

Sédimentation et structure du bassin de Tipuani-Mapiri : un témoin de l'évolution du front amazonien des Andes du nord de la Bolivie

Michel FORNARI, Gérard HÉRAIL, Giovanni VISCARA, Gérard LAUBACHER et Jaime ARGOLLO

Résumé — Dans le bassin de Tipuani-Mapiri la Formation Cangalli (Miocène moyen à supérieur) fossilise partiellement une paléotopographie de dissection fluviale inscrite sur le versant amazonien de la Cordillère Orientale. Les sédiments se sont accumulés consécutivement au soulèvement de la Serrania de Carura (relief le plus oriental de la cordillère) en relation avec le fonctionnement du chevauchement séparant cette cordillère du domaine subandin. Les reliefs formant la Cordillère Orientale sont donc apparus successivement depuis l'ouest vers l'est.

Sedimentation and structure of the Tipuani-Mapiri basin: a testimony to the Amazonian Front evolution in the Andes of Bolivia

Abstract — In the Tipuani-Mapiri basin the Cangalli Formation (middle to upper Miocene) partially fossilizes a fluvial erosion paleotopography located in the Amazonian slope of the Cordillera Oriental. The sediments were deposited following the uplift of the Serrania de Carura. This morpho-tectonic evolution is related to the thrusting activity between the Andean Cordillera and the Sub-Andean belt. Thus, the Cordillera Oriental reliefs appear successively from W to E.

Abridged English version — In Northern Bolivia, the NE margin of the Cordillera Oriental (Fig. 1) overrides the sub-Andean zone ([1], [2]). Field studies in the Tipuani-Mapiri basin provide data on the structural evolution of this part of the Central Andes during the Neogene times.

I. THE TIPUANI-MAPIRI BASIN AND THE CANGALLI FORMATION. — The Tipuani-Mapiri basin ([4], [5]) is more than 100 km long from NW to SE (Fig. 1). It extends northwestward into the Apolo basin and southeastward into the Coroico region. On the whole, this basin is more than 200 km long, while it is only 30 to 10 km wide. It is bounded by the Serrania de Carura on the NE and by the high ridge of the Eastern Cordillera on the SW, where the infill penetrates the Andean valleys (Challana, Tipuani, Mapiri river).

The Cangalli Formation ([4] to [8]) fills up the basin (Fig. 2) and is locally covered by alluvium of Quaternary terraces. It partly fossilizes an old, extremely steep topography (Fig. 3) entrenched in a bedrock of Ordovician schists; the filling does not exceed 500 m in thickness. The Cangalli Fm. has been attributed to Pliocene or Pleistocene ([4], [7]). However, on-going radiochronological dating of an interbedded cinerite layer (K/Ar age on biotite of 9 M.a.), allows us to place this formation in the Upper Miocene at least.

The Cangalli Fm. is mainly conglomeratic ([4], [6], [7], [9]) but shows various facies ([5], [8]). Upstream from the canyons of the ancient rivers flowing from the cordillera (Figs. 2 and 3) it consists of torrential conglomerates; downstream they are replaced by fluvial conglomerates, the facies change occurring in less than 2 km. The petrographic composition of the filling changes from bottom to top; it reveals that when the Cangalli Fm. was being deposited, all the now outcropping rocks in the high cordillera were already affected by erosion. Palustrine materials, several tens of metres in thickness, occur locally along the paleovalleys on both sides of

Note présentée par Jean AUBOUIN.

the drainage axes. The lateral deposition of these palustrine materials results from dam effects produced by the rapid accumulation of fluvial conglomerates in the central part of the valleys.

Farther downstream, where paleovalleys become wider, facies change to clays and silts of flood plain and to gravels and sand deposited by local tributaries draining rather small areas (a few km²).

The old rivers heading in the southeastern reliefs (Mariapo, Tipuani, Challana) connected with a main eastward flowing drainage axis which was parallel to the current Mapiri river (Fig. 2). In this zone, near the reliefs limiting the basin in the NE, no lacustrine facies are found anywhere downstream from the fluvial facies, which indicates that this basin was never endoreic.

II. STRUCTURE AND DEFORMATION OF THE CANGALLI FORMATION. — Field observations made in the surface and in the underground workings of the gold mines [5] show that the gradient of the ancient talwegs is steeper than that of the present ones. Upstream from Unutuluni (Fig. 2 and 4), the level of the Tipuani river is situated about 300 m lower than that of the paleo-Tipuani where the Cangalli Fm. deposited. Farther downstream, near the Tipuani village, the paleo-Tipuani is 170 m below the level of the present river. The gradient of the Tipuani river amounts to about 0.3% in this part of the valley, whereas that of the paleo-Tipuani amounts currently to about 4%. Similar differences in the gradients occur along the Challana river. Uplifts are revealed by the difference between the slope of the paleotalwegs and that of the present talwegs.

In the Tipuani-Mapiri basin, compressional deformation affects the Cangalli Fm ([5], [8], [10]). Folds trending at about N120°E are locally observed and beds are tilted; dip is generally to the SW and seldom exceeds 30°. Reverse faults cut the Cangalli Fm and its bedrock on the NE side of the basin (Figs. 2 and 3). Striated faults measured in some places (located in Figure 2) indicate a roughly NE-SW trending compression (Fig. 5, diag. 1, 2, 3). The same results were observed in the sub-Andean zone [11].

Normal faulting was observed in the old terraces in one site (Fig. 5, diag. 4). Although it does not appear controlled by landslide effects, it seems too isolated to define its regional meaning.

III. CONCLUSION AND INTERPRETATION. — The deposition of the Cangalli Fm occurred after a stage of intensive dissection (and therefore of uplift) in the western part of the Eastern Cordillera. The formation of the basin and the trapping of sediments result from the uplift of the Serrania de Carura. This phenomenon is interpreted as an inhomogeneous uplift of the cordillera. This uplift displaced from west to east (toward the Amazonian foreland) during the Miocene, and the Serrania de Carura was the last uplifted block. Its reliefs, which break the continuity between the mountainous topography and the Amazonian plain, result from the thrusting of the High Andes over the sub-Andean zone. Under these conditions the Tipuani-Mapiri basin can be described as a piggy back basin.

Dans le nord de la Bolivie (fig. 1) la Cordillère Orientale comporte à l'est des plus hauts reliefs une zone déprimée — le bassin de Tipuani-Mapiri — située à l'arrière d'une zone de relief étroite et allongée — la Serrania de Carura —. Cet ensemble est séparé du domaine subandin par un chevauchement important amenant le Paléozoïque du domaine andin sur les unités subandines ([1] à [3]). L'analyse du bassin de Tipuani-Mapiri nous renseigne sur l'évolution structurale et orogénique néogène de cette partie des Andes centrales.

I. LE BASSIN DE TIPUANI-MAPIRI ET LA FORMATION CANGALLI. — Le bassin de Tipuani-Mapiri ([4], [5]) s'étend sur plus de 100 km de long depuis le NW vers le SE (*fig. 1*). Au nord-ouest il se prolonge par la cuvette d'Apolo; au sud-est il se poursuit jusque dans la région de Coroico. Au total ce bassin se développe sur plus de 200 km de long alors que sa largeur varie de 30 à 10 km seulement. Au nord-est il est limité par la Serrania de Carura alors qu'au sud-ouest les séries sédimentaires contenues dans le bassin se raccordent aux reliefs majeurs de la Cordillère Orientale et pénètrent dans les vallées andines (rio Challana, Tipuani, Mapiri).

Le remplissage du bassin (*fig. 2*) est constitué par la Formation Cangalli ([4] à [8]), localement recouverte par les alluvions des terrasses quaternaires. Elle est discordante sur un substratum de schistes ordoviciens et fossilise partiellement une paléotopographie très différenciée ce qui rend compte d'importantes variations d'épaisseur (*fig. 3*). La puissance du remplissage n'excède pas 500 m. La Formation Cangalli a été attribuée soit au Pliocène soit au Pléistocène ([4], [7]); cependant, la découverte dans le remplissage détritique d'un niveau de cinérite pour lequel les données géochronologiques sont en cours d'acquisition (âge K/Ar sur biotite de 9 M.a.) nous permet de proposer un âge miocène moyen à supérieur pour cette formation.

La Formation Cangalli est essentiellement conglomératique ([4], [6], [7], [9]) mais il existe de nombreuses différences de faciès ([5], [8]). A l'amont des gorges des paléovallées issues de la Cordillère (*fig. 2* et 3) le sédiment est constitué par des conglomérats fluvio-torrentiels. Vers l'aval ces matériaux passent à des conglomérats fluviatiles mieux calibrés, le passage d'un faciès à l'autre se faisant en moins de 2 km. La composition pétrographique du remplissage évolue du bas vers le haut de la série et nous indique qu'au moment du dépôt de la Formation Cangalli toutes les roches actuellement à l'affleurement dans la Cordillère Orientale étaient déjà exposées à l'érosion.

En bordure des paléovallées, de part et d'autre des axes de drainage, apparaissent localement des sédiments palustres épais de plusieurs dizaines de mètres (à Carhuarani par exemple). Ils sont composés de limons et d'argiles laminées avec localement de minces bancs de lignite. Vers le centre des paléovallées ces dépôts s'interstratifient avec les conglomérats alors que, vers le bord des paléovallées, ils s'interstratifient avec des colluvions et des dépôts de versant. La formation de ces zones palustres et lacustres en bordure de vallées encaissées est due à l'obturation de dépressions latérales par l'accumulation rapide de conglomérats fluviatiles dans l'axe des vallées. Plus en aval, là où les paléovallées s'élargissent, apparaissent soit des argiles et limons à paléosols de plaine d'inondation, soit des graviers et des sables déposés par des ruisseaux affluents drainant des bassins versants peu étendus (quelques kilomètres carrés).

Les cours d'eaux venant des reliefs situés au S.E. (Mariapo, Tipuani, Challana) rejoignaient un collecteur principal parallèle à l'actuel Mapiri (*fig. 2*) et coulant, dans la région étudiée, vers l'est. Dans cette zone, la granulométrie du sédiment diminue vers le haut de la série et les conglomérats y sont organisés en chenaux de plus en plus larges et de plus en plus sinueux. Toutefois, il n'y a nulle part dans le bassin de Tipuani-Mapiri de faciès lacustres conservés à l'aval des faciès fluviatiles contre les reliefs limitant le bassin au NE, ce qui signifie que ce bassin ne fut jamais endoréique.

II. STRUCTURE ET DÉFORMATION DE LA FORMATION CANGALLI. — Des observations de terrain en surface et dans les galeries des mines aurifères [5] montrent que la pente des paléotalwegs est, dans leur position actuelle, plus forte que celle des talwegs actuels. Le lit du rio Tipuani (*fig. 2* et 4) est situé, à l'amont d'Unutuluni, près de 300 m plus bas

que celui du paléo Tipuani dans lequel se déposa la Formation Cangalli. Plus en aval, près du village de Tipuani, le paléocours est situé 170 m en dessous du lit actuel de la rivière. Ainsi pour ce tronçon de la vallée la pente du lit du rio Tipuani est de 0,3% environ alors que celle du Paléotipuani est, dans sa position actuelle d'environ 4%. Le long du Challana (fig. 2) il y a des différences de pente analogues. La différence entre la pente des paléotalwegs et celle des talwegs actuels atteste l'existence de mouvements orogéniques.

Dans le bassin de Tipuani-Mapiri, la Formation Cangalli est déformée en compression ([5], [8], [10]). Localement on observe des plis ouverts orientés aux environs de N120-N130°E ainsi qu'un basculement des couches, généralement vers le SW; les pendages ne dépassent qu'exceptionnellement une trentaine de degrés. Sur la frange NE du bassin on observe des failles inverses affectant la Formation Cangalli et son substratum (fig. 2 et 3). Associés à ces structures, des couloirs à déformation importante des galets (stries sur les faces, poinçonnement, microfracturation) affectent les conglomérats de la Formation Cangalli. Le traitement des mesures collectées sur quelques stations (localisées fig. 2) indique une compression subhorizontale orientée aux environs de N050°E (fig. 5) semblable à ce qui a été observé dans le Néogène de la zone subandine [11]. En revanche les

EXPLICATIONS DES FIGURES

Fig. 1. — Carte de localisation. 1, bassin de Tipuani-Mapiri (a: Formation Cangalli, b: principaux restes de surfaces d'érosion associés au remplissage du bassin); 2, bassins plio-quaternaires du piémont sudoccidental de la cordillère; 3, plaine amazonienne; 4, zone subandine; 5, Cordillère Orientale; 6, principaux chevauchements du front andin (en encadré la région représentée en figure 2).

Fig. 1. — *Geographical location.* 1, Tipuani-Mapiri basin (a: Cangalli Formation, b: erosional surface associated to the filling of the basin); 2, Plio-Quaternary basins of the south-occidental piedmont; 3, Amazonian plain; 6, main thrusts of the Andean Front (the heavy rectangle indicates the location of the map of Figure 2).

Fig. 2. — La Formation Cangalli dans la partie centrale du bassin de Tipuani-Mapiri. 1, conglomérats à galets et blocs; 2, graviers et sables; 3, limons et argiles; 4, principales failles inverses et plis. En blanc, substratum ordovicien.

Fig. 2. — *The Cangalli Formation in the central part of the Tipuani-Mapiri basin.* 1, boulders and cobbles conglomerates; 2, gravels and sands; 3, silts and clays of floodplains; 4, main reverse faults and folds. White, Ordovician bedrock.

Fig. 3. — Coupes a-b, c-d et e-f. Même légende que 2 (localisation en 2).

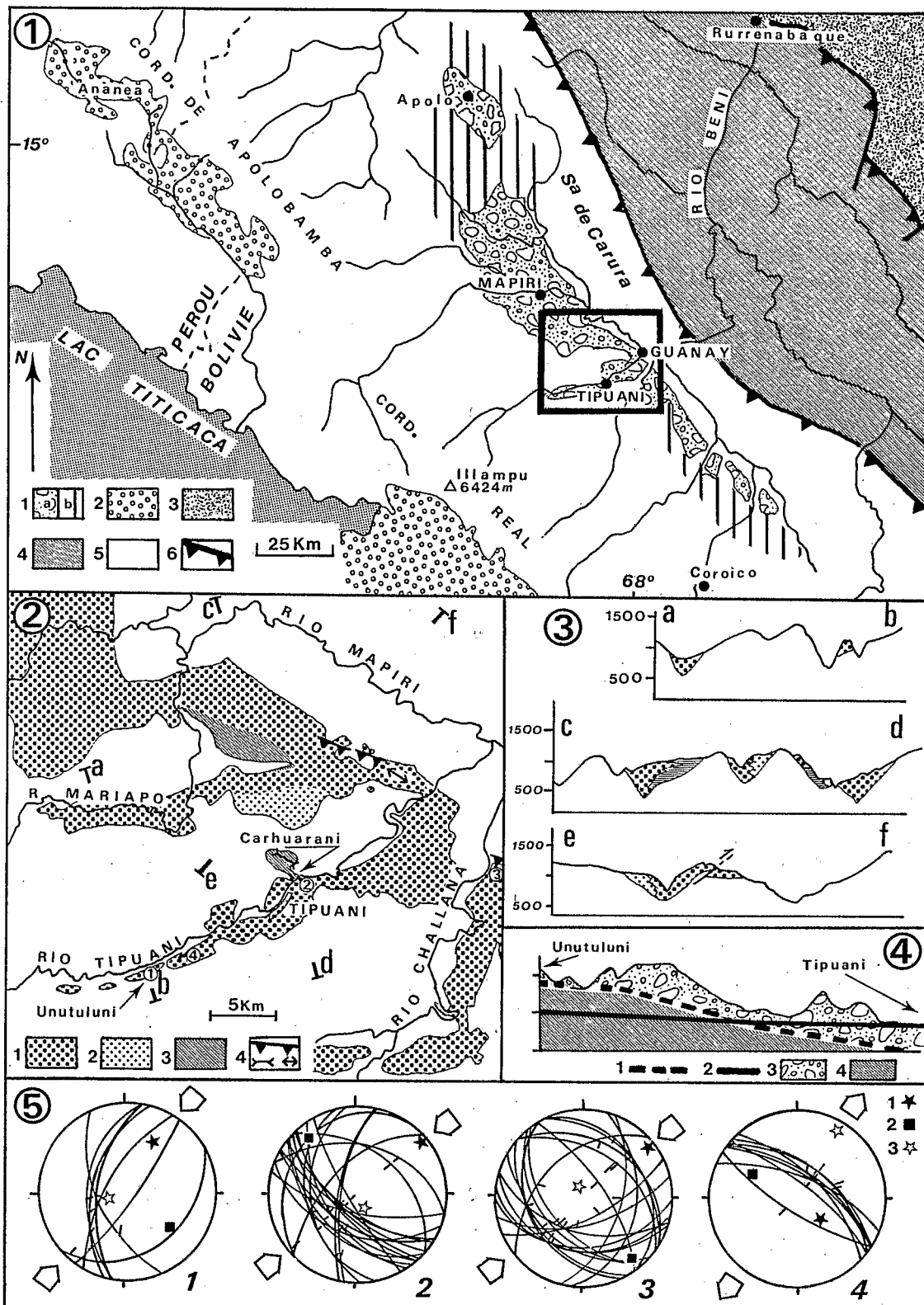
Fig. 3. — *Sections a-b, c-d, e-f (location and legend: see 2).*

Fig. 4. — Pente comparée du talweg actuel et du paléotalweg du rio Tipuani. 1, paléotalweg; 2, talweg actuel; 3, Formation Cangalli; 4, Ordovicien.

Fig. 4. — *Grades of the rio Tipuani present talweg and of the paleotalweg.* 1, paleotalweg; 2, present talweg; 3, Cangalli Formation; 4, Ordovician.

Fig. 5. — Analyse de la microfracturation affectant les conglomérats de la Formation Cangalli (diagrammes 1, 2 et 3) et les alluvions de la haute terrasse (diagramme 4). Localisation des stations de mesure sur la figure 2; projection stéréographique des plans de fracturation et orientation de la strie associée; position du tenseur calculé: 1, contrainte σ_1 ; 2, contrainte σ_2 ; 3, contrainte σ_3 ; projection de Schmidt, hémisphère inférieur.

Fig. 5. — *Microfracturation and stress analysis in the Cangalli conglomerates (stereo nets 1, 2 and 3) and in the Quaternary high terrace (stereo net 4).* Location of station: see figure 2; Cyclographic projection of the striated fault planes with their slip vector. Orientation of the calculated tensor: 1, major principal stress axis σ_1 ; 2, intermediate principal stress axis σ_2 ; 3, minor principal stress axis σ_3 ; Schmidt projection in the lower hemisphere.



hautes terrasses quaternaires ne semblent pas déformées; une seule station présente des failles correspondant une distension orientée NE-SW (fig. 5). Bien que pour cette station on puisse écarter un effet de glissement local par gravité, cette tectonique en distension constitue actuellement une observation trop ponctuelle pour être interprétée dans le cadre régional.

III. CONCLUSION ET INTERPRÉTATION. — L'accumulation de la Formation Cangalli dans le bassin de Tipuani est postérieure à une phase de dissection importante, et donc de soulèvement, de la partie ouest de la Cordillère Orientale. La formation du bassin et le piégeage des sédiments sont dus à l'apparition postérieure des reliefs de la Serrania de Carura. Ceci montre que le soulèvement de la Cordillère Orientale n'est pas homogène; il s'est fait successivement depuis l'ouest vers l'est au cours du Miocène, la Serrania de Carura étant le dernier compartiment soulevé. Sa mise en place, qui provoque la rupture de la continuité relief montagneux-plaine amazonienne et l'isolement du bassin Tipuani-Mapiri, doit être associée au fonctionnement (Miocène moyen à supérieur) du chevauchement qui amène le domaine andin sur le subandin. Dans ce contexte le bassin de Tipuani-Mapiri est assimilable à un « piggy back basin » isolé à l'arrière d'une lame chevauchante.

Note reçue le 25 mai 1987, acceptée le 23 septembre 1987.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] F. AHLFELD, *Rev. Mus. La Plata*, 3, n° 19, 1946, p. 5-370.
- [2] Y.P.F.B., et Geobol, Mapa geológico de Bolivia, éch. 1/1 000 000, 1978, La Paz.
- [3] C. MARTINEZ, *Trav. et Doc. O.R.S.T.O.M.*, 109, 1980, 352 p.
- [4] H. G. FREYDANK, *The gold placer deposits at the foot of the Eastern Cordillera of Bolivia*, ined, 1965, 52 p.
- [5] G. HERAIL, J. ARGOLLO, M. FORNARI, G. LAUBACHER et G. VISCARRA, *Kryos*, 1, n° 2, 1986, p. 9-15.
- [6] M. FROCHOT, *An. des Mines*, série 9, XIX, 1901, p. 149-185.
- [7] Mission Alemana, *Rev. Min. Bamin*, 93, 1977, p. 1-64.
- [8] G. VISCARRA, *Thèse*, U.M.S.A., La Paz, 1986, 68 p. + 5 cartes hors-texte.
- [9] W. C. STOLL, *Economic Geology*, 56, 1961, p. 1258-1264.
- [10] A. LAVENU, *Thèse*, Paris-Sud, 1986, 434 p.
- [11] G. HERAIL, M. FORNARI, G. VISCARRA, G. LAUBACHER et J. ARGOLLO, *X^e Congr. Geol. Argentine, Actas II*, 1987, p. 93-96.

G. H. : O.R.S.T.O.M., C.P. 8714, La Paz, Bolivie;

M. F. et G. L. : O.R.S.T.O.M., 213, rue La Fayette, 75010 Paris;

J. A. et G. V. : Instituto de Geodynamica, C.P. 12198, La Paz, Bolivie;

J. A., M. F., G. H., G. L. et G. V. : Convention O.R.S.T.O.M.-U.M.S.A.