

Évolution géodynamique de la transition entre l'Altiplano et la Cordillère Orientale au Nord d'Oruro (Bolivie). Implications sur le déroulement de l'orogénèse andine

Gérard HÉRAIL, Pierre SOLER, Michel BONHOMME et José Luis LIZECA

Résumé – Au Nord d'Oruro, le trait tectonique essentiel est le chevauchement (faille d'Eucaliptus) à vergence SW actif entre $\approx 19-15$ et 13 Ma et vraisemblablement entre ≈ 26 et 19 Ma, qui amène les terrains de la Cordillère Orientale sur ceux de l'Altiplano. Une surface d'érosion inclinée vers le SW est établie vers 13 Ma; puis règne, entre 13 et 11 Ma, un régime extensif à transtensif. Les failles miocènes ne jouent plus par la suite. Entre 10 et 15 Ma – période d'intense activité tectonique au niveau des chevauchements d'avant-pays – cette surface est basculée vers le SSW et disséquée.

Geodynamic evolution of the transition between the Altiplano and the Cordillera Oriental (Bolivia).

Implications for the development of the Andean orogenesis

Abstract – N of Oruro, the main tectonic feature is the SW-verging thrusting of the Cordillera Oriental over the Altiplano (Eucaliptus fault). This thrust was active between $\approx 19-15$ and 13 Ma, and conceivably between ≈ 26 and 19 Ma. At nearly 13 Ma, an erosional surface with a general SW-ward slope was built. Then, between 13 and 11 Ma, the area was characterized by an extensional to trans-tensional regime. The Miocene thrusts are no longer active. Between 10 and 5 Ma – a period of intense tectonic activity along the foreland thrusts – this surface was uplifted, tilted and dissected.

Abridged English Version – In the Andes of Bolivia (*fig. 1*) the orogenic structuration of the Subandean Zone, the Cordillera Oriental and the eastern Altiplano (Roeder, 1988; Baby *et al.*, 1989) began during the Late Oligocene (Sempere *et al.*, 1990 *b*). In the Altiplano and the western part of Cordillera Oriental the upper-crustal structure has been acquired through thrusts (Sempere *et al.*, 1988; Sheffels, 1990; Baby *et al.*, 1992) and strike-slip faults (Baby *et al.*, 1990; Hérial *et al.*, 1992), whose absolute chronology is constrained only in a few localities. In this area, short episodes of trans-tensional and/or extensional deformation have been reported (Lavenu, 1986) and erosional surfaces of regional extent (Walker, 1949) have been built at different epochs (Servant *et al.*, 1989; Sempere *et al.*, 1990 *a*). This alternating tectonic regime seems to be reflected by a succession of long-lived episodes of felsic peraluminous magmatism and short-lived episodes of mafic shoshonitic or alkaline volcanism (Soler *et al.*, 1992). Our local geological study (*fig. 2*) permits a better understanding of the deformation and topographical evolution at the transition between the Altiplano and the Cordillera Oriental. The studied area overlaps two of the major tectonostratigraphic domains of the Bolivian Andes (Sempere *et al.*, 1988), the Altiplano to the SW and the *Huarina Thrust and Fold Belt (ZPCH)* to the NE, separated by a SW-verging fault system the most important features of which are the Coniri fault and its southeastern prolongation, the Eucaliptus fault (*fig. 1* and 2). The morphology of the area is characterized by the presence of numerous remnants of surfaces of erosion which rise progressively towards the NE.

Along the Eucaliptus thrust (with a sinistral strike-slip component), Siluro-Devonian shales and sandstones overthrust Miocene conglomerates (Kholpana Fm, Lizeca *et al.*, 1990). This formation is at least 200 m thick (its base does not outcrop) and is made of two laterally equivalent units: (1) NW-proceeding fluvial conglomerates made predominantly of pebbles of Paleozoic

Note présentée par Jean DERCOURT.

0764-4450/93/03170515 \$ 2.00 © Académie des Sciences



Fonds Documentaire IRD
Cote: B x 22891 Ex: 1

sandstones and quartzites with secondary porphyritic dacites, outcrop in the plain between the Eucaliptus fault and the Laguna Soledad; (2) coarse conglomerates made of Siluro-Devonian pebbles and blocks and corresponding to SW-ward prograding alluvial fans, are restricted to the NE of the studied area along the Eucaliptus fault. Locally they overlie the Palaeozoic rocks towards the NE beyond the Eucaliptus faults. Within the Kholpana Fm, features of synsedimentary deformation are common, and progressive unconformities are observed. As a whole the Kholpana Fm has been folded. The folds and the microtectonic features (punched pebbles and centimetric thrusts) are compatible with a N 60°-trending compression.

The age of the Kholpana Fm can be bracketed precisely: (1) Their petrographical features and the directions of palaeostreams show that the dacitic pebbles of its fluvial part proceed from the Oruro dacitic domes (*fig. 2*) dated between 19.6 ± 1.7 and 15.1 ± 0.7 Ma (Redwood and McIntyre, 1989). At 150 km to the NW, the conglomeratic lowest part of the syntectonic Coniri Fm associated with the Coniri fault has been deposited between 29.2 ± 0.8 and 25.5 ± 1.7 Ma (Sempere *et al.*, 1990 *b*). In this area the sedimentation proceeded with clays and sands of fluvial flood plain which are overlain by a prograding conglomeratic unit. This unit, which is overthrust by the Palaeozoic, constitutes a lateral equivalent to the Kollukollu Fm dated between 18.4 ± 0.5 and 16.6 ± 0.4 Ma (Swanson *et al.*, 1987) and would be an equivalent to the Kholpana Fm. (2) At Cerro Pokhota (*fig. 2*) the Kholpana Fm and the Palaeozoic are overlain by lava flows that seal the Eucaliptus fault and are not cut again by the fault. These lavas of shoshonitic affinity provided K-Ar ages of 10.8 ± 0.4 and 11.5 ± 0.5 Ma (table). Thus, some 11 Ma, the Eucaliptus fault was no longer active and the deposition of the Kholpana Fm was nearly concluded. These lavas belong to a set of shoshonitic centres dated between 13.2 ± 0.7 and 11.4 ± 0.5 Ma (Redwood and McIntyre, 1989) which seem to be restricted to the ZPCH (*fig. 3*). The emplacement of these small volumes of dense and mafic lavas is inferred to have been favoured by an extensional or trans-tensional tectonic regime. During the period of activity of the Eucaliptus fault (19-15 to 13 Ma), the uplifted hanging wall was eroded and provided the sediments of the Kholpana Fm. At ≈ 13 Ma, a surface with a general SW-ward slope had been built behind the CANP (*fig. 1*) (Sempere *et al.*, 1990 *a*). The development of such a levelling-up must be associated with a slackening of the compressional deformation that may change into an extensional or trans-tensional regime as evidenced by the emplacement of the shoshonites upon this already slightly dissected surface between 13 and 11 Ma.

Then, this mid-Miocene surface was tilted towards the W and SSW, but the faults that were crosscut by the surface have not been active after its elaboration. Between Eucaliptus and Soledad (*fig. 2*), at nearly 400 m below the cerro Pokhota, the Kholpana Fm is overlain in strong unconformity by detrital sediments the base of which has been dated between 6.5 and 4.6 Ma (Redwood and McIntyre, 1989; Lavenu *et al.*, 1989). Therefore, between ≈ 11 and ≈ 6 Ma, the erosion has cut away at least 400 m at the foot of the Eucaliptus fault. This dissection and the tilting of the surface are linked to a speeding up of the uplift of the Cordillera Oriental with respect to the Altiplano between ≈ 10 and 6-5 Ma, a period of major compressional deformation characterized by a strong shortening along the thrusts at the Amazonian front of the Cordillera Oriental and in the Subandean Zone (Sempere *et al.*, 1988, 1990 *b*) and by the emplacement of a voluminous high-K peraluminous magmatism along the northeastern margin of the Altiplano and the Cordillera Oriental.

I. INTRODUCTION. – Dans la partie est de l'Altiplano, la Cordillère Orientale et la zone subandine actuelles de Bolivie (*fig. 1*), la structuration orogénique a débuté à l'Oligocène

supérieur (Sempere *et al.*, 1990 *b*). La structuration de la croûte supérieure s'y est faite par le développement de chevauchements (Roeder, 1988; Baby *et al.*, 1989, 1992; Sempere *et al.*, 1988; Sheffels, 1990) et à des décrochements (Baby *et al.*, 1990; Héraïl *et al.*, 1992), dont la chronologie n'est établie que localement. Sur l'Altiplano et le versant occidental de la Cordillère Orientale des épisodes brefs de déformation en transtension ou en extension sont observés (Lavenu, 1986) et des surfaces d'érosion d'ampleur régionale ont pu s'établir à différentes époques (Walker, 1949; Servant *et al.*, 1989; Sempere *et al.*, 1990 *a*). Ces alternances dans le régime de déformation semblent se refléter dans la succession de longues périodes de mise en place de magmas acides, souvent peralumineux, et de brefs épisodes d'émission de laves shoshonitiques et/ou alcalines (Soler *et al.*, 1992). Une révision de la géologie et de la stratigraphie dans la zone de Soledad (*fig. 2*) et de nouvelles données radiochronologiques et géochimiques sur le magmatisme de la zone permettent de mieux comprendre la cinétique de la déformation et la genèse du relief au contact entre l'Altiplano et la Cordillère Orientale.

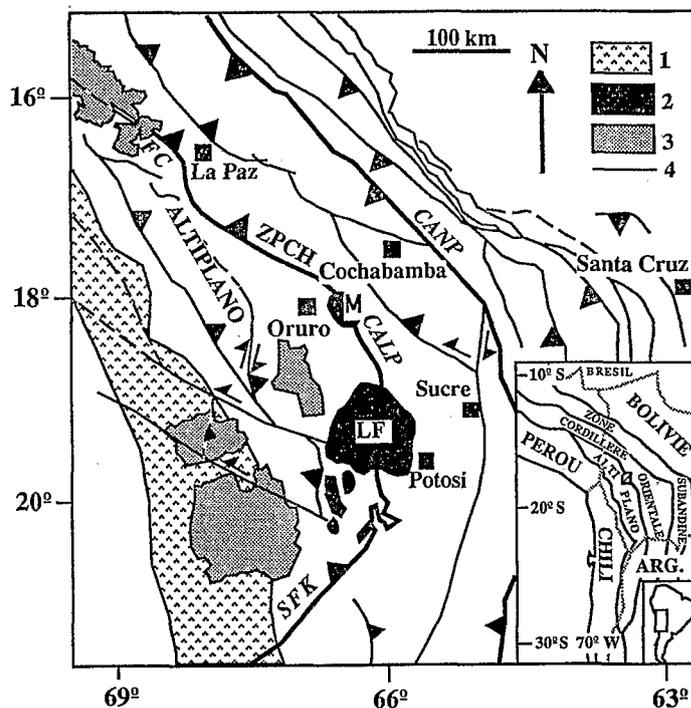


Fig. 1. – Schéma structural des Andes de Bolivie (d'après Sempere *et al.*, 1988, 1990 *b*). 1, arc calco-alcalin du Miocène supérieur; 2, principales roches magmatiques acides d'arrière-arc du Miocène supérieur-Pliocène inférieur (M, Morococala; LF, Los Frailes); 3, Lacs et salars; 4, Structures majeures (CANP, chevauchement Andin Principal; CALP, Chevauchement Altiplanique Principal; FC, faille de Coniri; FE, faille d'Eucaliptus; SFK, système de la faille de Khenayani; ZPCH, Zone des Plis et Chevauchements de Huarina).

Fig. 1. – Structural sketch map of Bolivian Andes (after Sempere *et al.*, 1988, 1990 *b*). 1, Late Miocene calc-alkaline arc; 2, Main back-arc, late Miocene-early Pliocene magmatic felsic rocks (M, Morococala; LF, Los Frailes); 3, Lakes and salars; 4, Main structures (CANP, Main Andean Thrust; CALP, Main Altiplano Thrust; FC, Coniri fault; FE, Eucaliptus fault; SFK, Khenayani fault system; ZPCH, Huarina Thrust and Fold Belt).

II. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE. – Les Andes de Bolivie sont composées de différents domaines tectonostratigraphiques séparés les uns des autres par des accidents majeurs (Sempere *et al.*, 1988). La région étudiée (*fig. 1* et *2*) est à cheval sur deux de ces

domaines, l'Altiplano au SW et la « Zone des Plis et Chevauchements de Huarina » (ZPCH) au NE. L'Altiplano est caractérisé par la puissance des séries cénozoïques détritiques continentales. La ZPCH est constituée par une série de plis et lames chevauchantes, à vergence SW, englobant des terrains paléozoïques; l'Altiplano et la ZPCH sont séparés par la faille de Coniri qui se prolonge vers le SE par la faille d'Eucaliptus; cette zone de failles à vergence SW se suit sur près de 400 km. Les reliefs conservés dans la ZPCH sont les plus élevés de la région (4 650 m) et appartiennent, du point de vue géomorphologique, à la Cordillère Orientale. De nombreux témoins de surfaces d'érosion y sont préservés; ils s'élèvent progressivement vers le NE. Au SW, sur la bordure de l'Altiplano, on observe des restes de surfaces d'érosion développées sur le Paléozoïque et les sédiments tertiaires qu'il chevauche. L'Altiplano, au sens géomorphologique, correspond à des plaines remblayées par une épaisse couverture quaternaire. La limite entre ces plaines et la Cordillère Orientale est décalée vers le NE par rapport à la limite entre les deux domaines tectonostratigraphiques (Altiplano et ZPCH).

III. LA FAILLE D'EUCALIPTUS ET LES SÉDIMENTS CÉNOZOÏQUES ASSOCIÉS. — La faille d'Eucaliptus est une faille inverse à composante décrochante sénestre. Elle amène les grès et pélites siluriens et dévoniens de la ZPCH sur les conglomérats qui affleurent depuis les environs de Soledad jusqu'au Cerro Laurani (*fig. 2*). Ceux-ci, considérés antérieurement comme d'origine morainique et quaternaires (Valenzuela, 1972) ou comme fluviale et pliocènes (Lavenu, 1986) sont, en fait, syntectoniques et miocènes (Fm Kholpana) (Lizeca *et al.*, 1990). La partie exposée de la Fm Kholpana (sa base et son substratum n'affleurent pas) atteint quelques centaines de mètres d'épaisseur et comprend deux ensembles (coupe A-B, *fig. 2*) passant latéralement de l'un à l'autre : (1) Au SW, il s'agit de conglomérats fluviaux constitués de galets bien émoussés, disposés en larges chenaux et organisés en séquences granodécroissantes. 70 à 75 % des galets sont des grès et de quartzites paléozoïques, le reste correspond essentiellement à des fragments de porphyres dacitiques. Le centile diminue vers le NW et les paléocélements mesurés indiquent des apports depuis le SE; (2) Au NE le long de la faille d'Eucaliptus, il s'agit de conglomérats à blocs et galets peu émoussés, correspondant à des cônes de déjection. Ils sont organisés en séquences granocroissantes avec, dans les termes proximaux, des blocs pouvant atteindre 1 m de diamètre. Le centile diminue rapidement vers le SW et les paléocélements mesurés indiquent des apports depuis le NE. Pratiquement tous les clastes procèdent de l'érosion des terrains paléozoïques situés au NE de la faille d'Eucaliptus. Quelques fragments de grès mésozoïques et de calcaires de la Fm El Molino (Maastrichtien) ont été trouvés dans les termes les plus élevés de cet ensemble. Localement (*fig. 2*) ces conglomérats s'avancent vers le NE au-delà du tracé de la faille d'Eucaliptus et sont discordants sur le Paléozoïque. On y observe fréquemment des figures de déformation synsédimentaire et des discordances progressives. La Fm Kholpana présente en outre une déformation plicative avec des pendages atteignant 70°. Dans la partie nord de la région étudiée, les axes de plis sont orientés N 140°; vers le SE ils tendent à s'orienter N-S. Les nombreuses figures de poinçonnement de galets et des fractures inverses à rejet centimétrique sont compatibles avec un raccourcissement orienté \approx N 60°.

IV. LE MAGMATISME ET L'ÂGE DE LA DÉFORMATION. — L'âge de la Fm Kholpana peut être défini de façon assez précise. Les galets de faciès fluviaux présentent une similitude pétrographique frappante avec les dacites des dômes de la région d'Oruro (*fig. 2*) mis en place et minéralisés entre $19,6 \pm 1,7$ Ma et $15,1 \pm 0,7$ Ma (Redwood et McIntyre, 1989). Les directions de paléocourants (SE \rightarrow NW) indiqueraient que ces galets proviendraient

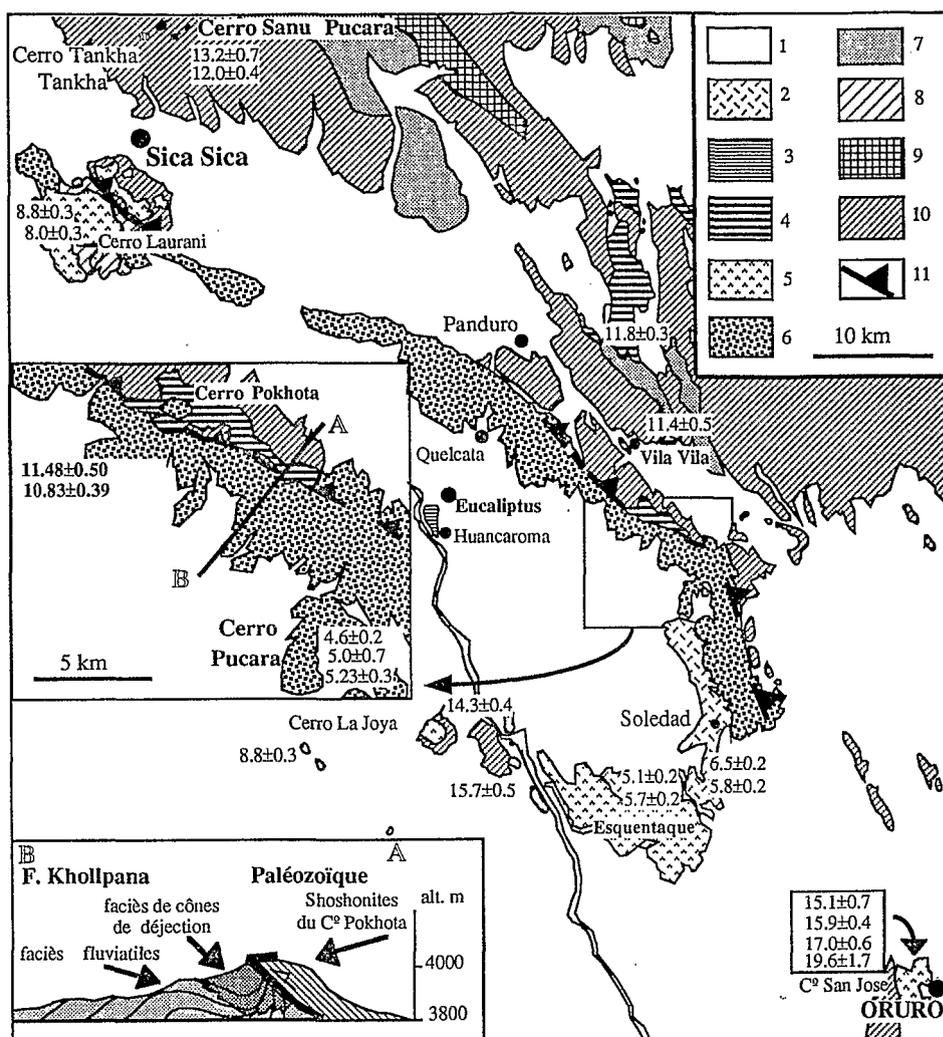


Fig. 2. – Carte du secteur étudié : 1, Quaternaire; 2, tufs mio-pliocènes; 3, conglomérats pliocènes de Huancaroma; 4, shoshonites miocènes; 5, dacites miocènes; 6, Fm Kholpana; 7, sédiments cénozoïques indifférenciés; 8, sédiments cénozoïques du Cerro Laurani; 9, sédiments crétacés; 10, Paléozoïque (Siluro-Dévonien); 11, faille d'Eucaliptus.

Fig. 2. – Geologic sketch map of the studied area: 1, Quaternary; 2, Mio-Pliocene tuffs; 3, Pliocene conglomerates of Huancaroma; 4, Miocene shoshonites; 5, Miocene dacites; 6, Kholpana Fm; 7, undifferentiated Cenozoic; 8, Cenozoic and Mesozoic sediments of the Cerro Laurani; 9, Cretaceous sediments; 10, Paleozoic (Siluro-Devonian); 11, Eucaliptus fault.

de la région d'Oruro. Ceci suggère que la partie exposée de la Fm Kholpana se serait déposée après 19-15 Ma. A 150 km au NW, les sédiments syntectoniques associés à la faille Coniri (Fm Coniri) débutent par des conglomérats dont le dépôt est daté entre $29,2 \pm 0,8$ et $25,5 \pm 1,7$ Ma (Sempere *et al.*, 1990 *b*). La sédimentation se poursuit par le dépôt de sédiments de plaine d'inondation fluviale, eux-mêmes recouverts par une série conglomératique progradante. Cette dernière présente des discordances progressives synsédimentaires, est chevauchée par le Paléozoïque et passe latéralement (en aval) à des sédiments fins (Fm Kollukollu) dont la base est datée entre $18,4 \pm 0,5$ et $16,6 \pm 0,4$ Ma (Swanson *et al.*, 1987). Elle serait donc un équivalent latéral de la Fm Kholpana, mais

dans la région étudiée, les équivalents latéraux de la partie inférieure de la Fm Coniri n'affleurent pas.

Au Cerro Pokhota (*fig. 2*), des coulées de laves dont la puissance cumulée atteint 75 m affleurant sur une étendue d'environ 6 km de long et 1 km de large reposent au SW sur la Fm Kholpana et au NE sur le Paléozoïque. Elles scellent la faille d'Eucaliptus sans être recoupées par celle-ci. Il s'agit de laves basiques d'affinité shoshonitique (Soler *et al.*, en préparation). Deux âges K-Ar sur roche totale ont été obtenus sur ces laves : $10,83 \pm 0,39$ et $11,48 \pm 0,50$ Ma (tableau 1). Il y a ≈ 11 Ma la faille d'Eucaliptus n'était donc plus active et le dépôt de la Fm Kholpana était pratiquement terminé. D'autres coulées shoshonitiques d'âge Miocène moyen ($13,2 \pm 0,7$ à $11,4 \pm 0,5$ Ma) ont été décrites au sein de la ZPCH (Redwood et McIntyre, 1989). Ce volcanisme semble définir une province shoshonitique d'âge Miocène moyen d'environ 100 km de long et 20 km de large. Il est vraisemblable que ces très faibles volumes de laves basiques denses se soient mis en place dans un contexte extensif ou transtensif (Soler *et al.*, 1992) qui aurait donc prévalu, dans la région, entre 13 et 11 Ma. Ce bref épisode de volcanisme shoshonitique vient s'intercaler entre deux épisodes de magmatisme acide, dacitique essentiellement, datés à $\approx 20-14$ et $\approx 10-5$ Ma.

TABLEAU

Données K-Ar sur roches totales (shoshonites du Cerro Pokhota).

Whole-rock K-Ar data (cerro Pokhota shoshonites).

Ech.	K ₂ O (%)	⁴⁰ Ar rad (%)	⁴⁰ Ar rad (nl/g)	⁴⁰ K/ ³⁶ Ar ($\times 1000$)	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	Age (Ma) ($\pm 1 \sigma$)
AM2	2,86	49,8	1,003	464,4	588,8	$10,83 \pm 0,39$
AM3	2,78	41,13	1,033	308,6	502,1	$11,48 \pm 0,50$

Les analyses isotopiques ont été réalisées à Grenoble par les techniques décrites par Lavenu *et al.*, 1992. Les analyses de K₂O ont été réalisées par absorption atomique au Laboratoire des Formations Superficielles du Centre ORSTOM de Bondy.

V. LA SURFACE D'ÉROSION DU MIOCÈNE MOYEN ET L'ÉVOLUTION DURANT LE MIOCÈNE SUPÉRIEUR. — Entre 19 et 15 Ma, la faille d'Eucaliptus était active mais son mouvement a cessé avant 13 Ma. Durant cette période les reliefs créés au NE par la remontée du panneau chevauchant étaient érodés et fournissaient les sédiments détritiques de la Fm Kholpana. Vers 13 Ma, l'érosion avait façonné une surface topographique continue (surface Chayanta), inclinée vers le SW, qui s'étendait au moins depuis du Cerro Pokhota jusqu'aux affleurements créacés, situés à 15 km au NE pour les plus proches d'entre eux. Sur cette topographie peu accidentée, se mettent en place entre 13 et 11 Ma les coulées de shoshonites. Vers 11 Ma, cette surface était déjà légèrement disséquée puisque les shoshonites de Vila Vila, topographiquement les plus basses, ont été émises à environ 180 m en contrebas du Cerro Pokhota. Si l'érosion débute dès l'apparition des reliefs générés par l'activité de la faille d'Eucaliptus, le développement d'aplanissement ne peut aller de pair qu'avec un ralentissement de la déformation compressive pouvant passer à un contexte extensif ou transtensif comme l'atteste la mise en place des shoshonites. Cette surface n'existe qu'à l'arrière du Chevauchement Andin Principal (CANP) (*fig. 1*; (Sempere *et al.*, 1990 a), ce qui contrôle son extension selon le « revers » des reliefs de la Cordillère Orientale.

La surface du Miocène moyen a été ensuite basculée vers l'Ouest et le SSW, mais les failles qu'elle recoupe n'ont pas rejoué. Entre Eucaliptus et Soledad (*fig. 2*), la Fm Kholpana est recouverte en forte discordance d'érosion par les sédiments détritiques du remplissage de la plaine de Soledad (située à 400 m en contrebas du Cerro Pokhota), dans la partie inférieure desquels sont interstratifiés des tufs volcaniques datés entre $6,5 \pm 0,2$ et $4,6 \pm 0,3$ Ma (Redwood et McIntyre, 1989; Lavenu *et al.*, 1989). Entre ≈ 11 et ≈ 6 Ma, l'érosion a donc localement évidé le relief sur plus de 400 m au mur de la faille d'Eucaliptus. Cette érosion est également active au toit de cette faille, isolant la Fm Kholpana de ses zones d'apport. Cette dissection et le basculement de la surface Chayanta sont liés à une accélération du soulèvement de la Cordillère Orientale par rapport à l'Altiplano entre ≈ 10 et 6-5 Ma, époque majeure de déformation qui correspond à d'importants raccourcissements au niveau des chevauchements sur le front amazonien de la Cordillère Orientale et en zone subandine (Sempere *et al.*, 1988, 1990 *a* et *b*) et à la mise en place sur la marge NE de l'Altiplano et dans la Cordillère Orientale d'un volumineux magmatisme acide peralumineux riche en potasse, connu dans la région étudiée (Laurani, Esquentaque, tufs de la plaine de Soledad) et dont les manifestations les plus spectaculaires sont les plateaux ignimbritiques de Morococala et de Los Frailes (*fig. 1*).

VI. CONCLUSION. – L'étude des relations entre tectonique, soulèvement, érosion, sédimentation et manifestations magmatiques dans la région de Caracollo permet de montrer qu'à la transition entre l'Altiplano et la Cordillère Orientale de Bolivie : (1) la déformation compressive s'exprime essentiellement par le jeu d'un chevauchement majeur à vergence SW (faille d'Eucaliptus), actif entre 19-16 Ma et 13 Ma et vraisemblablement entre ≈ 26 et 19 Ma, qui amène les terrains de la « ZPCH » sur les terrains de l'Altiplano; (2) les reliefs créés au NE sont érodés et vers 13 Ma on observe une surface continue (surface Chayanta), inclinée vers le SW et allongée selon le revers des reliefs de la Cordillère Orientale. Cette surface, dont le développement est considéré comme allant de pair avec un ralentissement de la déformation compressive, résulterait d'aplanissements pour l'essentiel postérieurs à 19 Ma et antérieurs à 13 Ma; (3) la déformation compressive cède ensuite le pas à un contexte extensif à transtensif qui, entre 13 et 11 Ma, favorise l'éruption sur cette surface, déjà partiellement entaillée, de roches volcaniques d'affinité shoshonitique; (4) cette surface est ensuite basculée vers le SSW les failles miocènes ne jouant plus. Entre ≈ 11 et ≈ 6 Ma l'érosion évide localement le relief sur plus de 400 m ce qui est lié à une accélération du soulèvement de la Cordillère Orientale par rapport à l'Altiplano pendant une période de raccourcissement majeur au niveau des chevauchements au front amazonien de la chaîne et en zone subandine.

La présente Note est une contribution de l'Unité de Recherche « Géodynamique et Concentrations Minérales » de l'ORSTOM et s'inscrit dans le cadre de conventions liant l'ORSTOM à l'Universidad Mayor de San Andrés (La Paz) et à Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos (Santa Cruz).

Note remise le 1^{er} mars 1993, acceptée après révision le 16 juin 1993.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- P. BABY, G. HÉRAIL, J. M. LOPEZ, O. LOPEZ, J. OLLER, J. PAREJA, T. SEMPERE et D. TUFÍÑO, 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. 1717-172.
- P. BABY, T. SEMPERE, J. OLLER et G. HÉRAIL, Evidence for major shortening on the eastern edge of the Bolivian Altiplano: the Calazaya nappe, *Tectonophysics*, 205, 1992, p. 155-169.
- P. BABY, T. SEMPERE, J. OLLER, L. BARRIOS, G. HÉRAIL et R. MAROCCO, Un bassin en compression d'âge oligo-miocène dans le sud de l'Altiplano Bolivien, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 311, série II, 1990, p. 341-347.

- G. HÉRAIL, J. OLLER, P. BABY, T. SEMPÈRE, J. BLANCO, M. G. BONHOMME et P. SOLER, Las cuencas de Tupiza, Nazareno, Estarca: sucesión de tectónica de transcurrencia y de cabalgamiento en la estructuración de los Andes de Bolivia, *Bol. Soc. Geol. Boliviana*, 27, 1992, p. 81-83.
- A. LAVENU, Étude néotectonique de l'Altiplano et de la Cordillère Orientale de Bolivie, *Thèse de Doctorat d'État-ès-Sciences*, Université Paris Sud, Orsay, 1986, 434 p. (Consultable Soc. Géol. France).
- A. LAVENU, M. G. BONHOMME, N. VATIN-PÉRIGNON et P. de PACHTÈRE, Neogene magmatism in the Bolivian Andes between 16° and 18° S. Stratigraphy and K-Ar geochronology, *J. South Amer. Earth Sci.*, 2, 1, 1989, p. 35-47.
- A. LAVENU, C. NOBLET, M. G. BONHOMME, A. EGUEZ, F. DUGAS et G. VIVIER, New K/Ar age dates of Neogene and Quaternary volcanic rocks from the Ecuadorian Andes: implications for the relationships between sedimentation, volcanism, and tectonics, *J. South Amer. Earth Sci.*, 5, 1, 1992, p. 1-19.
- J. L. LIZECA, G. VIZCARRA, H. CHAVEZ et G. HÉRAIL, Dinámica del relleno de la cuenca altiplánica en la región de Caracollo-Soledad (Departamento de Oruro) e implicaciones sobre la formación de yacimientos de oro aluvial, *Revista Técnica de YPF*, Santa-Cruz (Bolivie), 11, 3, 1990, p. 303-308.
- S. REDWOOD et R. Mc INTYRE, K-Ar dating of Miocene magmatism and related epithermal mineralization of the northeastern Altiplano of Bolivia, *Economic Geology*, 84, 1989, p. 618-630.
- D. ROEDER, Andean-age structure of Eastern Cordillera (Province of La Paz, Bolivia), *Tectonics*, 7, 1, 1988, p. 23-29.
- T. SEMPÈRE, G. HÉRAIL et J. OLLER, Los aspectos estructurales del oroclino boliviano, *Actas Sto Cong. Geol. Chileno*, 1, 1988, p. A127-A142.
- T. SEMPÈRE, E. VARGAS et G. HÉRAIL, Las superficies de erosión "Chayanta" y "San Juan del Oro" en el segmento N-S de la Cordillera Oriental: geometría y edad aproximada, *Resúmenes del IX Congreso de Geología de Bolivia*, Cochabamba, 1990 a, p. 15.
- T. SEMPÈRE, G. HÉRAIL, J. OLLER et M. G. BONHOMME, Late Oligocene-early Miocene major tectonic crisis and related basins in Bolivia, *Geology*, 18, 1990 b, p. 946-949.
- M. SERVANT, T. SEMPÈRE, J. ARGOLLO, M. BERNAT, G. FÉRAUD et P. LO BELLO, Morphogenèse et soulèvement de la Cordillère Orientale des Andes de Bolivie au Cénozoïque, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 309, série II, 1989, p. 417-422.
- B. SHEFFELS, Lower bound on the amount of crustal shortening in the central Bolivian Andes, *Geology*, 18, 1990, p. 812-815.
- P. SOLER, G. CARLIER, M. FORNARI et G. HÉRAIL, An alternative model for the origin and the tectonic significance of the Neogene and Quaternary shoshonitic volcanism of the Andes, *EOS Trans. AGU*, 73, (14), Spring Meeting Suppl., 1992, p. 341-342.
- K. E. SWANSON, D. C. NOBLE, E. H. MCKEE, T. SEMPÈRE, C. MARTINEZ et M. CIRBIAN, Major revisions in the age of rock units and tectonic events in the northern Altiplano basin of Bolivia, *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, 19, 1987, p. 456.
- R. VALENZUELA, Estudio geológico de la región Caracollo-Alcomarca-Vila Vila-Pongo, *Thèse Ing.*, UMSA, La Paz, 1972, 58 p.
- E. WALKER, Andean uplift and erosion surfaces near Uncia, Bolivia, *Am. J. Sci.*, 241, 1949, p. 646-663.

G. H. : ORSTOM, UR1H, 213, rue Lafayette, 75480 Paris Cedex 10, France,
et Mission ORSTOM, Casilla n° 53390, Correo Central, Santiago 1, Chili;

P. S. : ORSTOM, UR1H, 213, rue Lafayette, 75480 Paris Cedex 10, France,
CNRS, URA n° 736, Université Paris-VI et VII, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France;

M. G. B. : URA, CNRS n° 69, Université Joseph-Fourier, rue Maurice-Gignoux, 38031 Grenoble Cedex, France;

J. L. L. : GEOBOL, Casilla n° 2729, La Paz, Bolivie.

COMPTES RENDUS DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

SCIENCES DE LA TERRE EARTH SCIENCES

Les notes de ce fascicule correspondent aux articles relevant des Sciences de la Terre
parues dans les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*
Tome 317 Série II N° 4 - 19 août 1993 (p. 463-562)

Gravimétrie

Réponse isostatique de la plate-forme arabique au chargement ophiolitique en Oman. Patrick RAVAUT, Abdulla Al YAHYA'Y, Roger BAYER et Alain LESQUER 463

Géophysique marine

Étude des constituants macromoléculaires des matières en suspension du delta du Rhône par pyrolyse au point de Curie : implications dans les processus de formation du néphéloïde benthique. Sophie PEULVÉ, Marie-Alexandrine SICRE, Anne LORRE, Alain SALIOT, Jan W. DE LEEUW et Marianne BAAS 471

Hydrologie

Le traçage biologique, une nouvelle approche du milieu souterrain aquatique. Eric BRUYÈRE, Marie-José TURQUIN et Jean-Louis REYGREBELLET 479

Géochimie et géochronologie isotopiques

Datations radiochimiques des récifs coralliens de la rive occidentale du Nord de la Mer Rouge, premières implications stratigraphiques et tectoniques. Jean-Louis REYSS, Abdelmajid CHOUKRI, Jean-Claude PLAZIAT et Bruce H. PURSER 487

Stratigraphie

Biogéographie des ammonites et variations du niveau marin : analyse quantitative des peuplements du Kimméridgien ouest-européen. Pierre HANTZPERGUE 493

Nouvelles données sur la zonation par ammonites du Valanginien supérieur de l'hypostratotype d'Angles (Alpes-de-Haute-Provence) et sur ses corrélations. François ATROPS et Stéphane REBOULET 499

Géologie marine

Le Plateau des Mascareignes : évolution d'une plate-forme néritique en milieu océanique. Yannis BASSIAS, Micheline DENIS-CLOCCHIATTI et Lucien LECLAIRE 507

Géologie

Évolution géodynamique de la transition entre l'Altiplano et la Cordillère Orientale au Nord d'Oruro (Bolivie). Implications sur le déroulement de l'orogénèse andine. Gérard HÉRAL, Pierre SOLER, Michel BONHOMME et José Luis LIZECA 515

Facteurs faciologiques et tectoniques contrôlant la karstification sur la marge nord aquitaine (France) : exemple de l'Oligocène Nord aquitain. André KLINGEBIEL, Jacques GAYET et Richard MAIRE 523

Contraintes chronologiques par analyses $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur le fonctionnement de la zone de décrochement ductile de l'Ikoye-Ikobe (Gabon) au cours du Protérozoïque. Michel CORSINI, Gilles RUFFET et Gilbert FERAUD 531

Géographie physique

Le Mouhoun, un ancien affluent du Niger : exemple de capture en milieu tropical aride. Serge GULLOBEZ 537

Préhistoire

Nouvelles données sur la Chronologie du Néolithique au Sahara malien. Dominique COMMELIN, Michel RAIMBAULT et Jean-François SALIÈGE 543

Découverte d'un gisement Aurignacien dans la province du Hatay au sud-est de la Turquie. Angela MINZON-DÉROCHE et Michel FONTUGNE 551

Paléontologie

Le site paléontologique et archéologique de Doukkala II (Maroc, Pléistocène moyen et supérieur) : premier jalon en Afrique du Nord d'un comportement humain assimilable à un « charognage contrôlé et actif ». Patrick MICHEL et Luc WENGLER 557

COMPTES RENDUS DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES



SCIENCES DE LA TERRE EARTH SCIENCES

TOME 317 — SÉRIE II — N° 4 — 19 AOÛT 1993

Extraits de la Série II
MÉCANIQUE - PHYSIQUE - CHIMIE
SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

gauthier-villars

PB 61N