

# Réponse au commentaire de Philippe Mourguiart à la note

## Le dernier maximum glaciaire (21 000–17 000 $^{14}\text{C}$ ans BP) dans les Andes tropicales de Bolivie d'après l'étude des diatomées

*C.R. Acad. Sci. Paris, tome 327, série Ila, 1998, pp. 611–618*

Florence Sylvestre, Simone Servant-Vildary, Michel Servant

La littérature sur les bassins nord et sud des Andes de Bolivie admet, depuis les travaux de Servant et Fontes (1978), qu'une phase sèche, dénommée « inter-lacustre Minchin–Tauca », s'intercale entre deux périodes de hauts niveaux lacustres, respectivement situées avant le dernier maximum glaciaire (DGM) et durant le Tardiglaciaire. L'apport nouveau et inattendu de notre note se situe dans le fait que le plan d'eau — aujourd'hui sub-affleurant — du bassin de Uyuni-Coipasa était plus élevé qu'actuellement durant cet interlacustre entre 21 000 et 17 000 ans BP, alors que le plan d'eau du lac Titicaca était plus bas qu'actuellement. C'est en ce sens que les situations hydrologiques du Nord et du Sud de l'Altiplano sont considérées comme opposées. Le commentaire de P. Mourguiart ne porte pas sur nos données, celles-ci sont d'ailleurs interprétées dans le paragraphe « Implications paléoclimatiques ». La critique, si critique il y a, est que nous n'aurions pas correctement replacé nos données dans le contexte des connaissances disponibles sur le DMG. P. Mourguiart nous fait dire « que le DMG est une période relativement humide », ce que nous n'avons en aucune façon écrit. Une autre critique se situe dans le fait que nous n'avons pas pris en considération l'histoire des bassins sur l'ensemble des 30 000 dernières années, de telle sorte qu'il nous aurait échappé que les deux bassins nord et sud « semblent présenter tendanciellement une évolution parallèle ». Ce deuxième point dépasse largement le sujet de notre note, et nous oblige à revenir sur diverses publications antérieures. P. Mourguiart présente des reconstructions paléohydrologiques considérées comme acquises (figure 2) et, de ce fait, non commentées dans le texte. En réalité, la courbe du bassin de Uyuni-Coipasa (Argollo et Mourguiart, 1995) est issue pour l'essentiel d'une réinterprétation discutable de nos propres données (Servant et al., 1995). De plus, cette courbe ne tient pas compte des progrès récents sur le sujet (Sylvestre, 1997 ; Sylvestre et

al., 1999). La courbe du lac Titicaca (Mourguiart et al., 1997) passe sous silence de sérieux problèmes concernant le contrôle chronologique pour la période Minchin et la période comprise entre 18 000 et 9 800 ans BP.

### « Le DMG dans le contexte paléohydrologique de l'Altiplano de Bolivie »

#### Les bassins sud

Le commentaire de P. Mourguiart relatif à un petit bassin du Sud-Est de la Bolivie (Laguna Ballivián) résulte d'une lecture erronée des travaux antérieurs. La colonne de gauche de la figure 1 concerne les reconstructions des paléosalinités, les échantillons étant ordonnés en fonction du temps (le « Tauca » plus récent est représenté au-dessus du « Minchin »). La colonne de droite concerne les reconstructions paléobathymétriques, les mêmes échantillons étant ordonnés en fonction de leur altitude sur le terrain (les dépôts « Tauca » sont emboîtés dans les dépôts « Minchin », et donc plus bas dans le paysage). Ce point étant éclairci, il faut rappeler que le contrôle chronologique (radiocarbone) se heurte dans ces bassins (Sylvestre, 1997), comme dans ceux proches du Nord Chili (Grosjean et al., 1995), à de sérieuses difficultés, liées à un important effet réservoir. Les évolutions paléohydrologiques du Sud-est de la Bolivie ne peuvent pas être comparées pour le moment avec les autres régions.

La courbe des variations du niveau lacustre du bassin de Uyuni-Coipasa-Poopó (nommé lac Pocoyu dans la figure 2) appelle de nombreuses remarques ; nous n'en retiendrons que quelques-unes.

a) Un haut niveau lacustre est situé vers 30 000 ans BP, d'après des âges radiocarbone de longue date disponibles



dans la littérature. Ces âges ont été obtenus sur des carbonates lacustres. Nous considérons qu'ils doivent être utilisés avec précaution, car il est aujourd'hui bien connu que de faibles recristallisations peuvent entraîner un rajeunissement considérable.

b) Une remontée du plan d'eau est notée à 14 000 ans BP, alors qu'elle est datée de 15 500 ans BP (Servant et al., 1995). Cette date a été ultérieurement confirmée par une comparaison entre des datations U/Th et radiocarbone (Sylvestre, 1997 ; Sylvestre et al., 1999).

c) Le très haut niveau lacustre (+98 m) à 13 800 ans BP, identifié seulement sur la base de deux âges radiocarbone publiés par Bill et al. (1994), sans aucun commentaire, n'a pas été confirmé par l'étude détaillée des diatomées. Celles-ci situent le plan d'eau à environ +40 m au-dessus du fond actuel du bassin (Sylvestre, 1997 ; Sylvestre et al., 1999).

d) Les deux phases brèves et intenses d'abaissement du lac, qui sont notées entre environ 13 000 et 12 000 ans BP, résultent d'une interprétation basée sur la présence, à des altitudes relativement basses, de sédiments riches en coquilles et débris de characées, indicateurs d'une faible bathymétrie. Nous avons montré que ces coquilles et characées sont en réalité issues d'un remaniement synsédimentaire (Sylvestre et al., 1999).

e) Une petite oscillation lacustre positive est indiquée vers 11 000 ans BP, sans tenir compte du fait que son âge a été révisé grâce à des datations U/Th (Sylvestre, 1997 ; Sylvestre et al., 1999). Cette petite oscillation est maintenant attribuée à l'Holocène ancien, en accord avec une phase de haut niveau lacustre mise en évidence dans l'Altiplano du Nord Chili d'après des âges radiocarbone obtenus sur du matériel terrestre et donc non affectés par un effet réservoir (Grosjean et al., 1995).

### Le lac Titicaca

La courbe des variations du niveau du lac Titicaca depuis 30 000 ans (*figure 2*, d'après Mourguiart et al., 1997) est empruntée, pour la période comprise entre environ 24 000 et 8 000 ans BP, aux travaux palynologiques de Ybert (1992) et sédimentologiques de Wirmann et al. (1992). Elle appelle deux principales remarques.

a) Un très haut niveau lacustre est situé vers 30 000–26 000 ans BP, d'après trois âges radiocarbone sur coquilles prélevées dans des dépôts affleurant dans les régions riveraines du lac Titicaca. En l'absence d'informations sur le contexte stratigraphique, on peut se demander si ces dépôts ne se rattachent pas à la formation lacustre Ulloma/Ballivián (Troll, 1935), attribuée à la fin du Quaternaire moyen. L'éventualité d'un rajeunissement des échantillons par recristallisation des carbonates ne peut pas être écartée.

b) Deux âges radiocarbone seulement (matière organique) sont disponibles pour la période comprise entre 17 000 et 9 800 ans BP. Les oscillations du lac ne sont donc pas datées, à l'exception de la phase centrée sur

13 000 ans BP, qui a été caractérisée par un plan d'eau relativement élevé, mais dont on ne connaît pas encore précisément l'altitude.

### Comparaison entre les bassins nord et sud

Le parallélisme suggéré par la *figure 2*, entre les bassins sud et nord, masque d'importantes questions encore en suspens. En l'absence d'une validation des âges radiocarbone sur carbonate, peut-on affirmer qu'il n'y a pas eu de déphasage significatif entre les abaissements des niveaux lacustres à la fin de la période Minchin ? Faut-il admettre qu'une phase sèche est survenue simultanément dans les deux systèmes hydrologiques entre 17 000 et 16 000 ans BP ? Est-ce qu'il y a eu déphasage entre la remontée des niveaux lacustres entre 15 500 et 14 000 ans BP ? Est-il démontré, ou seulement probable, que la phase d'intense sécheresse dans le Sud de l'Altiplano, ayant eu lieu, d'après Sylvestre et al. (1999) dans le Sud de l'Altiplano après 12 000 et avant 10 000 ans BP, a été aussi enregistrée pour le lac Titicaca ? Faut-il mettre en opposition le bas niveau du lac Titicaca durant l'Holocène ancien avec le niveau, plus haut qu'actuellement, du paléolac dans le bassin de Uyuni-Coipasa ? Ces questions ne relèvent pas d'un souci excessif du détail car on sait, d'après les données disponibles aux hautes latitudes, qu'elles conditionnent à terme la compréhension des changements climatiques régionaux dans un cadre global.

### « Le DMG dans le contexte de l'Amérique du Sud tropicale »

Nous n'avons à aucun moment présenté le DMG « comme une période relativement humide », mais nous avons effectivement attiré l'attention sur le fait que la forêt s'est maintenue en Amazonie occidentale, ce qui vient d'être confirmé par Hooghiemstra et van der Hammen (1998). Aujourd'hui, nous pouvons renvoyer aux études de Haberle et Maslin (1999), qui indiquent que la forêt s'est probablement maintenue sur une grande partie du bassin amazonien. Ce qui est important, pour le problème qui nous préoccupe, réside dans le fait que la forêt a reculé sur sa bordure sud et que ce retrait est en phase avec un niveau plus bas qu'actuellement du lac Titicaca, suggérant des conditions climatiques sèches au sud de l'équateur. Il était donc effectivement inattendu de rencontrer une nappe d'eau bien développée dans le bassin sud, et cela d'autant plus que ce bassin était alors privé des apports en eau issus du déversement du lac Titicaca.

### « Implications paléoclimatiques »

Les hypothèses évoquées par P. Mourguiart pour expliquer les situations paléohydrologiques du DMG en Bolivie ne sont pas fondamentalement différentes de celles

que nous avons avancées dans notre note. La première hypothèse, paléométéorologique, envisage une influence renforcée des processus atmosphériques d'origine extra-tropicale. Nous avons privilégié les précipitations ayant lieu en hiver lorsque les vents d'ouest hémisphériques se situent sur les Andes. P. Mourguiart privilégie plutôt les advections de masses d'air polaire d'origine antarctique. Ce processus doit être envisagé à l'est des Andes (voir notamment Servant et al., 1993) mais n'a certainement pas eu une influence directe sur l'évolution du climat dans la chaîne montagneuse, car les masses d'air froides et denses se déplacent dans les basses couches de la troposphère et ne peuvent que très difficilement atteindre les très hautes altitudes de l'Altiplano. La deuxième hypothèse, paléohydrologique, fait intervenir un effet de stockage des eaux météoriques dans les glaciers. Pour nous, l'essentiel se situe dans le fait que les glaciers ont été beaucoup plus

étendus dans le Nord que dans le Sud de l'Altiplano. P. Mourguiart rappelle, avec raison, qu'aucune avancée glaciaire n'a été mise en évidence durant le DMG. Il est bien établi que cette période a été marquée par un retrait des glaciers, mais on n'en connaît pas l'amplitude (voir notamment Servant et al., 1995). Faut-il dès lors envisager que les lacs ont été alimentés par des eaux antérieurement immobilisées sous forme solide ? Si cela avait été le cas, on pourrait s'attendre à une influence des eaux de fonte très marquée sur le bilan du lac Titicaca et, au contraire, plus faible sur le bilan des bassins du Sud. Ce n'est pas ce que suggèrent les données actuellement disponibles. De nouvelles recherches sont nécessaires pour approfondir les arguments en faveur des différentes hypothèses. Cela passe par une meilleure connaissance des processus qui contrôlent les bilans lacustres (voir à ce propos Blodget et al., 1997).

## Références

- Argollo J. et Mourguiart P. 1995. Los climas cuaternarios de Bolivia, in : Argollo J. et Mourguiart P. (éds), *Cambios cuaternarios en América del Sur*, Orstom éditions, La Paz, Bolivia, 135-155
- Bills B.G., de Silva S.L., Currey D.R., Emenger R.S., Lillquist K.D., Donnellan A. et Worden B. 1994. Hydro-isostatic deflection and tectonic tilting in the central Andes: initial results of a GPS survey of Lake Minchin shorelines, *Geophys. Res. Letters*, 21 (4), 293-296
- Blodget T.A., Lenters J.D. et Isacks B.L. 1997. Constraints on the origin of Paleolake Expansions in the Central Andes, *Earth Interactions*, 1, 1-33
- Grosjean M., Schotterer U., Geyh M.A. et Messerli B. 1995. Late Glacial and Early Holocene lake sediments, ground-water formation and climate in the Atacama Altiplano, *J. Paleolimnol.*, 14, 1-12
- Haberle S.G. et Maslin M.A. 1999. Late Quaternary vegetation and climate change in the Amazon basin based on a 50 000 year pollen record from the Amazon fan, ODP site 932, *Quater. Res.*, 51, 27-38
- Hooghmiestra H. et van der Hammen T. 1998. Neogène and Quaternary development of the neotropical rain forest: the forest refugial hypothesis, and a literature overview, *Earth Sci. Rev.*, 44, 147-183
- Mourguiart P., Argollo J., Corrège T., Martin L., Montenegro M.E., Sifeddine A. et Wirrmann D. 1997. Changements limnologiques et climatologiques dans le bassin du lac Titicaca (Bolivie) depuis 30 000 ans, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 325, série IIa, 139-146
- Servant M. et Fontes J.-C. 1978. Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes Boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques, *Cahiers Orstom*, série Géologie, 10 (1), 9-23
- Servant M., Maley J., Turcq B., Absy M.-L., Brenac P., Fournier M. et Ledru M.-P. 1993. Tropical forest changes during the Late Quaternary in African and South American lowlands, *Global and Planetary Changes*, 7, 25-40
- Servant M., Fournier M., Argollo J., Servant-Vildary S., Sylvestre F., Wirrmann D. et Ybert J.-P. 1995. La dernière transition glaciaire/interglaciaire des Andes tropicales sud (Bolivie) d'après l'étude des variations des niveaux lacustres et des fluctuations glaciaires, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 320, série IIa, 729-736
- Sylvestre F. 1997. La dernière transition glaciaire-interglaciaire (18 000-8 000 <sup>14</sup>C BP) des Andes tropicales sud (Bolivie) d'après l'étude des diatomées, *Thèse*, Muséum national d'histoire naturelle, Paris, 317 p.
- Sylvestre F., Servant M., Servant-Vildary S., Causse C., Fournier M. et Ybert J.-P. 1999. Lake-level chronology on the southern bolivian Altiplano (18-23°S) during Late-Glacial time and the Early Holocene, *Quater. Res.*, 51, 54-66
- Troll C. et Finsterwalder R. 1935. Die Karten der Cordillera Real und des Talkssels von La Paz, *Petterm. Mitt.*, 81, 393-399
- Wirrmann D., Ybert J.-P. et Mourguiart P. 1992. A 20 000 years palaeohydrological record from Lake Titicaca, in : Dejoux C. et Iltis A. (éds), *Lake Titicaca, a synthesis of limnological knowledge*, Kluwer Acad. Pub., Dordrecht, 40-48
- Ybert J.-P. 1992. Ancient lake environments as deduced from pollen analysis, in : Dejoux C. et Iltis A. (éds), *Lake Titicaca, a synthesis of limnological knowledge*, Kluwer Acad. Pub., Dordrecht, 49-62