

**GÉOLOGIE.** — *Interprétation paléoclimatique des oscillations des glaciers au cours des 20 derniers millénaires dans les régions tropicales; exemple des Andes boliviennes.* Note de **Philippe Gouze, Jaime Argollo, Jean-François Saliège et Michel Servant**, présentée par **Georges Millot**.

Une quinzaine de datations  $^{14}\text{C}$  réalisées sur des tourbes précisent la chronologie des moraines du Quaternaire récent. Le dernier maximum glaciaire, entre 28 000 et 14 000 ans B.P., fut suivi, d'abord par un ample recul des glaces, ensuite par une série de phases de stationnement ou d'avancées mineures des fronts glaciaires et enfin par un retrait très rapide vers 10 000 ans B.P. A partir de cette date, et jusqu'à 500 ans B.P. environ, les limites des glaciers furent proches de leurs limites actuelles. Des avancées récentes ont culminé vers le xv<sup>e</sup> siècle et se sont maintenues au moins jusqu'au xviii<sup>e</sup> siècle de l'ère chrétienne. Les modifications du volume des glaces depuis 20 000 ans B.P. semblent liées plus à des changements de la hauteur des précipitations qu'à des variations de la température.

**GEOLOGY.** — Paleoclimatic interpretation of glacial oscillations during the last 20,000 years in the tropical regions; example of the bolivian Andes.

*The minimum and maximum ages of the different late Quaternary moraines are given by sixteen  $^{14}\text{C}$  dating on peats. The last pleniglacial (28,000-14,000 years B.P.) was followed by an extensive ice retreat, secondary by a succession of minor readvances of the ice fronts and finally by an abrupt retreat reaching its maximum towards 10,000 years B.P. Later, up about 500 years B.P., the ice limits were close to those observed nowadays. Recent readvances reached their maximum after 500 years B.P. and were still observed at least up to the xviii<sup>th</sup> century. The modifications of the ice volumes since 20,000 years B.P. seem to be due to precipitations changes rather than to variations of the temperatures.*

**INTRODUCTION.** — Les oscillations relatives des glaciers du Quaternaire dans les régions tropicales de haute altitude sont bien apparentes dans la morphologie des anciennes vallées glaciaires de la Cordillère des Andes [1], mais seules quelques unes d'entre elles ont pu être datées avec une bonne précision, et cela dans un nombre limité de régions, principalement au Pérou, en Bolivie et en Equateur ([2], [3]). D'un point de vue climatique on commence toutefois à discerner les mécanismes de ces mouvements glaciaires, notamment par des études au Mexique [4], et par des essais de modélisation des bilans en eau sur l'Altiplano péruano-bolivien [5]. Ces résultats suggèrent que les glaciers seraient surtout sensibles à des variations de la hauteur des précipitations plutôt qu'à des fluctuations de température. Les Andes boliviennes (14-20° lat. S.) sont particulièrement favorables à l'examen du problème. En effet, les glaciers de cette chaîne de montagnes, dont les sommets dépassent 6 000 m d'altitude, se situent en amont de grands bassins lacustres endoréïques (Altiplano) qui ont enregistré d'importantes modifications des bilans en eau durant le Quaternaire récent. Une comparaison entre les oscillations lacustres et les oscillations glaciaires peut donc contribuer à une interprétation paléohydrologique. C'est ce qui sera esquissé ici avec la reconstitution des étapes majeures des oscillations glaciaires de la Cordillère d'Apobamba et de la Cordillère Royale (14-16° lat. S.). La chronologie est établie à partir de 16 datations au  $^{14}\text{C}$  de tourbes fossiles (tableau).

**I. LES ÉTAPES MAJEURES DES OSCILLATIONS GLACIAIRES. DATATIONS.** — Nos observations sur le versant ouest de la Cordillère Royale, de même qu'une étude géomorphologique antérieure [6], permettent d'identifier quatre groupes principaux de moraines dans les anciennes vallées glaciaires du Quaternaire récent (fig. 1). Chacun d'eux comprend plusieurs générations de moraines, mais il est difficile pour le moment d'en établir une stratigraphie détaillée et représentative au plan régional.

des sédiments organiques datés d'au moins 27 000 ans B.P. ([7], [8]); un âge  $^{14}\text{C}$  d'environ 16 600 ans B.P. déterminé sur une tourbe remaniée dans ces moraines indiquerait, s'il venait à être confirmé, que la dernière extension maximale des glaciers a eu lieu après cette date ([9], [10]). Dans le Sud du Pérou (Cordillère de Vilcanota), elle se situe après  $28\,560 \pm 700$  et avant  $14\,010 \pm 185$  ans B.P. [2]. Suivant la terminologie adoptée en Bolivie, ces moraines correspondent au dernier maximum de la glaciation Choqueyapu [11], qui est l'équivalent du Würm d'Europe.

2. Le deuxième groupe ( $M_2$ ) est très complexe dans le détail. Il marque une série de phases de stationnement ou d'avancées mineures qui ont suivi un retrait d'environ 300 m en altitude du front des glaciers. Des dépôts organiques, localisés immédiatement en arrière de ces moraines, sont datés de 10 000 ans B.P. environ ([8], [10]) ce qui indique que les dépôts glaciaires  $M_2$  sont antérieurs à cet âge et datent probablement du Pleistocène.

3. Le troisième ensemble ( $M_3$ ), assez proche du précédent en altitude mais le plus

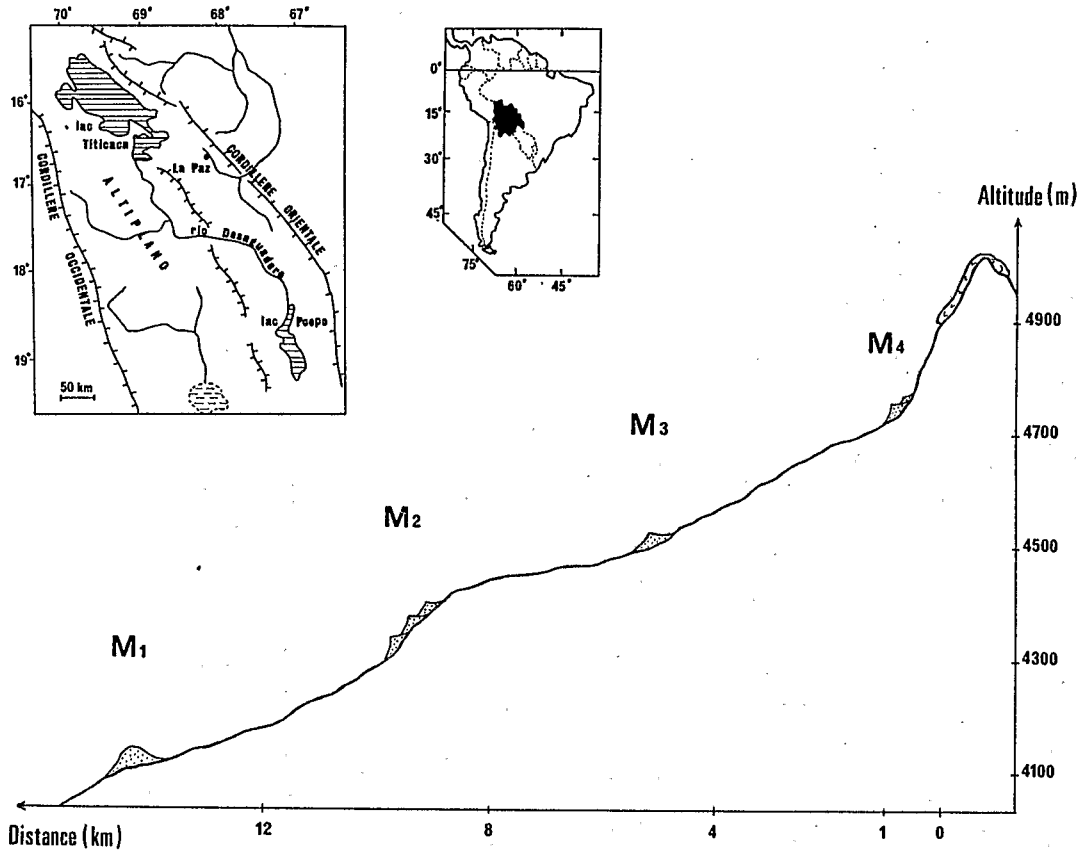


Fig. 1

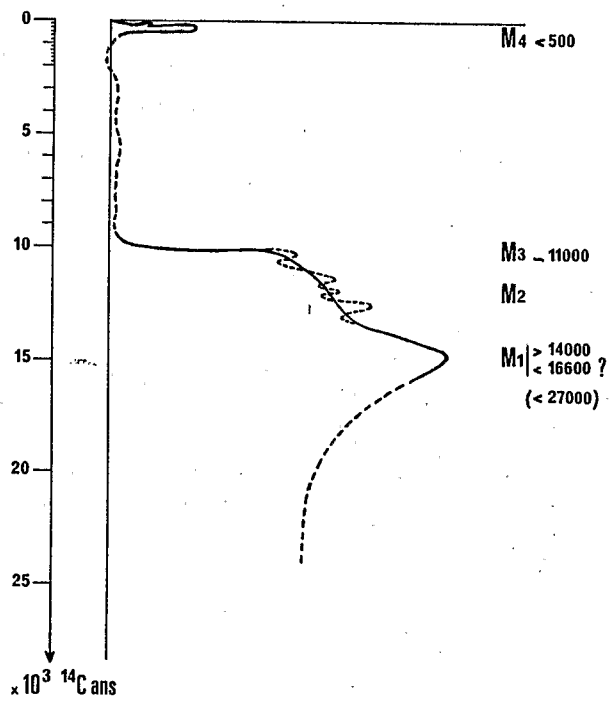


Fig. 2

PLANCHE II/PLATE II

T A B L E A U

- Liste des échantillons datés par la méthode  $^{14}\text{C}$
- Radiocarbon age determinations of samples.

H <sub>1</sub>	500±80	16°03'30"	68°18'20"	4800	Tourbe recouverte par une moraine M4 (Hichu-Kkota)
----------------	--------	-----------	-----------	------	---

que les glaciers se situaient en permanence en amont de la tourbière durant cet intervalle de temps. Une étude récente dans la Cordillère de Quimsa Cruz en Bolivie (16-17° lat. S) confirme ces résultats [12].

Ces observations nous conduisent à considérer que durant la plus grande partie de l'Holocène (10 500-500 ans B.P.), les glaciers sont restés à des niveaux proches de l'actuel, en dépit de fluctuations mineures qui ne sont pas datées avec précision.

5. Un dernier groupe de moraines ( $M_4$ ), que l'on observe partout dans la partie sommitale des vallées de la Cordillère Orientale, se situe à 100, parfois 200 m en contrebas des fronts actuels. Il surmonte les formations marécageuses holocènes, dont celle de Hichu-Kkota (4 240-500 ans B.P.), où l'une de ces moraines remanie des tourbes datées de 220 ans B.P. La présence de ces dépôts glaciaires révèle l'existence d'une ultime avancée qui aurait débuté après le XIV<sup>e</sup> siècle de l'ère chrétienne et se serait prolongée avec des oscillations mineures, au moins jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle, voire le début du XIX<sup>e</sup> siècle.

## II. LES FACTEURS CLIMATIQUES DE L'ÉVOLUTION DES GLACIERS. PREMIÈRES INTERPRÉTATIONS.

— Les données précédentes définissent les tendances majeures des oscillations glaciaires au cours des 20 derniers millénaires en Bolivie (*fig. 2*).

1. Un premier recul de grande amplitude a débuté un peu avant 14 000 ans B.P. et probablement après 16 600 ans B.P.; il fut accompagné par un ravinement actif des versants en dessous de  $4\,200 \pm 100$  m d'altitude ([8], [9]). La présence des moraines  $M_2$  et  $M_3$  abandonnées par les glaciers et attribuées au Pleistocène prouve que ce vaste retrait fut momentanément interrompu par des phases de stationnements ou d'avancées mineures des glaciers. Cette amélioration temporaire des bilans glaciaires coïncide avec de fortes élévations du niveau des lacs de l'Altiplano entre 12 500 et 11 000 ans B.P. environ (extension lacustre TAUCA [7]), élévations dont l'origine est attribuée à des pluies d'environ 200 mm/an supérieures à leurs valeurs actuelles [5]. Cette augmentation des précipitations a pu déterminer une meilleure alimentation des glaciers; corrélativement, une diminution des températures, suggérée par des études géomorphologiques [8] a pu participer à la moindre ablation des glaciers.

2. Un deuxième retrait de grande amplitude a conduit les glaciers dans une position proche de l'actuelle vers 10 000 ans B.P. Au Pérou, une tourbe datée de  $9\,980 \pm 255$  ans B.P. se situe à proximité immédiate du glacier actuel, indiquant ainsi que la position de ce dernier était voisine de celle qu'il occupe aujourd'hui [2]. Le volume réduit des glaces s'est maintenu avec des oscillations mineures encore mal connues, pendant l'Holocène

principale de la dernière avancée des glaciers, même si l'éventualité des variations de température n'est pas à exclure.

CONCLUSIONS. — (1) Après le dernier maximum glaciaire, postérieur à 28 000 ans B.P. et antérieur à 14 000 ans B.P. environ dans la Cordillère Orientale des Andes péruano-boliviennes, le recul des glaciers à la fin du Pléistocène fut interrompu par une série de phases de stationnements ou d'avancées déterminées par une amélioration des bilans en eau sur les bassins de l'Altiplano.

(2) Les glaciers furent en permanence réduits pendant la presque totalité de l'Holocène, malgré plusieurs périodes de refroidissement. Cette situation s'explique par une sécheresse plus marquée qu'actuellement.

(3) Une ultime avancée des glaces, reconnue dans toutes les Andes Centrales, a culminé au cours des derniers siècles (XIV-XVIII<sup>e</sup> siècle). Elle est suivie d'un retrait récent, nettement postérieur au XVIII<sup>e</sup> siècle.

(4) D'un point de vue paléoclimatique, il semble que ces étapes majeures de l'évolution des glaciers soient liées d'abord à des modifications des hauteurs de précipitations, le rôle de la température, bien qu'encore difficilement évalué, n'étant sans doute que secondaire.

Reçue le 12 mai 1986.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. SERVANT, *Bull. A.F.E.Q.*, 1, 50, 1977, p. 323-327.
- [2] J. H. MERCER et M. PALACIOS, *Geology, U.S.*, 5, 10, 1977, p. 600-604.
- [3] S. HASTENRATH, *The glaciation of the Ecuadorian Andes*, Balkema, 1981, 159 p.
- [4] K. HEINE, *Catena*, 10, 1/2, 1983, p. 1-25.
- [5] S. HASTENRATH et J. KUTZBACH, *Quaternary Research*, 24, 1985, p. 249-256.
- [6] M. NOGAMI, *Geographical Review of Japan*, 43, 1970, p. 338-346.
- [7] M. SERVANT et J. C. FONTES, *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Géol. X, 1, 1978, p. 9-23.
- [8] M. SERVANT et J. C. FONTES, *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Géol. XIV, 1, 1984, p. 15-28.
- [9] M. SERVANT, J. C. FONTES, J. ARGOLLO et J. F. SALIEGE, *Comptes rendus*, 292, série II, 1981, p. 1209-1212.
- [10] J. ARGOLLO, *Thèse de 3<sup>e</sup> Cycle*, Université d'Aix - Marseille-II, 1982, 110 p.