

Morphogenèse et soulèvement de la Cordillère Orientale des Andes de Bolivie au Cénozoïque

Michel SERVANT, Thierry SEMPERE, Jaime ARGOLLO, Michel BERNAT, Gilbert FERAUD et Philippe LO BELLO

Résumé — L'élévation de la Cordillère Orientale de Bolivie a succédé à un aplanissement généralisé antérieur au Miocène moyen. Le soulèvement a été interrompu par deux périodes de relative stabilité, marquées par de grands glacis d'ablation (Miocène supérieur, Quaternaire moyen à récent). Des datations par les méthodes K/Ar et $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ appuient la chronologie géomorphologique proposée.

Cenozoic landscape and uplift evolution of the Eastern Cordillera of the Bolivian Andes

Abstract — The uplift of Eastern Cordillera of the Bolivian Andes followed a generalized planation period, older than Middle Miocene times. The uplift was interrupted by two periods of relative stability, marked by wide pediments (Upper Miocene, Middle to Upper Quaternary). The geomorphological chronology, presented here, is supported by K/Ar and $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ age data.

Abridged English Version — The Central Andes comprise two high Cordilleras separated by the bassins of the Altiplano (Fig. 1). In the western part, the Pacific plate is subducted below the South American contents while, in the east, the mountains overthrust the Brazilian shield ([1], [2]). An isostatic effect, related to the thickening of the crust, induced the uplift of the Central Andes during the Cenozoic [2].

THE MAIN STAGES OF LANDSCAPE EVOLUTION. — 1. The Eastern Cordillera of Bolivia (16°-23° Lat. S) shows a near horizontal and undated planation surface (*Chayanta surface*) with altitudes ranging between 4,300 and 4,700 m (Fig. 2). In the south, this surface represents the highest part of the Cordillera. In the north, it is dominated by reliefs including numerous granitic batholiths ([3], [4]) culminating at more than 6,000 m. 2. Before the Middle Miocene, the *Chayanta surface* was dissected up to a maximum depth of 1,800 m. 3. During the Middle Miocene, only in the southern part of the Cordillera, the valleys were filled by fluvio-lacustrine deposits ([4], [5]). 4. These deposits, moderately folded, were eroded during a pediment stage (*San Juan del Oro surface*). In the Marococala area, a volcanic formation overlying this surface was dated from 8.2 to 5.5 M.a. (Table) and allows assigning an age of Upper Miocene to the *San Juan del Oro surface*. 5. From the Late Miocene to the Late Pliocene, a vertical erosion (*canion stage*), with a maximum amplitude of 1,500 m, occurred in the whole Eastern Cordillera. The corresponding deposits, with granitic pebbles, are dated from 5.5 M.a. (Table) to 1.8 M.a. [12] in the region of La Paz. 6. Quaternary fluvio-lacustrine formations, dated from 1.9 M.a. (Table) to less than 0.8 M.a. [6], were deposited only in some parts of the river profiles. They are sometimes folded in the lower part. 7. During the Middle to Upper Quaternary, rivers from the eastern side of the Cordillera partially captured the drainage area of the Altiplano. During the same period, vertical erosion was episodically interrupted by pediments stages in the widest parts of the valleys. These pediments are especially well developed along the western border of the Cordillera.

Note présentée par Georges MILLOT.

INTERPRETATIONS. — Geomorphological data show large variations in the Cenozoic uplift of the Eastern Cordillera of Bolivia: 1. The vertical erosion observed in the whole Cordillera before the Middle Miocene, and between the Late Miocene and the Late Pliocene, was caused by an intense uplift. 2. Fluvio-lacustrine formations, dated from the Middle Miocene and the Low to Middle Quaternary, were deposited against topographic thresholds linked to active faults. They indicate intense tectonic activity after the main stages of uplift. 3. A low uplift rate allowed the development of the wide pediments of the *San Juan del Oro surface* during the Upper Miocene. Another stage of moderate uplift is responsible for the capture of the Altiplano basin by the eastern drainage area during the Middle and Upper Quaternary.

As shown by the near horizontal shape of the old planation surface, the total uplift during the Cenozoic was quite similar in the whole Eastern Cordillera. However, the northern reliefs with granitic batholiths were uplifted 1,500-2,000 m above the other parts of the Cordillera during the Late Miocene and the Pliocene.

CONCLUSIONS. — 1. Two intense uplift stages are identified in the Cenozoic of the Eastern Cordillera of Bolivia. 2. A marked regional tectonic activity is observed during the Middle Miocene and the Low to Middle Quaternary after the main uplift stages. 3. Two periods of relative stability are dated in the Upper Miocene and the Middle to Upper Quaternary. 4. A comparison with geomorphological data from Perou [1] and Chili [8] indicates a similar general evolution on the Pacific slopes of the Western Cordillera.

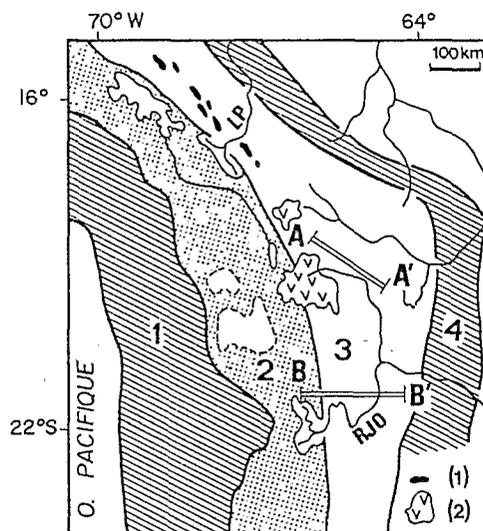
I. INTRODUCTION. — Les Andes Centrales comprennent, entre 16 et 23° de latitude sud, deux hautes Cordillères, la Cordillère Occidentale et la Cordillère Orientale, séparées par les bassins de l'Altiplano (fig. 1). L'élévation de la chaîne montagneuse au Cénozoïque est liée, par un effet d'isostasie, à un fort épaissement de la croûte terrestre [1]. Le soulèvement ayant contrôlé l'érosion du relief, il est possible d'en reconstituer les principales étapes par des approches géomorphologiques. Naturellement, le climat a joué aussi un rôle important. On en voit, par exemple, les effets dans le façonnement de grands glaciers d'ablation durant les périodes à tendance plus aride. Mais les énormes creusements fluviaux et les dénivelés considérables entre les surfaces d'aplanissement montrent le rôle majeur des soulèvements tectoniques. Les très grands creusements ont été provoqués par d'intenses surrections. Le façonnement des grands glaciers a été favorisé par une relative stabilité.

Les observations faites sur le versant pacifique ont montré que l'élévation de la Cordillère Occidentale a été discontinue durant le Cénozoïque [1]. L'interprétation géodynamique nécessite qu'on en connaisse aussi les principales étapes dans la Cordillère Orientale. Il faut en effet tenir compte que les contextes géodynamiques sont différents dans les deux Cordillères : à l'Ouest, la plaque pacifique s'enfonce sous le continent sud-américain; à l'Est, les Andes chevauchent le bouclier brésilien [3].

II. LA HAUTE SURFACE CHAYANTA ET LES HAUTS MASSIFS DE LA CORDILLÈRE ORIENTALE DE BOLIVIE. — La Cordillère Orientale des Andes de Bolivie montre de nombreux témoins, situés entre 4 300 et 4 700 m d'altitude, d'une ancienne surface d'aplanissement, la *surface Chayanta*, antérieure au soulèvement des reliefs. Cette ancienne surface d'aplanissement tranche les dépôts plissés du Paléozoïque et du Mésozoïque. Nous verrons plus loin qu'elle est antérieure à des remblaiements fluvio-lacustres datés du Miocène moyen. Il

Fig. 1. — Localisation géographique. 1, Cordillère Occidentale; 2, Altiplano; 3, Cordillère Orientale; 4, Zone subandine; (1) Granites. (2) Ignimbrites. LP: Rio La Paz. SJO: Rio San Juan del Oro. A-A', B-B': profils géomorphologiques.

Fig. 1. — Geographical location. 1, Western Cordillera; 2, Altiplano; 3, Eastern Cordillera; 4, Subandine Zone: (1) Granites. (2) Ignimbrites. L.P.: Rio La Paz. S.J.O.: Rio San Juan del Oro. A-A': B-B': geomorphological cross-profiles.



s'agit donc d'une surface attribuable au Paléogène ou à la base du Néogène. Dans la moitié sud de la Cordillère, la *surface Chayanta* correspond à la partie sommitale, sub-horizontale, de la chaîne montagneuse. Dans la moitié nord, elle est dominée par de très hauts reliefs, où sont inclus des batholites granitiques, qui culminent à 6000 m d'altitude en moyenne. Ces batholithes sont datés du Trias et du Miocène inférieur [3], mais une étude antérieure [4] a montré qu'ils ne sont devenus affleurants qu'à la fin du Miocène. C'est en effet à partir de cette époque qu'ils ont commencé à alimenter la sédimentation du piedmont ouest de la Cordillère, en bordure de l'Altiplano. Il faut donc admettre que les hauts reliefs, où sont inclus les massifs granitiques, se sont élevés au-dessus de la *surface Chayanta* durant le Cénozoïque supérieur. Leur altitude actuelle (6000 m en moyenne) implique, par comparaison avec l'altitude de la *surface Chayanta* (4500 m), que leur soulèvement a été d'au moins 1500 m plus important que celui des autres parties de la Cordillère.

III. FORMES ÉTAGÉES DU RELIEF. LES SÉQUENCES NÉOGÈNES DE LA MORPHOGENÈSE. — Les formes étagées du relief, que l'on observe en contre bas de la *surface Chayanta*, montrent que le façonnement des paysages s'est réalisé en six grandes étapes, que nous regroupons en deux séquences majeures de morphogenèse.

1. La *première séquence* comprend trois principaux termes : une époque d'intense érosion verticale d'abord, des remblaiements fluvio-lacustres ensuite, une époque d'amples érosions en glacis enfin. L'érosion verticale (creusement C_1) a disséqué la *surface Chayanta* sur une profondeur d'environ 1800 m au maximum. Les remblaiements fluvio-lacustres (R_1) sont géographiquement limités et on ne les rencontre que dans le Sud de la Bolivie, où ils colmatent d'anciennes vallées orientées du Nord au Sud. Attribués au Miocène moyen par la Paléontologie [5], ces remblaiements sont stratigraphiquement proches d'une formation volcano-sédimentaire datée au sommet de 14 M.a. dans le Sud-Est de l'Altiplano [4]. Les glacis d'ablation ont été façonnés après un plissement modéré des dépôts fluvio-lacustres précédents et sont donc postérieurs à 14 M.a. Dans la région de Marococala, ils sont surmontés par des ignimbrites dont les âges isotopiques (tableau) indiquent qu'elles se situent dans le Miocène terminal, entre 8,2 et 5,5 M.a. Ces glacis se

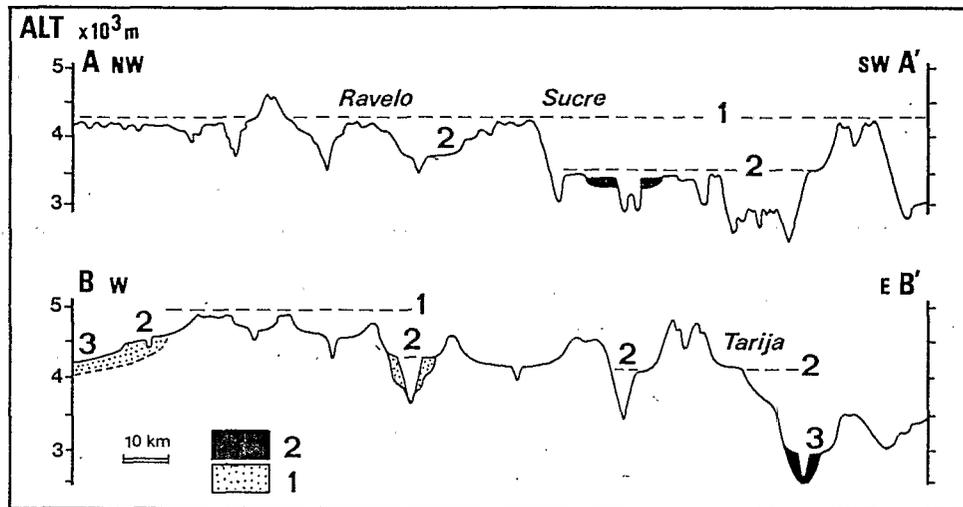


Fig. 2. — Profils géomorphologiques, 1, surface Chayanta; 2, surface San Juan del Oro (Miocène supérieur); 3, Bas-glacis (Quaternaire). (1) Dépôts du Miocène moyen. (2) Dépôts du Quaternaire ancien et moyen.

Fig. 2. — Geomorphological cross-profiles. 1: Chayanta surface. 2: San Juan del Oro surface (Upper Miocene). 3: Low pediments (Quaternary). (1) Middle Miocene deposits. (2) Middle to Upper Quaternary deposits.

rattachent donc au Miocène supérieur. Présents dans l'ensemble de la Cordillère Orientale, mais surtout développés dans le Sud, ils définissent une très grande surface, la *surface San Juan del Oro*, qui est remarquablement bien conservée sur les deux versants de la chaîne montagneuse (fig. 2).

2. La deuxième séquence débute, comme la précédente, par un creusement généralisé (C_2) des deux versants de la Cordillère Orientale. Le réseau hydrographique s'est alors enfoncé, par érosion régressive, d'environ 1 500 m au maximum dans la *surface San Juan del Oro*. Des dépôts fluvio-lacustres (R_2) ont ensuite localement remblayé les fonds des vallées. Ces dépôts, localement plissés dans leur partie inférieure, se sont mis en place en arrière d'anciens seuils topographiques qui sont clairement associés à d'importants jeux de failles. Enfin, une dernière étape du façonnement des paysages est marquée, dans les vallées les plus larges, par deux ou trois glacis étagés. Dans les hauts bassins de drainage du versant oriental de la chaîne montagneuse, certaines rivières (rio La Paz au Nord, rio San Juan del Oro au Sud) ont capturé une partie du réseau hydrographique de l'Altiplano. Localement, et au niveau des anciens seuils topographiques qui avaient favorisé la mise en place des remblaiements fluvio-lacustres R_2 , on observe une reprise de l'érosion verticale ayant provoqué l'individualisation de cañons très encaissés.

Les remblaiements R_2 , où s'intercalent des cinérites et des couches fossilifères, fournissent des éléments de datation au sein de cette deuxième séquence de morphogenèse. Dans le Sud de la Bolivie, à Tarija, ils sont datés du Pléistocène moyen, entre plus de 1 M.a. et moins de 0,7 M.a. [6]. Dans la région de Betanzos, sur le site de Khoña-Paya, deux datations isotopiques (tableau), corroborés par la présence d'une faune à Equidés typiquement quaternaire (déterminations de R. Hoffstetter, com. orale), indiquent que leur partie inférieure se situe vers 1,9 M.a. et que la partie supérieure date de moins de 1 M.a.

TABLEAU

Datations isotopiques : (1) par la méthode K/Ar, (2) par la méthode $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$.Les âges $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ correspondent à des âges-plateau.Isotopic Age Data: (1) K/Ar Ages; (2) $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ Ages.The $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ correspond to plateau-ages.

N°	Localisation	Lat. S	Long. W	Feldspath	Biotites
55..	Meseta Marococala	18°22'	66°40'	7,77 ± 0,16 (1)	8,24 ± 0,16 (1)
		—	—	8,03 ± 0,8 (2)	8,16 ± 0,10 (2)
61..	»	17°49'	66°58'	—	7,00 ± 0,15 (1)
60..	»	18°10'	66°46'	—	6,42 ± 0,15 (1)
59..	»	18°04'	66°53'	5,57 ± 0,9 (1)	5,95 ± 0,16 (1)
58..	»	17°59'	66°32'	5,91 ± 0,14 (1)	—
54..	»	18°15'	66°47'	5,95 ± 0,15 (1)	—
161..	La Paz (Cota-Cota)	16°32'	68°04'	5,5 ± 0,02 (1)	—
04..	Khoña Paya	19°37'	65°23'	—	1,9 ± 0,10 (2)
03..	Khoña Paya	19°36'	65°25'	—	≤ 1 (2)

IV. DISCONTINUITÉ DU SOULÈVEMENT. MARQUEURS GÉOMORPHOLOGIQUES DES DÉFORMATIONS TECTONIQUES. — Les deux séquences de morphogénèse s'expliquent par un soulèvement discontinu de la chaîne montagneuse :

— Les *grands creusements* C_1 et C_2 impliquent, en raison de leur caractère généralisé, une élévation de l'ensemble de la Cordillère, cette élévation étant au moins égale à l'amplitude maximale de l'érosion verticale (1 800 et 1 500 m). Les déformations tectoniques qui ont pu accompagner le soulèvement ne sont pas géomorphologiquement apparentes, car leurs effets sur les paysages ont été oblitérés par une intense érosion.

— Les *remblaiements* R_1 et R_2 , respectivement datés au Miocène moyen et du Quaternaire ancien et moyen, ne peuvent pas s'expliquer uniquement par des effets climatiques, car ils ne s'observent que dans des sites particuliers, où d'importants jeux de failles ont favorisé des rétentions locales d'écoulement dans les anciens fonds des vallées. Ces remblaiements indiquent qu'une intense activité tectonique a eu lieu après les grands creusements précédents.

— Les *glacis d'ablation* supposent un arrêt du soulèvement et une relative stabilité tectonique. Cela est évident pour les grands glacis du Miocène supérieur (*surface San Juan del Oro*), car on ne peut pas concevoir que des glacis aussi étendus eussent pu se développer dans une topographie en voie de déformation. Les bas-glacis du Quaternaire sont moins caractéristiques en raison de leur extension limitée. Mais la capture d'une partie du bassin de l'Altiplano par le rio La Paz et le rio San Juan del Oro, durant l'époque de façonnement de ces bas-glacis, suppose une faible élévation de la Cordillère : en effet, on ne voit pas comment l'érosion régressive de ces rivières aurait pu franchir la chaîne montagneuse, si celle-ci avait été le siège d'une notable surrection.

V. LE SOULÈVEMENT DE L'ENSEMBLE DES ANDES CENTRALES. — Les grandes étapes néogènes du façonnement des paysages, que nous venons d'identifier sur le versant est des Andes Centrales, ont été également reconnues sur le versant ouest. Au Pérou ([1], [2]) et dans le Nord du Chili [8], d'épais remblaiements sont datés, comme en Bolivie, du Miocène moyen mais ils se révèlent, ici, plus fortement liés à des effets climatiques [8] qu'à des effets tectoniques. Ces remblaiements sont tranchés par de grands glacis attribués au Miocène supérieur. Enfin, une reprise généralisée de l'érosion verticale est observée, comme dans la Cordillère Orientale, à la fin du Miocène. Il faut donc admettre que

l'élévation des Andes Centrales a évolué de la même façon dans la Cordillère Occidentale et la Cordillère Orientale durant le Néogène. L'un des faits majeurs de cette évolution réside dans la relative stabilité de l'ensemble des chaînes montagneuses au Miocène supérieur, lors du façonnement des grands glacis, datés de moins de 14 M.a. et de plus de 8,2 M.a.. Cependant, l'étude géomorphologique fait apparaître d'importantes variations géographiques dans l'amplitude du soulèvement. Nous en avons vu un exemple dans le Nord de la Cordillère Orientale de Bolivie, où les massifs granitiques et leurs terrains encaissants se sont plus intensément élevés que les autres parties de la chaîne.

VI. CONCLUSIONS. — 1. L'étude géomorphologique et les datations paléontologiques et isotopiques indiquent que l'élévation de la Cordillère Orientale des Andes de Bolivie s'est réalisée de façon discontinue durant le Cénozoïque. Deux grands creusements, situés respectivement avant le Miocène moyen et au Tertiaire supérieur (Miocène terminal, Pliocène), ont été provoqués chacun par une intense surrection. Deux générations de glacis d'ablation révèlent une relative stabilité des reliefs au Miocène supérieur (14-8,2 M.a.) et au Quaternaire moyen à récent. Pendant les époques de transition entre les grands creusements et le façonnement des glacis, une forte activité tectonique locale a favorisé un remblaiement ponctuel des fonds des vallées par des sédiments fluvio-lacustres. 2. Par comparaison avec les observations faites au Pérou et au Chili, ces évaluations montrent que les grandes étapes néogènes du soulèvement concernent les deux versants des Andes Centrales. 3. Cependant, d'importantes anomalies régionales sont caractérisées par une élévation plus intense de certains reliefs. L'une de ces anomalies est particulièrement bien apparente dans le nord de la Cordillère Orientale de Bolivie.

Note remise le 10 mars 1989, acceptée après révision le 26 mai 1989.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. SEBRIER, A. LAVENU, M. FORNARI et J. P. SOULAS, *Géodynamique*, 3, n° 1-2, 1988, p. 85-106.
- [2] A. LAVENU, *Travaux et Documents*, O.R.S.T.O.M., 1988, 434 p.
- [3] J. NIEL GRANT, C. HALLS, W. AVILA SALINAS et N. J. SNELLING, *Econ. Geology*, 74, 1979, p. 838-851.
- [4] C. MARTINEZ, *Travaux et Documents*, O.R.S.T.O.M., 119, 1980, 352 p.
- [5] R. HOFFSTETTER, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 284, série D, 1977, p. 1517-1520.
- [6] B. J. MAC FADDEN, O. SILES, P. ZEITLER, N. N. JOHNSON et K. E. CAMPBELL Jr., *Quaternary Research*, 19, n° 2, 1983, p. 172-187.
- [7] R. M. TOSTAL, A. H. CLARK et G. FARRAR, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95, 1984, p. 1318-1332.
- [8] P. PASKOFF et J. A. NARANJO, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 297, série II, 1983, p. 743-748.

M. S. : O.R.S.T.O.M., 70-74, route d'Aulnay, 93143 Bondy;

Th. S. : Mission O.R.S.T.O.M., Casilla 4875, Santa Cruz, Bolivie;

J. A. : I.G.L., U.M.S.A., Casilla 12198, La Paz, Bolivie;

M. B., G. F. et Ph. L. B. : U.A. n° 723 du C.N.R.S., Université, 06024 Nice.