BD PB6/1 185N 1964-5873

1477

C. R. Acad. Sci. Paris, t. 317, Série II, p. 1477-1483, 1993

Tectonique/Tectonics

Modèle cinématique de la Zone Subandine du Coude de Santa Cruz (entre 16°S et 19°S, Bolivie) déduit de la construction de cartes équilibrées

Patrice BABY, Bertrand/Guillier, Jaime Oller et Genaro Montemurro

Résumé – Entre 16° S et 19° S, la Zone Subandine se caractérise par une évolution latérale rapide de la géométrie des structures chevauchantes et des directions de raccourcissement. A partir de cartes équilibrées, nous proposons un modèle cinématique de cette partie frontale des Andes. La carte équilibrée finale montre que la structuration du Coude de Santa Cruz implique le développement de décrochements, sénestres dans sa partie nord, et dextres dans sa partie sud. Ces mouvements transversaux, pratiquement nuls au front de la chaîne, s'intensifient progressivement vers la Cordillère où ils peuvent atteindre plusieurs dizaines de kilomètres.

Kinematic model of the Subandean Zone of the Santa Cruz Bend (between 16°S and 19°S, Bolivia) deduced from map balancing

Abstract – Between $16^{\circ}S$ and $19^{\circ}S$, the Subandean Zone is characterized by lateral variations in structural geometry and shortening directions. The construction of balanced maps leads to a suggested kinematic model of this frontal part of the chain. The final balanced map shows that the structuration of the Santa Cruz Bend involves strike-slip motions, sinistral in the north and dextral in the south. The intensity of these lateral displacements increases from the foreland to the Cordillera, where they can reach several tens of kilometres.

Abridged English Version – 1. INTRODUCTION. – Recent work (Isacks, 1988) has shown the importance of crustal shortening for the development of the Bolivian Orocline (*fig.* 1A). Between 16°S and 19°S (*fig.* 1B), the Subandean Zone and its foreland are characterized by the arched shape of the mountain range (Santa Cruz Bend), and show lateral variations in structural geometry and shortening directions (*figs.* 1B and 1C). The purpose of this paper is to present a study of these lateral variations, using a new method of map balancing.

2. GEOLOGIC FRAMEWORK. – In Bolivia, the Andean thrust tectonics started in Late Oligocene (Sempere *et al.*, 1990) and is still developing. The geometry of the external zone of the chain has been analyzed and its shortening quantified (Sheffels, 1988; Roeder, 1988; Baby *et al.*, 1989; Hérail *et al.*, 1990; Giese *et al.*, 1990; Baby *et al.*, 1992 and 1993). The central Subandean Zone – between 16° and 19° (*fig.* 1B) – is a foreland fold and thrust belt whose sole thrust is located in the bottom of a Palaeozoic sedimentary wedge (López, 1974; Sempere *et al.*, 1989; Montemurro, 1992). The northern border of this sedimentary wedge controlled the geometry of the thrust front (*fig.* 1C) and was responsible for the development of the transfer zone of the Boomerang-Chapare area (Baby *et al.*, 1993; Zubietta *et al.*, 1993) – where oil discoveries have recently been made.

3. METHODOLOGY. – In this study area (fig. 1B) we first redefined the principal faults. Then the structural map was divided into surface units with sides 5 to 80 km in length (fig. 2A). The frontal sides correspond to faults, whereas the lateral sides are oriented according to the shortening direction. The third stage consisted in constructing 8 balanced cross-sections (location in fig. 2A) using the classic methods (Woodward *et al.*, 1985). They permitted calculation of a value of shortening in each surface unit. Between the balanced cross-sections, these values were interpolated according to the lateral evolution of the structures. Values of

Note présentée par Jean DERCOURT.

0764-4450/93/03171477 \$ 2.00 © Académie des Sciences



大学生はないのなどのないであったというないで、「「「「「「「「「」」」」をいたいでは、「」」」をいたいでは、「」」」」をいたいでは、「」」」」をいたいで、「」」」」をいたいで、「」」」」」」」」」」」」

6.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire N° : 43496 Cote : B ex1. 50 to 60 km of shortening were calculated in the more internal surface units. The first map balancing consisted in moving each surface unit to the west by its amount of shortening and along its shortening trajectory.

4. FIRST MAP BALANCING AND INTERPRETATION. – The first balanced map (fig. 2B) poses geometric problems. At latitude 18°S, some surface units are superposed along a N75° axis. In this first balancing, every surface unit converged on this axis, whose N75° orientation corresponds to the direction of relative motion between the Nazca and South American plates since 12 Ma (DeMets *et al.*, 1990). Therefore, to obtain a correct balanced map, the surface units should be moved along a N75° orientation – the displacement trajectory of the entire Orocline. This displacement trajectory involves sinistral strike-slip motions north of the N75° axis, where the shortening direction is N40°, and dextral strike-slip motions in the south where the shortening direction is E-W (fig. 2B). A new stage of map balancing involved suppression of the superpositions of surface units introducing lateral displacements.

5. FINAL BALANCED MAP. – Figure 2C shows the final map after balancing of strike-slip motions. The wrench component is zero in the thrust front and increases progressively towards the Cordillera. Values of 35 km of sinistral strike-slip displacement, and of 20 km of dextral strike-slip displacement, were calculated in the most internal thrust sheet (*fig.* 2C). These wrench motions are accommodated by oblique ramps or lateral maps. The most important of these faults is parallel to the Boomerang oblique ramp and marks a large change in the values of strike-slip displacements (*fig.* 2C).

6. CONCLUSIONS. - The map balancing of the Subandean Zone of the Santa Cruz Bend consisted in constructing:

- a structural map divided into surface units characterized by values of shortening, calculated from balanced cross-sections (*fig.* 2A);

- an intermediate balanced map, where each surface unit was moved to the west by its amount of shortening and along its shortening trajectory (fig. 2B);

-a final balanced map, which suppressed superposition of surface unit, balancing strike-slip motions (*fig.* 2C).

This map balancing allows the suggestion of a kinematic model of the Santa Cruz Bend. It shows that its structuration implies strike-slip motions, sinistral in the north and dextral in the south. The intensity of these lateral displacements increases from the foreland to the Cordillera, where they can reach several tens of kilometres.

This new method of map balancing can be applied to other mountain fronts, where the construction of balanced cross-sections is possible. This technique permits us not only to constrain cross-sections and map interpretations, but also to propose palinspastic maps essential for the palaeogeographic study of the anteorogenic basins.

1478

にあたが、「「「「「「「」」」」、 いっている」、 いってい

^{1.} INTRODUCTION. – Dans les Andes Centrales (fig. 1A), on a montré récemment l'importance des raccourcissements crustaux dans le développement de l'Orocline bolivien (Isacks, 1988). Entre 16° S et 19° S (fig. 1B), la Zone Subandine et l'avant-pays bolivien présentent des problèmes structuraux directement liés au développement de cet orocline. En effet, le front de cette partie des Andes – dont la « virgation » est appelée traditionnellement Coude de Santa Cruz – se caractérise par une évolution latérale rapide de la géométrie des structures chevauchantes et des directions de raccourcissement (fig. 1B et 1C). Celles-ci,

Cinématique de la Zone Subandine du Coude de Santa Cruz

orientées E-W au Sud de Santa Cruz, deviennent progressivement SW-NE au Nord de Santa Cruz. Nous proposons ici, à partir d'une nouvelle méthode d'équilibrage, une étude qualitative et quantitative de ces variations latérales de direction de raccourcissement, ainsi qu'un modèle cinématique de la Zone Subandine du Coude de Santa Cruz.

2. CADRE STRUCTURAL. – En Bolivie, les mouvements horizontaux, dus à la tectonique de chevauchement andine, ont débuté à l'Oligocène supérieur (Sempere *et al.*, 1990) et se sont développés durant tout le Néogène. Ils ont déjà été analysés et quantifiés dans une grande partie de la zone externe de la chaîne (Sheffels, 1988; Roeder, 1988; Baby *et al.*, 1989; Hérail *et al.*, 1990; Giese *et al.*, 1990; Baby *et al.*, 1992 et 1993).

Dans la Zone Subandine centrale – entre 16° S et 19° S – et son avant-pays (*fig.* 1B), les structures appartiennent à un système de chevauchements dont le décollement basal se trouve à la base d'un prisme sédimentaire constitué de matériel paléozoïque (López, 1974; Sempere *et al.*, 1989). Ce prisme sédimentaire se biseaute vers le Nord (Montemurro, 1992). Les variations d'épaisseur et de lithologie dans ce prisme ont joué un rôle prédominant dans la structuration du front de cette partie de la chaîne, dont on a pu mettre en évidence en coupe au moins quatre types de géométrie (*fig.* 1C). L'obliquité de la bordure de ce biseau sédimentaire paléozoïque, par rapport à la direction générale de raccourcissement andin, est à l'origine de l'importante zone de transfert de raccourcissement du Boomerang-Chapare (Baby *et al.*, 1993; Zubietta *et al.*, 1993) – principale zone productrice d'hydrocarbures de Bolivie –.

3. MÉTHODOLOGIE. – La méthode développée dans le cadre de cette étude a pour objectif une analyse qualitative et quantitative des variations latérales des directions de raccourcissement. C'est une méthode d'équilibrage en carte élaborée à partir de la construction de coupes équilibrées.

Dans la région étudiée (fig. 1B), nous avons - dans un premier temps - redéfini les contacts anormaux principaux, c'est-à-dire les failles d'importance régionale. La carte structurale obtenue a été divisée en éléments de 5 à 80 km de côté (fig. 2A). Les côtés frontaux de ces éléments correspondent généralement à des chevauchements. Les côtés latéraux – quand ils ne sont pas représentés par des failles – sont systématiquement orientés perpendiculairement aux structures contenues dans les éléments, c'est-à-dire suivant la direction de raccourcissement. La troisième étape a consisté à construire manuellement huit coupes régionales équilibrées selon les techniques classiques (Woodward et al., 1985). Ces coupes sont réparties dans la région étudiée, leur localisation (fig. 2A) dépend en partie des données de surface, de sismique et de forage fournies par la compagnie pétrolière d'état YPFB. A partir de ces huit coupes équilibrées, nous avons ensuite calculé pour chaque élément de la carte structurale, une valeur de raccourcissement (fig. 2A). Entre chaque coupe, les valeurs de raccourcissement ont été interpolées en tenant compte de l'évolution latérale des grandes structures. Des valeurs de 50 à 60 km de raccoucissement ont été ainsi calculées pour les éléments les plus internes. L'ultime étape de cette première opération d'équilibrage en carte a consisté à déplacer vers l'Ouest ou le SW chaque élément de sa valeur de raccourcissement, et selon sa trajectoire de raccourcissement.

4. PREMIER DÉPLIAGE ET INTERPRÉTATION. – La première carte dépliée (fig. 2B), obtenue par la technique décrite précédemment, ne s'avère pas satisfaisante, car elle présente un problème d'incompatibilité géométriqué. En effet, au niveau de 18° de latitude sud, on note des superpositions d'éléments se faisant suivant un axe N75°. Durant ce premier dépliage, les éléments ont convergé vers cet axe dont l'orientation N75° correspond à celle de la



- Fig. 1. A. Schéma structural de l'Orocline Bolivien; B. Schéma structural de la région étudiée: la Zone Subandine du Coude de Santa Cruz; C. Variations latérales de la géométrie du front de chevauchements de la Zone Subandine du Coude de Santa Cruz.
- Fig. 1. A. Structural sketch of the Bolivian Orocline; B. Structural sketch of the study area: the Subandean Zone of the Santa Cruz Bend; C. Lateral variations in structural geometry of the thrust front in the Subandean Zone of the Santa Cruz Bend.

20.80.6.54

22.84



Cinématique de la Zone Subandine du Coude de Santa Cruz

Fig. 2. – A. Carte structurale de Zone Subandine du Coude de Santa Cruz, divisée en éléments caractérisés par des valeurs de raccourcissement calculées à partir de coupes équilibrées; B. Carte dépliée intermédiaire où chaque élément est déplacé vers l'Ouest, de sa valeur de raccourcissement et selon sa trajectoire de raccourcissement;
C. Carte dépliée finale éliminant les recouvrements après équilibrage des décrochements.

たたたれたというとも

Fig. 2. – A. Structural map of the Subandean Zone of the Santa Cruz Bend, divided into surface units characterized by values of shortening calculated from balanced cross-sections; B. Intermediate balanced map, where each surface unit was moved to the west, by its amount of shortening and along its shortening trajectory; C. Final balanced map suppressing superposition of surface units, after balancing of wrench faults.

convergence des plaques de Nazca et Amérique du Sud, depuis au moins 12 Ma (DeMets *et al.*, 1990). Pour obtenir une carte correcte – sans recouvrement – il aurait donc fallu déplacer chaque élément suivant la direction N75°, c'est-à-dire suivant la trajectoire de déplacement global de l'Orocline. Or, on sait qu'au Nord de la zone de recouvrement, les trajectoires de raccourcissement des éléments sont N40°, alors qu'au Sud de cette zone, elles sont E-W. Si la trajectoire réelle de déplacement de chaque élément est N75°, ces trajectoires de raccourcissement impliquent, au Nord (racc. N40°), une composante en décrochement sénestre, et au Sud (racc. E-W), une composante en décrochement dextre (*fig.* 2A). Une nouvelle étape de déplage est donc nécessaire. Elle va consister à annuler les recouvrements en équilibrant ces décrochements.

5. CARTE ÉQUILIBRÉE FINALE. – La figure 2C correspond à la carte dépliée finale. Les recouvrements ont disparu grâce au déplacement latéral de certains éléments. Ces déplacements latéraux ont été mesurés et ont permis d'attribuer à chaque élément une valeur de décrochement (fig. 2C). On remarque que la composante décrochante, pratiquement nulle sur les chevauchements les plus frontaux, s'intensifie progressivement sur les chevauchements les plus internes. Des valeurs maximales de 35 km de décrochement sénestre, et de 20 km de décrochement dextre, ont pu être calculées sur la bande chevauchante la plus interne. Ces mouvements décrochants s'accommodent par des rampes obliques ou latérales, soupçonnées lors de la construction de la carte structurale, et confirmées par l'équilibrage. La plus spectaculaire de ces failles transversales est une rampe oblique, parallèle à celle du Boomerang, et se trouvant juste au SW de celle-ci. Elle apparaît clairement sur la carte équilibrée définitive (fig. 2C), où elle sépare un domaine septentrional à faibles valeurs de décrochement d'un domaine méridional caractérisé par d'importants déplacements latéraux. D'après le dépliage, cette rampe oblique a absorbé par endroit jusqu'à 20 km de décrochement.

6. CONCLUSIONS. – L'équilibrage en carte des structures frontales du Coude de Santa Cruz a consisté à construire: 1) une carte structurale divisée en éléments caractérisés par des valeurs de raccourcissement, calculées à partir de l'élaboration de coupes équilibrées (fig. 2A); 2) une carte dépliée intermédiaire où chaque élément est déplacé vers l'Ouest, de sa valeur de raccourcissement et selon sa trajectoire de raccourcissement (fig. 2B); 3) une carte dépliée définitive qui élimine les recouvrements d'éléments, en équilibrant les décrochements (fig. 2C).

Grâce à cet équilibrage en carte, on a pu proposer un modèle cinématique de la partie la plus complexe de la Zone Subandine bolivienne. La carte équilibrée finale montre que la structuration du Coude de Santa Cruz implique le développement de décrochements, sénestres au Nord, et dextres au Sud. Ces mouvements transversaux, pratiquement nuls au front de la chaîne, s'intensifient progressivement vers la Cordillère, où ils peuvent atteindre plusieurs dizaines de kilomètres. Ils sont absorbés par des rampes obliques ou latérales.

Cette nouvelle technique de dépliage peut être appliquée à d'autres fronts de chaînes de montagne, quand la construction de coupes équilibrées est possible. Elle permet, non seulement, de contraindre et d'interpréter en coupe et en carte la géométrie des structures, mais aussi, de proposer des cartes palinspatiques indispensables pour étudier la paléogéographie des bassins antéorogéniques.

Ces recherches ont été menées dans le cadre d'une convention entre l'entreprise nationale Yacimientos Petroliferos Fiscales Bolivianos (YPFB) et l'ORSTOM.

Note remise le 29 juillet 1993, acceptée après révision le 29 septembre 1993.

1482

Cinématique de la Zone Subandine du Coude de Santa Cruz

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

P. BABY, G. HÉRAIL, J. M. LÓPEZ, O. LÓPEZ, J. OLLER, J. PAREJA, T. SEMPERE et D. TUFIÑO, Structure de la Zone Subandine de Bolivie : influence de la géométrie des séries sédimentaires antéorogéniques sur la propagation des chevauchements, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 309, série II, 1989, p. 1717-1722. P. BABY, G. HÉRAIL, R. SALINAS et T. SEMPERE, Geometric and kinematic evolution of passive roof duplexes deduced

P. BABY, G. HÉRAIL, R. SALINAS et T. SEMPERE, Geometric and kinematic evolution of passive roof duplexes deduced from cross section balancing: example from the foreland thrust sytem of the southern Bolivian Subandean Zone, *Tectonics*, 11, n° 3, 1992, p. 523-536.
 P. BABY, M. SPECHT, J. OLLER, G. MONTEMURRO, B. COLETTA et J. LETOUZEY, The Boomerang-Chapare transfer

P. BABY, M. SPECHT, J. OLLER, G. MONTEMURRO, B. COLETTA et J. LETOUZEY, The Boomerang-Chapare transfer zone (recent oil discovery trend in Bolivia): structural interpretation and experimental approach, *Publication spéciale Congrès EAPG*, Moscou, mai 1992, IFP édition, 1993 (sous presse).

C. DEMETS, R. G. GORDON, D. F. ARGUS et S. STEIN, Current plate motions, Geophys. J. Int., 101, 1990, p. 425-478.

P. GIESE, K. J. REUTTER, J. KLEY, M. SCHMITZ, G. SCHWARZ et P. WIGGER, Crustal Shortening and Crustal Thickening of the Southern Central Andes, Abstract Vol. Final Workshop Structure and Evolution of the Central Andes, In F. U. BERLIN ed., 1990, p. 82.

G. HÉRÂIL, P. BABY, M. LÓPEZ, J. OLLER, O. LÓPEZ, R. SALINAS, T. SEMPERE, G. BECCAR et H. TOLEDO, Structure and kinematic evolution of the Subandean thrust system of Bolivia, *Extended Abstracts Symp. Int. "Géodynamique Andine"*, ORSTOM éd., Paris, 1990, p. 179-182.

B. L. ISACKS, Uplift of the Central Andean Plateau and bending of the Bolivian Orocline, J. Geoph. Res., 93, n° B4, 1988, p. 3211-3231.

J. M. LOPEZ, Correlación estratigrafica longitudinal de la Faja Subandina entre las fronteras del Peru y Argentina, Rapport interne Yacimientos Petroliferos Fiscales Bolivianos, Rep 1906, Santa Cruz, 1974.

G. MONTEMURRO, Desarrollo de Facies Sedimentarias del Silurico-Devonico en el Sector Boomerang-Subandino Centro, Bolivia, Abstracts Conferencia Internacional Cuencas Fanerozoicas del Gondwana Sudoccidental, Santa Cruz, Bolivie, 1992, p. 22. D. ROEDER, Andean-age structure of Eastern Cordillera (Province of La Paz, Bolivia), Tectonics, 5, 1988, p. 23-39.

T. SEMPERE, G. HÉRAIL, J. OLLER et P. BABY, Geologic structure and tectonic history of the Bolivian orocline, Abstracts 28th Cong. Geol. Int., Washington, 3, 1989, p. 73.

T. SEMPERE, G. HÉRAIL, J. OLLER et M. G. BONHOMME, Late Oligocene-early Miocene major tectonic crisis and related basins in Bolivia, *Geology*, 18, 1990, p. 946-949.

. B. SHEFFELS, Structural constraints on crustal shortening in the Bolivian Andes, Ph. D. Thesis, Mass. Inst. of Technol., 1988, 170 p.

N. B. WOODWARD, S. E. BOYER et J. SUPPE, An outline of balanced cross sections, *TN*, *Stud. in Geol.*, *11*, *Univ. of Tenn.*, *Dep. of Geol. Sci.*, Knoxville, 1985, 170 p. D. ZUBIETA-ROSSETTI, P. HUYGHE, G. MASCLE, J. L. MUGNIER et P. BABY, Influence de l'héritage ante-dévonien au

D. ZUBIETA-ROSSETTI, P. HUYGHE, G. MASCLE, J. L. MUGNIER et P. BABY, Influence de l'héritage ante-dévonien au front de la chaîne andine (Partie centrale de Bolivie), C. R. Acad. Sci. Paris, 316, série II, 1993, p. 951-957.

Convention YPFB-ORSTOM, Casilla 1659, Santa Cruz, Bolivie.