

11

2

Paléontologie/Paleontology
(Sédimentologie/Sedimentology)

A propos de l'environnement marin restreint du bassin centro-andin au Maastrichtien

Mireille GAYET, Thierry SEMPÈRE et Henri CAPPETTA

Résumé – La paléontologie et la sédimentologie de la Formation El Molino (Maastrichtien, Bolivie) et de ses équivalents centro-andins démontrent que leur dépôt est intervenu dans un domaine au moins périodiquement en relation avec la mer. Ces faits infirment l'hypothèse d'une « *permanence de conditions continentales* » dans ce bassin.

On the restricted marine environment of the centro-Andean basin in Maastrichtian time

Abstract – Paleontology and sedimentology of the El Molino Formation (Maastrichtian, Bolivia) and of its Andean equivalents demonstrate that their deposition occurred in a realm at least episodically connected with a sea. These data do not support the suggestion of a "continuous continental deposition" in this basin.

Abridged English Version – It was suggested recently [1] on the basis of paleontological and sedimentological data, that the depositional environment of the El Molino Formation was strictly lacustrine and consequently that the "migration" of Cretaceous marine sedimentation to the oriental Andean realm [2] was doubted. We contest this assertion, estimating that the data and interpretations are in part incorrect and one-sided.

G. Camoin and J.-M. Rouchy participated in the field trips organized by M.G. and T.S. for the study of stromatolites and deposition conditions in the Potosí Basin [3]. The sections used in their paper [1] (unpublished data of T.S. or made together in the field) indicated the presence of marine fishes, known by these authors ([4]-[9]) and the voluntary omission of these data, because they were in opposition with their interpretation, is not acceptable.

We shall restrict ourselves mostly to the paleoichthyological data of the El Molino Formation and correct the inaccurate or incomplete data of Camoin *et al.* A more detailed study has been submitted elsewhere [10].

The El Molino Formation belongs to the Puca group (Late Jurassic-Paleocene) occurring over 500,000 km² in the centro-Andean basin which was open to the sea to NNW ([2], [11]-[14]). The ante- and post-El Molino Formations are composed mostly of red pelites. The equivalent of the Chaunaca Formation in Peru has yielded marine remains ([2], [15]-[17]). The El Molino Formation is composed of green to black marls with intercalations of thin calcareous levels, of which some are turbidites. At the base are sandstones, oolitic grainstones, stromatolitic boundstones and marls. Evaporites are rare. This formation consists of the Peruvian equivalents of three transgressive-regressive sequences ([14]-[15], [18]-[19]); the lower part of each shows transgressive facies with marine ichthyofauna [15].

A shallow marine environment was at first supposed [20] but reinterpretation suggested deposition in a confined basin [21]. A lacustrine environment was already proposed [22] but the paleontological data oppose this interpretation.

Note présentée par Yves COPPENS.

M
p15

Fishes are more numerous and diversified in the lower and middle members than in the upper one [23]. Only Polypteridae [24] and Lepidosirenidae [23] have no known marine species. Other groups considered as freshwater forms can have one or more representatives in the sea and four groups are restricted to it. Some living Selachians can enter fresh waters close to the sea ([25]-[26]). We stress the temporary nature of their incursions. Two Bolivian genera occur only in marine sediments all around the world. The diversity of taxa in each level also indicates marine deposition. The Pycnodontes are known only as marine fossils with possibly some exceptions in fresh waters of some countries [23]. *Coelodus*, as well as the Enchodontidae, the Ichthyotringoidei ("Salmoniformes") and the Eotrigonodontidae known all around the world principally in marine sediments [23] are present ([7]-[8], [23]).

The Table gives the stratigraphic position of the marine fishes of the El Molino Formation. They are present only in the two lowest members of the formation. With the exception of two families of Selachians, there are no extinctions of fishes at the K/T boundary exposed in the El Molino Formation, indeed some taxa occur until at least the Eocene and/or the Recent.

Camoin *et al.* [1] compared the Ostracods to those of the Neuquén Basin (Argentina) but they omitted to note that the deposition of this Maastrichtian basin was correlated with a marine transgression ([30]-[31]). Moreover, Foraminifera generally live in marine waters and cannot "*plead for a permanent continental deposition*".

We can conclude that paleontology does not support the suggestion of continuous continental deposition. The remains show that several marine species entered the basin and that isolated bones of freshwater taxa were transported by rivers. From a sedimentological point of view, two realms, "internal" and "external", have been recognized [21] and described [11]. An independent sedimentological study [32] confirmed the marine interpretation. Despite the marine fauna, we know that the depositional environment was never open sea ([4], [12], [19], [20]-[21], [33]-[34]). The floor of the basin was flat and it was permanently very shallow to sub-emergent. Andean Bolivia and the NW of Argentina were located at the extreme tip of the elongated Andean epicontinental basin which probably only connected with the oceanic realm in the region of present-day Venezuela. The abundance of sandy facies in the southernmost part of the basin suggests that rivers, transporting a large amount of fresh water and mud were flowing into the basin.

Considering these data, some of them already published, it is difficult to understand how some authors [1] could consider that the "*paleontological and sedimentological data plead for a continuous continental deposition*". All these particular conditions have given to the Maastrichtian of the centro-Andean basin its lithological and paleontological characteristics. It is not necessary to imagine a continental depositional environment to which so many marine species became adapted.

I. INTRODUCTION. — Paléontologie et sédimentologie démontreraient [1] la permanence de conditions continentales de la Formation El Molino, remettant en cause la « migration » vers le domaine andin oriental, de la sédimentation marine [2] crétacée. Nous contestons cette assertion, estimant en partie inexactes et partiales la présentation et l'interprétation de données qui, en opposition avec la permanence d'un milieu continental strict, ont été éliminées.

G. Camoin (en 1988 et 1989) et J.-M. Rouchy (1989) ont participé à deux missions organisées par M.G. et T.S., dans le cadre d'un contrat de collaboration [3], pour l'étude

des stromatolites et des conditions de dépôt du bassin de Potosí. Les coupes examinées (levés et manuscrits inédits de T.S. dans l'article de Camoin et coll. et/ou réalisées en commun sur le terrain), signalaient des niveaux à Poissons marins. Cette présence ([4] à [9]) était donc connue des auteurs. Qu'ils réfutent l'interprétation marine du milieu de vie de ces Poissons pour démontrer la permanence du caractère continental des dépôts est admissible; qu'ils omettent de mentionner des faits contraires à leur interprétation, relève, en revanche, d'une démarche contestable.

Nous rappelons ici brièvement les données paléoichthyologiques de la Formation El Molino et de ses équivalents et corrigeons les descriptions et citations inexactes ou incomplètes de Camoin et coll. dont l'étude a porté sur moins de 30 % de la série affleurante et moins de 10 % des coupes accessibles. Une étude, avec apport de données nouvelles, est soumise par ailleurs à publication [10].

II. CADRE STRATIGRAPHIQUE ET PALÉOENVIRONNEMENT. — La Formation El Molino appartient au Groupe Puca (Jurassique terminal-Paléocène) déposé sur 500 000 km² dans le bassin centro-andin, ouvert périodiquement, au moins à partir du Cénomaniens ([2], [12]-[14]), vers un domaine marin situé au NNW. Les formations anté-El Molino (Aroifilla : Coniacien; Chaunaca : Santonien-Campanien) et post-El Molino (Santa Lucía : Paléocène moyen-supérieur) se composent essentiellement de pélites rouges localement riches en évaporites. Deux minces niveaux verts s'intercalent dans la Formation Chaunaca et se suivent jusqu'au Pérou où ils renferment une faune marine [15]; le plus ancien de ces niveaux (Santonien) ([2], [16]) a fourni des Mytilidés indicateurs de conditions marines peu profondes ([17], *contra* Camoin et coll.). La Formation El Molino, composée de marnes vertes à noires avec intercalation de minces bancs calcaires dont certains sont des turbidites, contraste avec les formations sous- et sus-jacentes. A la base, on trouve des grès blancs calcaires, des grainstones oolithiques, des boundstones stromatolitiques et des marnes. Les évaporites sont pratiquement absentes (*contra* Camoin et coll. : 1337). Il est possible que les smectites magnésiennes signalées [1] proviennent de l'altération de produits volcaniques sans traduire des conditions de salinité particulières (J. F. Deconinck, com. pers.). Aucun paléosol n'a été observé dans la formation hors de localités marginales. D'abondants niveaux à fentes de dessiccation ou de synérèse soulignent localement la fréquence de conditions émergentes à sub-émergentes. La Formation El Molino comporte, comme son équivalent péruvien, trois grandes séquences transgressives-régressives ([14]-[15], [18]-[19]), dont chaque partie inférieure présente des faciès transgressifs à ichthyofaune marine [15]. Un dépôt en eaux marines peu profondes a d'abord été suggéré [20] pour la Formation El Molino et ses équivalents andins, mais des études sédimentologiques plus détaillées ont insisté sur son caractère confiné [21]. L'interprétation d'un environnement en permanence lacustre, déjà proposée [22], se heurte cependant aux données paléontologiques.

III. ANALYSE DE LA FAUNE. — La Formation El Molino renferme Reptiles, Poissons, Ostracodes, Gastéropodes, Bivalves, Foraminifères, Dinoflagellés et Charophytes, irrégulièrement répartis, selon les couches, dans la série.

Les Poissons, qui se rencontrent dans les trois membres que compte la formation [23], sont plus nombreux et plus diversifiés dans les membres inférieur (25 genres, 18 familles, 15 ordres, 3 classes) et moyen (23, 16, 13, 2) que dans le membre supérieur (9, 7, 6, 1) [12]. Seuls les Polypteridae [24] et les Lepidosirenidae [23] n'ont aucun représentant connu en milieu marin ou saumâtre. D'autres groupes présentent : un seul (Osteoglossidae,

TABLEAU

Tableau indiquant le nombre total d'espèces et de localités des familles marines dans les formations El Molino et Santa Lucía (Bolivie).

Table showing the total number of species and localities of the marine families in the El Molino and Santa Lucía formations (Bolivia).

Taxa marins	Nombre total d'espèces	Formation El Molino (nombre de localités)			Formation Sta. Lucía
		Mb. inf	Mb. moy	Mb. sup.	
Rhombodontidae (Sélaciens).	2	4	—	—	—
Dasyatidae (Sélaciens).	6	3	2	—	—
Sclerorhynchidae (Sélaciens).	3	6	3	—	—
Pycnodontidae (« Holostéens »).	2	4	3	—	—
Enchodontidae (Téléostéens).	1	1	1	—	—
Ichthyotringoidei (Téléostéens).	1	1	2	—	—
Eotrigonodontidae (Téléostéens).	1	2	2	—	—

Ceratodontidae), deux (Centropomidae) ou plusieurs genres (Semionotidae, Clupeidae, Cyprinodontiformes) en milieu marin. Nous admettons que les Lépisostéiformes, les Characiformes et les Siluriformes, à de rares exceptions marins ou saumâtres, sont dulçaquicoles. Le problème se pose pour quatre groupes (Sélaciens, Pycnodontiformes, « Salmoniformes » et Tétrodontiformes) qui sont la plupart du temps inféodés aux eaux marines.

Parmi les Sélaciens actuels, certains pénètrent dans des estuaires, des fleuves ou des lacs en relation avec la mer. Il s'agit, soit d'espèces marines à migrations épisodiques en eau douce (Pristidae, Carcharhinidae, Dasyatidae) ([25]-[26]), soit d'espèces de genres marins (*Dasyatis*, *Himantura*) limitées à certains cours d'eau ([27]-[28]). Il faut insister sur le caractère temporaire de ces incursions en eau douce et donc sur la nécessité de liaison avec la mer. Seuls, les Potamotrygonidae sont strictement inféodés au bassin de l'Amazone [29]. Les Sclerorhynchidae crétacés, au mode de vie proche de celui des Pristidae actuels, pouvaient certainement pénétrer en eau douce; on les rencontre le plus souvent dans des dépôts littoraux. Deux genres boliviens, *Ischyrrhiza* et *Schizorhiza*, à large répartition géographique, se rencontrent toujours, en dehors de la Bolivie, dans des faciès marins, argument à lui seul suffisant pour considérer les gisements à Sélaciens de Bolivie comme marins. La diversité des taxons d'un même niveau plaide en ce sens; l'adaptation à un milieu continental concernerait 11 espèces de Sélaciens de deux ordres différents; nulle part actuellement en eau douce on ne connaît une association aussi variée.

Les Pycnodontes « Holostéens » sont uniquement fossiles et marins. Des cas isolés de vie en eaux continentales ont été supposés dans plusieurs pays [23]. *Coelodus*, connu dans le monde entier dans des dépôts en quasi-majorité marins ([19], [23]), est présent en Bolivie ([7], [8], [23]). Les Enchodontoidei et les Ichthyotringoidei (Téléostéens, « Salmoniformes ») sont mondialement connus dans des niveaux marins [23]. Une seule famille (sur 10) des Tétrodontiformes actuels (Téléostéens) présente deux espèces qui pénètrent dans les eaux douces; les Eotrigonodontidae, strictement fossiles, ne sont connus mondialement que dans des sédiments marins [23].

Les poissons marins sont donc présents uniquement dans les membres inférieur et moyen de la Formation El Molino (tableau). La limite K/T, située entre ses membres

moyen et supérieur [19], n'intervient pas dans la disparition de la plupart des taxons qui perdurent jusqu'à l'Eocène et/ou l'actuel. Elle peut expliquer l'absence, dans le membre supérieur, des Rhombodontidae et des Sclerorhynchidae qui ne dépassent pas le Crétacé. Les taxons dulçaquicoles ou bivalents des membres inférieur et moyen indiquent une bordure côtière avec des arrivées d'éléments osseux transportés. En effet, les seuls squelettes en connexion dans la formation ne se rencontrent jamais dans les niveaux à faune mixte.

Il est fait état [1] d'Ostracodes « à cachet continental » (...) *proches de formes connues dans le (...) bassin de Neuquén (Argentine)* ». Les auteurs omettent le fait que le dépôt maastrichtien dans ce bassin s'est effectué à la faveur d'une transgression marine (Formation Jagüel) et que les faciès d'où proviennent les formes signalées sont ceux d'environnement côtiers en relation directe avec la mer ([30]-[31]). On ne voit donc pas en quoi « *les associations d'Ostracodes et de Foraminifères benthiques (...) dominées par des formes eurysalines plaident en faveur d'un milieu de dépôt continental permanent* » [1]. Les Foraminifères caractérisent généralement un milieu marin, et témoignent simplement d'une certaine teneur en sel des eaux.

IV. CONCLUSION. — Contrairement aux récentes assertions [1] on doit donc constater que les données paléontologiques ne plaident pas en faveur « *d'un dépôt continental strict et continu* ». Elles montrent d'une part qu'un nombre non négligeable de taxa marins ont pu pénétrer dans le bassin centro-andin au Maastrichtien (celui-ci communiquait donc au moins périodiquement avec une mer) et, d'autre part, que du matériel osseux dulçaquicole parvenait au bassin probablement apporté par des cours d'eau. Du point de vue sédimentologique, deux domaines sédimentaires « interne » et « externe », séparés par une zone de barrière, avaient été reconnus [21] puis précisés [11] en admettant un domaine marin *s.l.* du fait des données paléontologiques (environnements lacustres « bordier », « ouvert » et « marginal » de [1]). Une étude sédimentologique indépendante [32] a confirmé l'interprétation marine *s.l.* Mais, on sait que malgré ses faunes marines, le milieu de dépôt de la Formation El Molino n'a jamais correspondu à une mer ouverte ([4], [12], [19], [20]-[21], [33]-[34]). En dépit de son immensité, le bassin était plat, très peu profond à sub-émergent. Il se situait en position d'arrière-arc et occupait la partie axiale du bassin d'avant-pays sénonien-paléocène des paléo-Andes ([11], [14]). Cette paléogéographie explique comment un environnement marin restreint a pu s'étendre sur une telle surface. La Bolivie andine et l'Argentine du NW étaient alors localisées à l'extrémité d'un bassin andin épicontinental allongé communiquant avec l'océan à 3 800 km plus au nord, au Vénézuéla actuel [14]. A en juger par l'abondance des faciès sableux déposés à l'extrémité sud du bassin et dans la branche NW-SE des Andes boliviennes, d'importants cours d'eau devaient alimenter en eau douce ce domaine où la tranche d'eau « marine » était pelliculaire [14], provoquant de fortes variations de salinité. Cela est en accord avec le caractère endémique de la faune et l'absence de Requins. Le concours de toutes ces conditions a dû donner au Maastrichtien centro-andin ses caractéristiques lithologiques et paléontologiques particulières. La présence d'une faune marine ou probablement marine s'inscrit dans cette logique. Il n'est nul besoin d'imaginer un environnement continental où tant d'espèces marines se seraient adaptées. Sur la base de ces données — en partie déjà publiées — on comprend mal comment certains [1] en arrivent à considérer que les « *données sédimentologiques et paléontologiques plaident en faveur d'un dépôt en milieu continental permanent* », conclusions qui vont à l'encontre des données paléontologiques les plus élémentaires.

Note remise le 3 octobre 1991, acceptée après révision le 5 décembre 1991.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] G. CAMOIN, J.-M. ROUCHY, J. M. BABINOT, J. F. DECONNINCK et G. TRONCHETTI, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 312, série II, 1991, p. 1335-1341.
- [2] E. JAILLARD et T. SEMPERE, *Contrib. Simp. Cretacico. Amer. Lat.*, 1989, p. A 1-A 27.
- [3] A.B.P. : Asociación Boliviana de Paleontología; M.N.H.N. : Muséum national d'Histoire naturelle; ORSTOM : Institut français de Recherche scientifique pour le Développement en Coopération; Y.P.F.B. : Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos.
- [4] H. CAPPETTA, *Geobios*, 8, (1), 1975, p. 5-24.
- [5] C. DE MUIZON, M. GAYET, A. LAVENU, L. G. MARSHALL, B. SIGÉ et C. VILLARROEL, *Geobios*, 16, (6), 1983, p. 747-753.
- [6] L. G. MARSHALL, C. DE MUIZON, M. GAYET, A. LAVENU et B. SIGÉ, *Nat. Geogr. Res.*, 1, 1985, p. 274-288.
- [7] M. GAYET, *Actas 1° Simp. Inves. Fr. Bolivia*, 1986, p. 175-176, La Paz.
- [8] M. GAYET, *Actas 2° Simp. Inves. Fr. Bolivia*, 1988, p. 67-74, La Paz.
- [9] M. GAYET et P. BRITO, *Geobios*, 22, (6), 1989, p. 841-847, Lyon.
- [10] M. GAYET, T. SEMPERE, H. CAPPETTA et E. JAILLARD, *News. Stratigr.* (soumis).
- [11] T. SEMPERE, J. OLLER, C. CHERRONI, O. ANARIBAR, L. BARRIOS, M. CIRBIAN et M. A. PEREZ, 10° *Congr. geol. Argentina*, 242, 1987, p. 18-19.
- [12] T. SEMPERE, J. OLLER et L. BARRIOS, 5° *Congr. Geol. Chileno*, 3, 1988, p. H 37-H 65.
- [13] T. SEMPERE, *Rev. Téc. Y.P.F.B.*, 11, 1990, p. 215-227, Cochabamba.
- [14] T. SEMPERE, in *Cretaceous tectonics in the Andes*, J. A. SALFITY éd., *Earth Evol. Sci.* (sous presse).
- [15] E. JAILLARD, H. CAPPETTA, P. ELLENBERGER, M. FEIST, N. GRAMBAST-FESSARD, J. P. LEFRANC et B. SIGÉ, *News. Stratigr.* (sous presse), Berlin/Stuttgart.
- [16] M. A. PEREZ, 4° *Congr. Latinoamer. Paleont.*, 2, 1987, p. 739-756, Santa Cruz.
- [17] L. BRANISA et R. HOFFSTETTER, *Bull. Mus. natn. Hist. nat.*, 2, 38, (3), 1966, p. 301-310.
- [18] T. MOURIER, P. BENGTON, M. BONHOMME, E. BUGE, H. CAPPETTA, J.-Y. CROCHET, M. FEIST, K. F. HIRSCH, E. JAILLARD, G. LAUBACHER, J.-P. LEFRANC, M. MOULLADE, C. NOBLET, D. PONS, J. REY, B. SIGÉ, Y. TAMBAREAU et P. TAQUET, *News. Stratigr.*, 19, (3), 1988, p. 143-177.
- [19] M. GAYET, L. G. MARSHALL et T. SEMPERE, in *Fósiles y Facies de Bolivia*, R. SUAREZ éd., *Rev. Téc. Y.P.F.B.*, 12, (3-4), 1991 (sous presse), Santa Cruz.
- [20] A. CASTAÑOS, R. PINEDO et J. A. SALFITY, *Rev. Téc. Y.P.F.B.*, 4, 1975, p. 31-59, La Paz.
- [21] R. A. MARQUILLAS, 1° *Simp. P.I.C.G.*, n° 242, 1986, p. 153-169, La Paz.
- [22] J. M. PALMA, *Zeitbl. Geol. Paläont.*, 1, 1985, 1986, p. 1337-1350, Stuttgart.
- [23] M. GAYET, in *Fósiles y Facies de Bolivia*, R. SUAREZ éd., *Rev. Téc. Y.P.F.B.*, 12, (3-4), 1991 (sous presse), Santa Cruz.
- [24] M. GAYET et F. J. MEUNIER, *Geobios*, 24, (4), 1991, p. 463-466, Lyon.
- [25] M. BOESEMAN, *Zoll. Meded.*, 40, 1964, p. 9-22.
- [26] T. B. THORSON, D. E. WATSON et C. M. COWAN, *Copeia*, 3, 1966, p. 385-402.
- [27] S. MONKOLPRASIT et T. R. ROBERT, *Japan J. Ichthyol.*, 37, (3), 1990, p. 203-208.
- [28] T. R. ROBERT et J. KARNASUTA, *Environm. Biol. Fishes*, 20, (3), 1987, p. 131-167.
- [29] R. S. ROSA, H. P. CASTELLO et T. B. THORSON, *Copeia*, 2, 1987, p. 447-458.
- [30] A. C. RICCARDI, *Geol. Soc. Amer.*, 168, 1988, p. 1-168.
- [31] L. LEGARRETA, D. A. KOKOGIAN et D. A. BOGGETTI, *Cret. Res.*, 10, 1989, p. 337-356.
- [32] K. OKAMOTO, Y. OISO et J. C. LEMA, *Rev. Téc. Y.P.F.B.*, 11, 1990, p. 167-178, Cochabamba.
- [33] H. A. PILSBRY, *The Johns Hopkins Univ. St. Geol.*, 13, 1939, p. 69-72.
- [34] R. J. GOMEZ-OMIL, A. BOLL et R. M. HERDANDEZ, 10° *Congr. Geol. Argent.*, 5, 1987, p. 9, Tucuman.

M. G. : U.R.A. n° 11, Centre des Sciences de la Terre, Université Claude-Bernard, Lyon-I,
27-43, boulevard du 11-Novembre-1918, 69622 Villeurbanne Cedex;

T. S. : ORSTOM, U.R. 1 H, Centre de Géologie générale et minière,
École des Mines, 35, rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau;

H. C. : U.R.A. n° 327, Institut des Sciences de l'Évolution, U.S.T.L.,
Laboratoire de Paléontologie, place Eugène-Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 05.