données de la sismique réflexion montrent qu'il n'y a pas de structures aveugles sous la plaine voisine du Beni. La construction de la coupe équilibrée permet de montrer que c'est probablement la diminution importante de l'épaisseur de l'Ordovicien ajouté à un accroissement de la pente du niveau de décollement basal qui explique ce blocage. Les Serranías de Beu et de Toregua sont également situées dans une zone où la pente du décollement basal est relativement forte.

Dans cette partie de la Zone Subandine le raccourcissement est important : 136 km soit 51% environ (valeur nettement supérieure à celle donnée par Martinez [2] mais comparables à celles de Roeder [8]). Cependant ce raccourcissement est « concentré » dans deux zones, au Nord-Est et au Sud-Ouest du synclinal du Madidi-Yuama. Sur la bordure sud-ouest c'est une série très épaisse qui est fortement raccourcie et déformée à partir d'un niveau de décollement fortement incliné. De telles conditions expliquent généralement le développement d'une pente topographique forte [12] et rendent compte de l'apparition de reliefs puissants (Serranía de Beu et de Toregua) qui dominent des accumulations très épaisses de sédiments synorogéniques (6 500 m) dans le synclinal du Madidi-Yuama.

Dans la Zone Subandine méridionale (*fig.*, coupe C-D), le style structural est très différent. On passe d'Ouest en Est de structures en écaillés dans lesquelles sont développés des anticlinaux de rampe à des anticlinaux à structure interne complexe (Serranía de Suaruro, de San Antonio, d'Aguaragüe) et enfin, sous la plaine du Chaco, à des anticlinaux de rampe associés à des failles aveugles. La propagation de la déformation en « piggy back sequence » peut être précisée par l'analyse de la mise en place successive des Serranías de San Antonio et d'Aguaragüe. La structuration a débuté à l'Ouest, par le développement, dans la Formation Los Monos, d'un duplex ayant évolué en prisme intracutané entraînant la formation d'un anticlinal symétrique (Serranía de San Antonio) transporté ensuite vers l'Est au toit d'une rampe formée à partir d'un décollement situé à la base du Silurien. La déformation s'est ensuite poursuivie par le fonctionnement simultané de deux niveaux de décollement (base de la Formation Los Monos et base du Dévonien inférieur); elle s'est amortie avec la formation d'un duplex dans le Dévonien inférieur et d'un pli formé par propagation de faille dans les niveaux sous-jacents (Serranía d'Aguaragüe). Comme dans le cas de la Serranía de San Antonio, cet anticlinal a ensuite été transporté vers l'Est au toit d'une rampe initialisée à la base du Silurien.

Dans la Zone Subandine méridionale le raccourcissement est inférieur à celui de la Zone Subandine nord-occidentale (90 km soit environ 38% pour la coupe C-D de la figure) mais il reste important. Dans le nord de l'Argentine des valeurs comparables ont été calculées (60 km et 33% à 22°30' de latitude [13]) et des structures semblables décrites [14].

III. CONCLUSIONS ET INTERPRÉTATION. — Alors qu'elles se sont développées contemporanément dans un contexte géodynamique semblable, la Zone Subandine nord-occidentale et la Zone Subandine méridionale de Bolivie présentent, outre des valeurs de raccourcissement fort inégales, des caractéristiques structurales très différentes. Ceci s'explique par une spécificité du comportement tectonique de la série sédimentaire impliquée dans la déformation liée à l'inclinaison du plan de décollement basal ainsi qu'au nombre et à la géométrie des décollements intermédiaires. Au Sud, la faible pente de celui-ci, la multiplicité et la régularité des niveaux de décollement possibles et la faible variabilité de l'épaisseur des niveaux compétents a facilité la propagation de la déformation vers l'Est et la prise en relais de chevauchements superficiels par des chevauchements plus profonds et plus externes lorsque les premiers se sont bloqués. Au Nord au contraire, l'existence de seulement deux principaux niveaux de décollement continus, la forte pente du décollement basal et les variations d'épaisseur des unités lithologiques affectées par la déformation impliquent que la propagation de celle-ci vers le Nord-Est se soit fréquemment bloquée. Ceci s'est traduit par d'importantes superpositions d'écaillés et le développement de chevauchements à l'arrière des chevauchements les plus externes (Serania de Caquiahuaca). Ces hétérogénéités stratigraphiques et paléostratigraphiques sont directement héritées de la configuration du bassin dans lequel se sont déposées les séries antéorogéniques et des déformations préandines qui l'ont affecté.

Note remise le 16 mars 1989, acceptée après révision le 5 octobre 1989.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Th. SEMPÈRE, G. HERAIL, J. OLLER et M. BONHOMME, *Geology*, 1989, soumis.
- [2] C. MARTINEZ, *Trav. et Doc. O.R.S.T.O.M.*, 109, 1980, 352 p.
- [3] T. E. JORDAN, R. W. ALLMENDIGER, J. A. BREWER, V. A. RAMOS et C. J. ANDO, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 94, 1983, p. 341-361.
- [4] J. OLLER, *Thèse*, U.M.S.A., La Paz, 1986, 120 p.
- [5] T. E. JORDAN et R. N. ALONSO, *A.A.P.G.*, 71, n° 1, 1987, p. 49-64.
- [6] Th. SEMPÈRE, G. HERAIL et J. OLLER, 5^e Cong. Geol. Chili, *Actas* 1, 1988, A127-A142.
- [7] C. D. A. DAHLSTROM, *Can. J. of Earth Sciences*, 6, 1969, p. 743-757.
- [8] J. R. HOSSACK, *Journal Géol. Soc. Lond.*, 135, 1979, p. 705-711.
- [9] J. SUPPE, *Am. J. of Science*, 283, p. 684-721.
- [10] R. SUAREZ, *Rev. Tecn. Y.P.F.B.*, 5, n° 2, 1976, p. 111-223.
- [11] D. ROEDER, *Tectonics*, 7, n° 1, 1988, p. 23-39.
- [12] D. DAVIS, J. SUPPE et F. A. DAHLEN, *J. of Geoph. Res.*, 8, 1983, p. 1153-1172.
- [13] R. W. ALLMENDIGER, V. A. RAMOS, T. E. JORDAN, M. PALMA et B. L. ISACKS, *Tectonics*, 2, n° 1, 1983, p. 1-16.
- [14] D. DELLAPE et R. PATUEL, X^e Congr. Geol. Argentine, *Actas* I, 1987, p. 169-172.

Convention Y.P.F.B.-O.R.S.T.O.M.;

P. B., T. S. : O.R.S.T.O.M., CC 4875, Santa Cruz, Bolivia;

G. H. : O.R.S.T.O.M., CP 8714, La Paz, Bolivia;

J. M. L., O. L., J. O., J. P. et D. T. : Gerencia de Exploración,
Y.P.F.B., CC 1659, Santa Cruz, Bolivia.