

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}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^e siècle et se sont maintenues au moins jusqu'au XVIII^e 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}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 XVIIIth 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 endoréiques (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'Apolobamba et de la Cordillère Royale (14-16° lat. S.). La chronologie est établie à partir de 16 datations au ^{14}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.

1. Le premier groupe (M1) se situe en moyenne à 1 000 m en dessous de l'altitude actuelle des fronts des glaciers. Ces dépôts sont peu érodés et reposent localement sur

des sédiments organiques datés d'au moins 27 000 ans B.P. ([7], [8]); un âge ^{14}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 souvent éloigné en distance, n'est pas encore bien situé stratigraphiquement. Toutefois, l'agencement des dépôts dans le paysage montre que l'abandon des moraines M_3 par le glacier de l'époque fut postérieur à celui des moraines M_2 . Des travaux effectués au Pérou ont mis en évidence, comme en Bolivie, plusieurs avancées mineures des glaciers postérieures à 14 000 ans B.P. environ, la dernière ayant culminé vers 11 000 ans B.P. [2]; les moraines M_3 pourraient correspondre à cette ultime oscillation du Pleistocène. Les dépôts glaciaires M_2 , attribués également au Pleistocène, seraient donc antérieurs à 11 000 ans B.P..

4. Une étude détaillée de la partie haute des profils longitudinaux montre que les fonds des vallées furent le siège d'une sédimentation marécageuse à proximité des glaciers actuels. Ainsi sur les sites de Cañuma, Cololo, Sayhuani et Puyupuyu dans la Cordillère d'Apolobamba, les dépôts, le plus souvent tourbeux, affichent des âges ^{14}C compris entre 10 510 et 7 490 ans B.P. Toutefois, des oscillations glaciaires de faible amplitude ont pu se produire, si l'on en juge par la présence d'argiles à blocs, peut-être attribuables à de petites avancées, au voisinage immédiat des glaciers actuels sur les sites de Puyupuyu et Cololo. Ces argiles sont postérieures à 7 490 et 8 475 ans B.P.; elles sont surmontées par des couches organiques datées de 1 760 et 1 110 ans B.P. Dans la Cordillère Royale, à Hichu-Kkota, une ancienne tourbière située en altitude à moins de 100 m du glacier actuel est datée de 4 240 ans B.P. à la base et de 500 ans B.P. au sommet. Les dépôts, épais de 4,60 m, ne présentent aucune discontinuité de sédimentation; on peut conclure

EXPLICATIONS DE LA PLANCHE

Fig. 1. — Diagramme schématique indiquant les positions et altitudes moyennes des moraines (M) dans quelques vallées de la Cordillère Orientale de Bolivie.

Fig. 1. — Diagram showing the positions and mean altitudes of the moraines (M) in some valleys of the Eastern Cordillera in Bolivia.

Fig. 2. — Étapes majeures des oscillations glaciaires dans la Cordillère Orientale de Bolivie depuis 20 000 ans B.P. environ. (L'échelle des abscisses n'est pas précisée car l'altitude de chaque génération de moraines varie selon les vallées.)

Fig. 2. — The main stages of the glacial oscillations in the Eastern Cordillera of Bolivia during the last 20,000 years. (The scale of the abscissae is not specified, for the altitude of each generation of moraines varies with the valleys.)

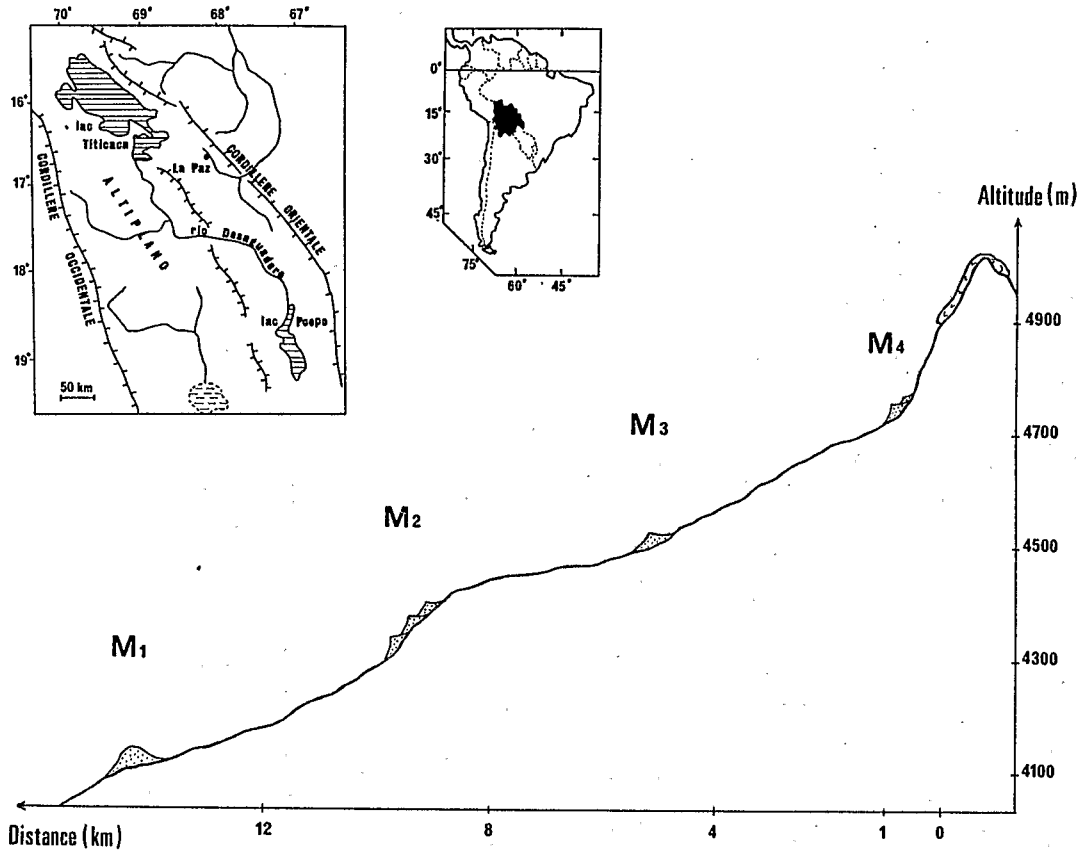


Fig. 1

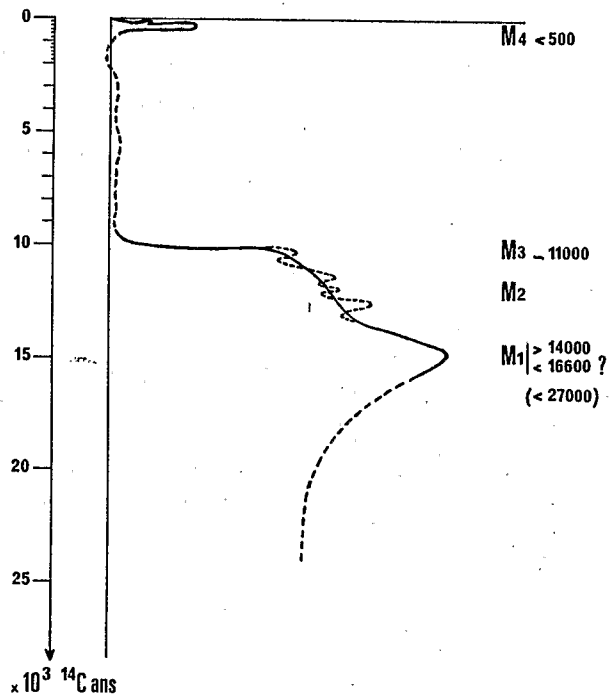


Fig. 2

PLANCHE II/PLATE II

T A B L E A U

- Liste des échantillons datés par la méthode ^{14}C

- Radiocarbon age determinations of samples.

N°	Ans B.P.	Lat.S.	Long.W.	Alt.m	Position stratigraphique
T.540	220±50	16°03'30"	68°18'20"	4805	Tourbe remaniée dans une moraine M ₄ (Hichu-Kkota)
H ₁	500±80	16°03'30"	68°18'20"	4800	Tourbe recouverte par une moraine M ₄ (Hichu-Kkota)
T.545	1110±60	14°58'30"	69°07'	4860	Tourbes recouvrant des argiles à blocs d'origine glaciaire (?)
T.544	1760±90	14°58'30"	69°07'	4860	(Puyupuyu).
MS-J-150	3120±150	16°08'	68°21'	4365	Tourbe en amont du lac Khara Kkota (Hichu-Kkota)[15]
T.7.	4240±85	16°03'30"	68°18'20"	4800	Base d'une tourbière recouverte par une moraine M ₄ (Hichu-Kkota).
T.543	7490±110	14°58'30"	69°07'	4860	Tourbe recouverte par une moraine postérieure à M ₃ (Puyupuyu)
T.539	8365±200	14°47'	69°11'30"	4940	Tourbe recouverte par une moraine postérieur à M ₃ (Sayhuani)
T.535	8475±200	14°47'	69°10'30"	4810	Tourbes recouvrant des argiles à blocs d'origine glaciaire(?) Cololo
T.519	8975±200	15°00'30"	69°04'	4760	Tourbe recouverte par une moraine M ₄ (Cañauma)
MS-80-15	9915±81	16°26'	68°03'	4120	Tourbes situées au-dessus de moraines M ₂ (Rio Chuquiaguillo)[9]
42	10020±160	19°15'	68°20'	3660	Dalle calcaire de Coipasa[8]
126	10380±180	19°35'	67°18'	3660	Dalle calcaire de Salinas Garcia Mendoza [8]
T.520	10510±140	15°02'	69°07'	4630	Tourbes situées au-dessus des moraines M ₃ (Cañauma).
MS-79-2A	16610±130	17°21'	68°48'	3700	Tourbe remaniée dans une moraine M ₁ (Rio Kollpaña) ([9]; [11]).
MS-79-5	27000±1200	17°21'	68°48'	3700	Tourbe recouverte par une moraine M ₁ (Rio Kollpaña).([9], [11]).

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^e siècle de l'ère chrétienne et se serait prolongée avec des oscillations mineures, au moins jusqu'au XVIII^e siècle, voire le début du XIX^e 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 au moins jusqu'à 500 ans B.P. Parallèlement les lacs du Sud de l'Altiplano se sont partiellement asséchés vers 10 000 ans B.P. A la même époque, le niveau du lac Titicaca se situait en dessous de son altitude actuelle ([16] à [18]). Or l'histoire de l'Holocène est marquée par plusieurs phases de refroidissement climatique, comme le démontre l'étude des terrasses fluviales [8], les associations de spores et de pollens [14] et les diatomées [15], mais ces refroidissements n'ont semble-t-il pas eu de conséquences majeures sur les bilans glaciaires, ce qui indique que la réduction de ces derniers est surtout due à des conditions climatiques sèches.

3. L'avancée glaciaire des derniers siècles est reconnue partout dans la Cordillère des Andes. Elle coïncide au Pérou avec une période humide (1 500-1 720 ans après J.C.; [2], [19]); pour la même époque en Bolivie, la présence de traces de ravinement actif des versants ([8], [9]), ainsi que la remontée du lac Titicaca [17] sont démontrées. Compte tenu de ces résultats il semble qu'une augmentation des précipitations soit la cause

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^e siècle). Elle est suivie d'un retrait récent, nettement postérieur au XVIII^e 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^e Cycle*, Université d'Aix - Marseille-II, 1982, 110 p.
- [11] C. TROLL et R. FINSTERWALDER, *Petermanns geogr. Mitt.*, 81, 1935, p. 393-399.
- [12] R. MULLER, *Zur Gletschergeschichte in der Cordillera Quimsa Cruz*, Univ. Zürich, 1985, 188 p.
- [13] G. H. DENTON et W. KARLEN, *Quaternary Research*, 14, 1973, p. 19-30.
- [14] J. P. YBERT, *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Géol. XIV, 1, 1984, p. 29-34.
- [15] S. SERVANT-VILDARY, *Acta Geologica Academiae Hungaricae*, 25, 1-2, 1982, p. 179-210.
- [16] C. VARGAS, *Thèse de 3^e Cycle*, Université de Bordeaux-I, 1982, 91 p.
- [17] D. WIRRMANN, *Une période Holocène de bas niveau du lac Titicaca, Bolivie*, en préparation.
- [18] P. MOURGUIART, P. CARBONEL, J. P. PEYPOUQUET, D. WIRRMANN et C. VARGAS, proposé à *Hydrobiologia*.
- [19] L. G. THOMPSON, E. MOSLEY-THOMPSON, J. F. BOLZAN et B. R. KOZI, *Science*, 229, 1985, p. 971-973.

Ph. G.; M. S. : Centre O.R.S.T.O.M., 70-74, route d'Aulnay, 93140, Bondy;
 J. A. : Instituto de Geociencias, U.M.S.A.,
 Casilla 8653, La Paz, Bolivie;
 J. F. S. : Laboratoire de Géologie Dynamique, Université Pierre-et-Marie-Curie,
 4, place Jussieu, 75505 Paris.