

Variations de température estimées à partir du déplacement en altitude des associations de diatomées dans une séquence holocène de la Cordillère Orientale de Bolivie

Simone SERVANT-VILDARY et Maurice ROUX

Résumé — Les températures moyennes annuelles sont estimées à partir du déplacement en altitude des assemblages de diatomées au cours de l'Holocène. Elles sont proches des valeurs actuelles entre 9 000 et un peu avant 4 200 ans B.P. Après cette date, d'amples oscillations se superposent à une nette tendance au refroidissement.

Holocene temperature changes inferred from altitudinal diatom assemblage shifts in the Oriental Cordillera of the Bolivian Andes

Abstract — Mean annual paleotemperatures are estimated from the altitudinal shifts of fossil diatom assemblages, compared with their present altitudinal zonation. The results suggest that temperature was close to the present one between 9,000 and 5,000 years B.P. From 5,000 years B.P., the climate was colder than present, with large amplitude oscillations.

Abridged English Version — In mountainous aquatic environments, diatom assemblages show a zonal distribution. The altitude represents a stable factor easily measurable and not submitted to high daily changes as temperature is. Modern diatom analogs are identified from measured altitude sites and the fossil diatom up and down-slope shifts, inferred from compared fossil assemblage altitude (apparent altitude) and the modern one, are considered as related to climatic changes during the time.

In the Eastern Cordillera of the Andes, 150 km NE of La Paz city (Fig. 1) the Ichu Kkota glacial valley is scattered by four lakes located at different altitude, between 4,200 and 4,850 m. Lakes and intercalated peat-bogs are fed by the surrounding glacier water of very low mineral content [9]. Surficial sediments samples were taken along the valley at different altitudes for diatom analysis [7] in the peat-bogs and on the margins of the lakes, under 20 cm water-depth. Present diatom zonation is considered as closely related to the present temperature one, because a linear relation appears between altitude and temperature.

Fossil flora is studied in a 1,070 cm deep record at 4,310 m elevation, covering the whole of Holocene time [5]. Amplitudes of the altitudinal shifts of the fossil diatom assemblages are then considered as related to the amplitudes of climatic modifications which occurred during the period of time. The inferred apparent altitudes are translated in terms of temperature by the use of a temperature gradient of 0.54°C/100 m, determined from 20 values measured in the soils at 80 cm depth where temperature is stable ([4], [10], [11]).

As in the classical work of Imbrie and Kipp [12], we derive the apparent altitude through a two stages process. In the first one (calibration) a transfer function is established as a linear relation between floristic data and the altitude. In the second stage the linear formula is applied to the fossil records. Nevertheless, the use of the multiple linear regression in the calibration stage is not straightforward because the number of species exceeds the number of observations. Usually this problem is overcome by using Principal Components Analysis to reduce the dimensionality. Our purpose is to improve this preliminary step by using Reciprocal Averaging (R.A.) (Correspondence Analysis) and constraining the new factorial

Note présentée par Claude LORIUS.

0764-4450/90/03110429 \$ 2.00 © Académie des Sciences

axes to be related to the parameter to be analysed [6], here the altitude (*Fig. 2*). This goal can be reached through the building of a particular data table that contains, for each species, its mean value among the observations that belong to a given class of altitude. Furthermore, using the auxiliary technique of "supplementary elements" ([13], [14]), it is possible to get the coordinates of the modern observations in the new system of axes.

In our case only the first axis of R. A. proved to be sufficient as independent variable, as it provided a correlation coefficient equal to 0.923 (accounting for 85% of the altitude variance). The distribution of the residuals (*Fig. 3*) could be considered as Gaussian. Allowing for the calculation of a 5% confidence interval [15]. Thus, the error of the apparent altitude is estimated as ± 170 m, that is about $\pm 0.9^\circ\text{C}$ (taking as granted a gradient of 0.54°C by 100 m).

The results (*Fig. 4*), generally agree with temperatures obtained from pollen analysis in Europe and South America ([1] to [3], [16] to [18]). 1. During the Early and Middle Holocene (from before 9,010 to 5,000 years B.P.), temperature was close to the present one. Estimation of these values are not so precise, due to the absence of modern analogs in altitudes lower than 4200 m elevation. They are observed from the base of the core, 1045 cm to 290 cm. 2. Then temperature was slightly lower than to day, with a strong decrease at 275 cm, just before 3,150 years B.P. and at 140 and 40 cm, just after 3,150 years. These data agree with former European and South American temperature evaluations.

I. INTRODUCTION. — Les évaluations des paléotempératures quaternaires sur les continents ont été obtenues jusqu'à présent à partir d'études palynologiques aux moyennes et hautes latitudes ([1], [2], [3]). Nous montrerons ici, sur l'exemple des Andes boliviennes, que les diatomées peuvent aussi être utilisées comme marqueurs de température. La méthodologie que nous proposons est basée sur l'hypothèse qu'en montagne, les algues aquatiques sont, comme la végétation terrestre, liées au gradient thermique altitudinal ([4], [5]). L'approche mathématique utilisée est la même que celle déjà employée dans une étude antérieure [6].

II. DESCRIPTION ET CARACTÉRISTIQUES DU SITE. — L'étude concerne une vallée glaciaire de haute altitude : la vallée d'Ichu Kkota ($16^\circ 07'$ Lat. S, $69^\circ 25'$ Long. W) qui s'étend sur 20 km de long dans la Cordillère Orientale de Bolivie (*fig. 1*). De grandes tourbières et quatre lacs se sont installés lors du retrait des glaciers à la fin du Pléistocène. Les lacs sont situés respectivement à 4850, 4680, 4450 et 4310 m d'altitude. Les diatomées actuelles ont été étudiées sur des échantillons prélevés dans les sédiments superficiels [7]; ils représentent chacun plusieurs années de sédimentation et fournissent de ce fait une image moyenne de la flore. Cela permet de négliger la variabilité horaire, journalière et saisonnière des paramètres qui contrôlent les associations de diatomées. Ce sont principalement : la température, le pH, la profondeur et la salinité [8]. Pour isoler la température, il faut pouvoir neutraliser les autres paramètres : 1. La profondeur est un facteur que nous avons éliminé en échantillonnant uniquement sous une tranche d'eau constante (20 cm). 2. La salinité est ici négligeable parce qu'elle est très faible (inférieure à 30 mg l^{-1}) et qu'elle ne présente pas de variations significatives entre le haut et le bas de la vallée [9]. Toutefois à moins de 4200 m d'altitude, les eaux s'écoulent dans une zone morphologiquement très différente — l'Altiplano — et évoluent vers de plus fortes salinités. Nous ne les avons pas prises en compte dans cette étude. 3. En raison de leur

très basse teneur en sels dissous, les milieux aquatiques étudiés sont faiblement tamponnés. Il en résulte que le pH est contrôlé pour l'essentiel par la température et les activités biologiques qui lui sont liées.

Les températures moyennes annuelles de l'atmosphère ont été évaluées, comme cela se pratique couramment en haute montagne, en mesurant les températures des sols [4]. Une vingtaine de mesures, faites à 80 cm de profondeur et à différentes altitudes, montrent que le gradient thermique altitudinal est de $0,54^{\circ}\text{C}$ pour 100 m [10]. Cette valeur est proche des valeurs calculées pour l'ensemble des Andes boliviennes [11]. De multiples mesures faites au cours des 10 dernières années montrent une diminution de la température aquatique du bas vers le haut de la vallée. Elles ne permettent pas cependant une évaluation précise du gradient thermique moyen parce qu'elles sont fortement dépendantes de la grande variabilité horaire et journalière des températures en montagne. Dans ces conditions, il est justifié de relier les associations de diatomées à l'altitude et d'évaluer ensuite la température moyenne en fonction du gradient thermique altitudinal déterminé par les mesures dans les sols.

III. MATÉRIEL D'ÉTUDE. — Les associations fossiles ont été étudiées dans le sondage J, réalisé avec une tarière hélicoïdale, près du lac Khara Kkota à 4310 m d'altitude. Les échantillons ont été prélevés sur la pointe de la tarière afin de se prémunir d'un risque de mélange entre différents niveaux stratigraphiques. Ces précautions expliquent que notre échantillonnage ne soit pas très serré. Dans le sondage, on distingue de haut en bas trois principales unités stratigraphiques : (1) de 0 à 159 cm, tourbe argileuse; (2) de 159 à 190 cm, sable grossier; (3) de 190 à 1070 cm, argile avec débris végétaux dans la partie supérieure. Deux échantillons ont été datés par le ^{14}C . Situés à 1020 et 150 cm (*fig. 4*), ils affichent respectivement $9\,010 \pm 75$ et $3\,150 \pm 150$ ans B.P. D'autres sondages, réalisés à proximité du précédent, traversent les mêmes unités, mais la couche de sable grossier peut se situer à des profondeurs parfois un peu plus grandes. Deux âges, en bon accord avec les précédents, ont été déterminés au-dessus de la couche sableuse : $3\,250 \pm 120$ ans B.P. à 145 cm dans le sondage A, $4\,190 \pm 230$ ans B.P. à 165 cm dans le sondage J2.

IV. MÉTHODES. — On suppose qu'une association de diatomées « D » de cette vallée, vivant actuellement à une altitude « A », se situait à la même altitude pendant les périodes du Quaternaire caractérisées par des températures proches de l'actuel. Cette association s'est déplacée vers le bas de la vallée pendant les périodes de refroidissement ou vers le haut de la vallée pendant les périodes de réchauffement. La nouvelle altitude A_a est appelée « altitude apparente » (A_a) (car l'altitude ne change pas, c'est l'association qui se déplace) et la différence entre A et A_a est considérée alors comme une fonction du changement climatique intervenu entre l'époque actuelle et le passé. L'estimation des altitudes apparentes a été faite selon les principes définis par Imbrie et Kipp [12]. Cette estimation est réalisée en deux temps. Dans le premier temps, appelé calibration, on établit une relation linéaire entre les abondances des espèces de diatomées et l'altitude à laquelle elles ont été observées. Dans le deuxième temps, on applique cette formule, appelée fonction de transfert, aux données tirées des échantillons fossiles.

Si la seconde étape ne pose généralement pas de problème, en revanche la première nécessite un traitement intermédiaire; en effet, le nombre de taxons étant généralement beaucoup plus grand que le nombre de relevés, les conditions d'application de la technique statistique usuelle de régression multiple sont défavorables, puisqu'on dispose alors de

plus d'inconnues que d'équations (la solution est donc indéterminée). Pour éviter cet écueil la méthode habituelle est d'effectuer une réduction de dimension par analyse factorielle. Plutôt que d'utiliser de simples résumés de la dispersion floristique, l'originalité de la présente étude est de profiter de cette étape indispensable, pour construire des axes factoriels corrélés avec le paramètre à estimer, ici l'altitude. Pour obtenir de tels axes il faut élaborer, à partir des données recueillies, un tableau particulier appelé « tableau des moyennes par classe d'altitude ». Les lignes de ce tableau sont les espèces répertoriées dans l'ensemble des relevés, au nombre de 261 dans notre étude, tandis que les colonnes sont des classes d'altitudes. Dans notre cas, les altitudes ont été regroupées en cinq classes suivant les intervalles suivants : (1) [4 200-4 300]; (2) [4 300-4 350]; (3) [4 350-4 450]; (4) [4 430-4 750]; (5) [4 750-5 000]. Les effectifs de ces classes sont respectivement 3, 9, 6, 8, 4; soit un total de 30 relevés actuels. Le contenu d'une case (e, k) du tableau est la moyenne des abondances de l'espèce e pour les relevés situés dans la classe d'altitude k . Une colonne k de ce tableau représente donc une sorte de relevé moyen pour la k -ième tranche d'altitudes. Ce tableau est ensuite soumis à l'analyse factorielle des correspondances ([13], [14]) en ayant soin de leur adjoindre des colonnes supplémentaires, passives dans l'analyse, constituées par l'ensemble des relevés qu'ils soient actuels ou fossiles. Cette disposition permet, non seulement d'examiner la dispersion floristique de chacune des classes d'altitude (fig. 2) mais aussi d'obtenir les coordonnées factorielles des échantillons actuels dans le nouveau système d'axes. Ces coordonnées sont ensuite utilisées comme prédicteurs dans la régression.

A ce stade du travail se pose la question du nombre d'axes factoriels à retenir. Le premier axe factoriel a une corrélation de 0,923 avec l'altitude, soit un pourcentage de variance de 85 %. L'introduction d'un axe supplémentaire n'apporterait que 5 % de variance en plus, ce qui nous a semblé insuffisant. Nous avons donc effectué une régression simple de l'altitude en fonction du premier axe de l'Analyse du tableau des moyennes par classe qui donne la relation suivante : $Alt = 4 504,05 + 311,57 F_1$ ou F_1 désigne la coordonnée du relevé sur le premier axe factoriel. Afin de déterminer la précision de l'estimation nous avons procédé à l'analyse des résidus de la régression (écarts entre altitude observée et altitude calculée par la formule). La dispersion observée de ceux-ci ne montre pas d'anomalie particulière (fig. 3). Le test de Lilliefors [15] ne rejette pas leur normalité (il faudrait accepter un risque ≥ 20 % pour rejeter la normalité). On peut donc prendre pour intervalle de confiance à 5 % celui que l'on obtient en prenant l'altitude

EXPLICATIONS DES PLANCHES

Planche I

Fig. 1. — Localisation des prélèvements actuels (points) et du sondage J (étoile) dans la vallée d'Ichu Kkota, Bolivie (16°07' Lat. S, 69°25' Long. W).

Fig. 1. — Location of the modern samples (points) and of the core J (star) in the Ichu Kkota valley, Bolivia (16°07' S. Lat., 69°25' W Long.).

Fig. 2. — AFC sur l'ensemble des relevés en fonction des classes d'altitude (encadré). Les échantillons fossiles sont représentés par leur profondeur en centimètres; les échantillons actuels par des points.

Fig. 2. — RA on all samples and Altitude classes (ALT) Fossil samples are noted by numbers; modern samples by points.

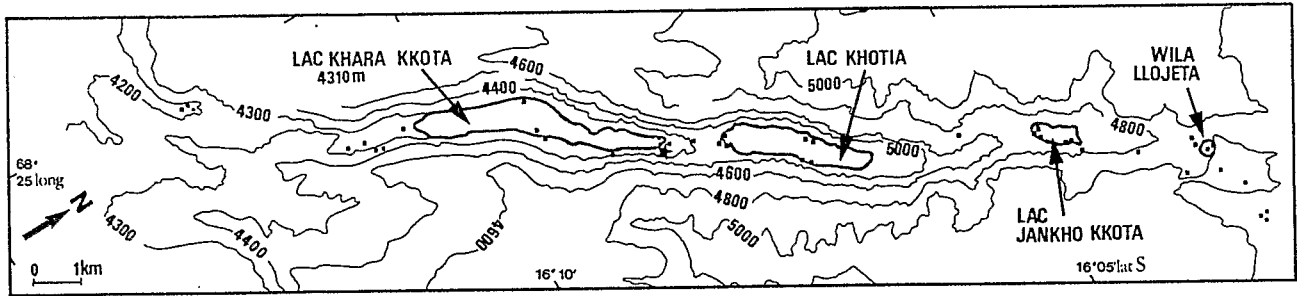


Fig. 1

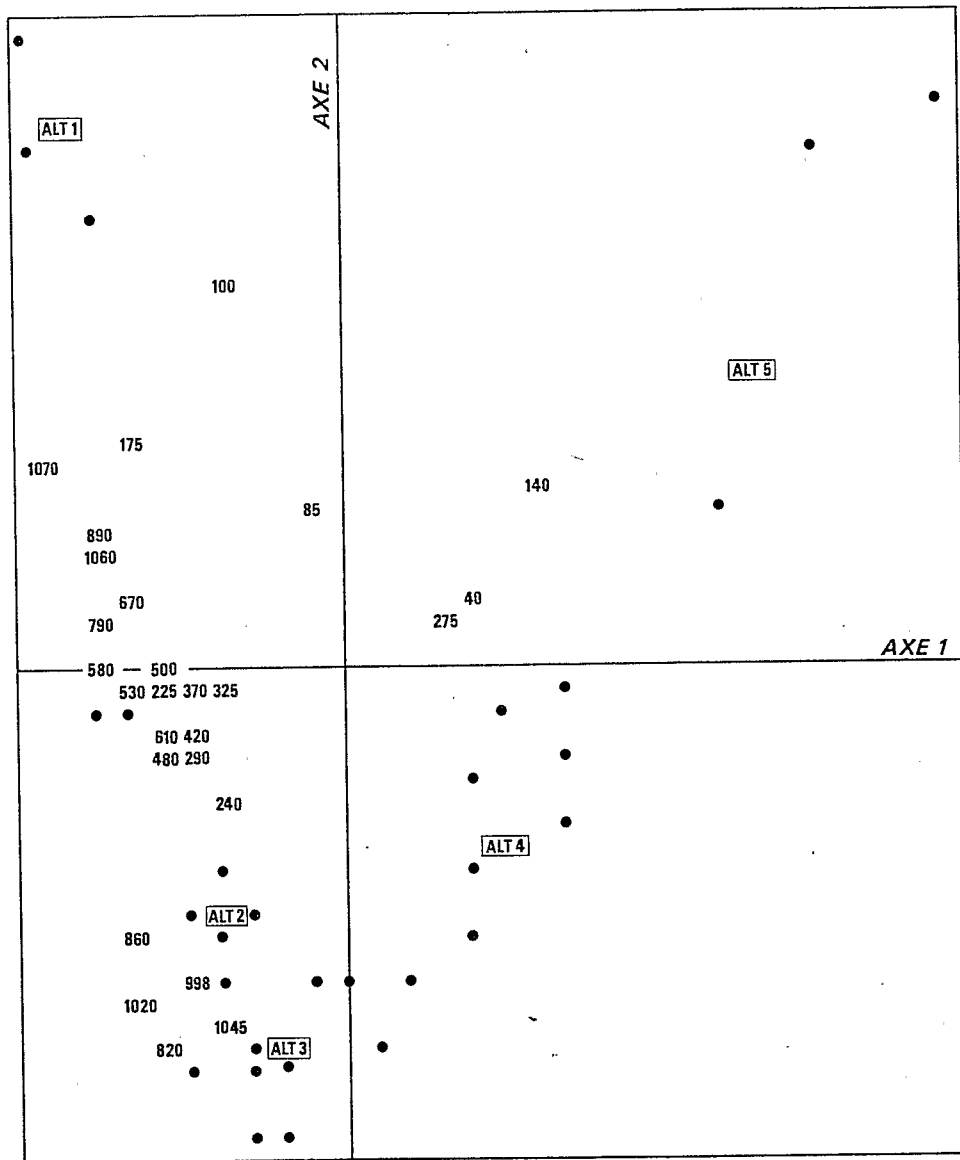


Fig. 2

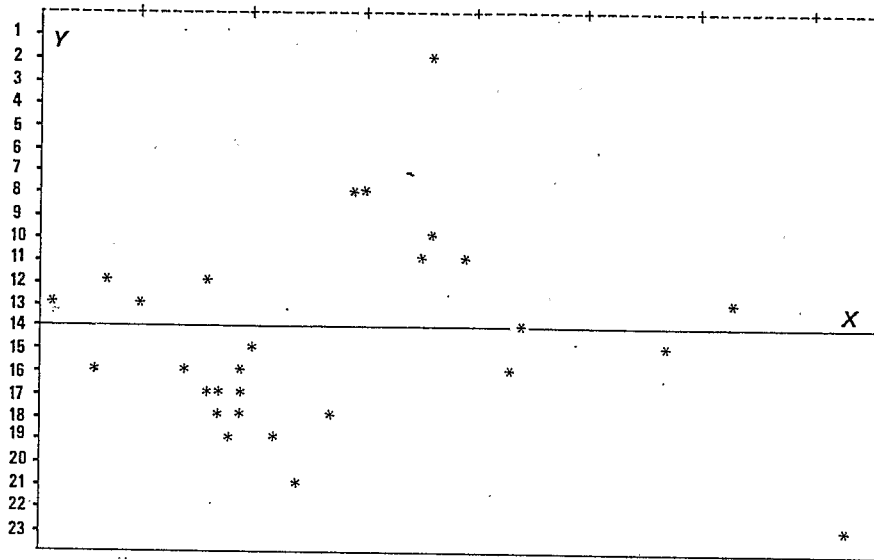


Fig. 3

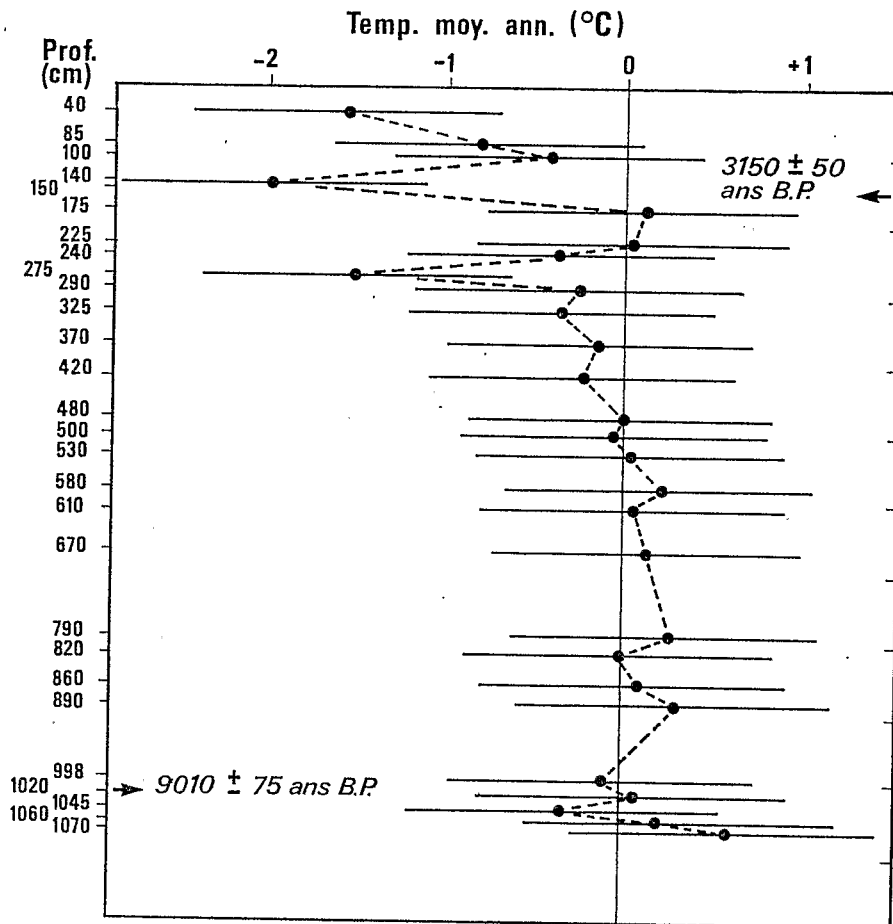


Fig. 4

Planche II

Fig. 3. — Étude des résidus. Valeurs des extremums : $X_{\text{inf}} = 4195.694$ $X_{\text{sup}} = 5050.835$. Axe horizontal X = Estimation de l'altitude. $Y_{\text{inf}} = -180.8345$ $Y_{\text{sup}} = 259.1001$. Axe vertical Y = Valeur du résidu (écart entre la valeur observée et la valeur calculée).

Fig. 3. — *Plots of the residuals of the regression (ordinates) again estimated values of altitude (abscissae).*

Fig. 4. — Reconstruction des variations de la température moyenne annuelle au cours de l'Holocène, écarts par rapport à la température actuelle (8,5°C) à 4310 m d'altitude dans la vallée d'Ichu Kkota, Bolivie.

Fig. 4. — *Reconstruction of variations in mean annual temperature during the Holocene, expressed as deviations from the modern value (8.5°C) at 4,310 m elevation in the Ichu Kkota valley, Bolivia.*

augmentée ou diminuée de 1,96-fois l'écart-type des résidus. Celui-ci étant de 86,26 m, où on déduit que l'altitude apparente est connue à 170 m près. Si on considère que le gradient moyen est de 0,54°C pour 100 m dans cette vallée, cela équivaut à une température connue à $\pm 0,89^\circ\text{C}$, à condition d'admettre que le gradient de température est resté constant.

V. RÉSULTATS. — Deux grandes étapes (fig. 4) peuvent être distinguées dans les variations de température déterminées par l'étude du sondage J: (1) Entre la base du sondage, datée d'environ 9 000 ans B.P. et le niveau 290 cm, les températures sont proches des valeurs actuelles. Une tendance au refroidissement s'amorce au niveau 790 cm et s'accroît nettement entre les niveaux 480 et 290 cm. 2. Entre les niveaux 290 et 40 cm, cette tendance se renforce mais elle est compliquée par d'amples variations de courtes périodes. Un premier maximum de refroidissement apparaît au niveau 275 cm. Nous le situons avant 4 190 ans B.P. par corrélation avec le sondage J2. Une phase caractérisée par des températures proches de leur valeur actuelle est identifiée entre les niveaux 240 et 175 cm. Un deuxième maximum de refroidissement (-2°C par rapport à l'actuel) est identifié dans le niveau 140 cm qui est légèrement postérieur à 3 150 ans B.P. Cette évolution se poursuit par une nouvelle période de réchauffement (225 à 175 cm), suivie d'un refroidissement (40 cm). Dans les 40 derniers centimètres, les diatomées sont absentes. Nous sommes ici en présence d'un sol qui s'est individualisé à la suite d'un retrait du lac.

VI. DISCUSSION. — Les grandes étapes de l'évolution de la température sont clairement établies : la première moitié de l'Holocène a été caractérisée par des températures proches de leurs valeurs actuelles ou légèrement supérieures, la deuxième moitié est marquée par une nette tendance au refroidissement (fig. 4). Les évaluations qui concernent les périodes froides reposent sur une large gamme d'équivalents actuels. Par contre, celles qui concernent les périodes plus chaudes sont peut-être moins précises car nous ne disposons pas d'équivalents actuels en dessous de 4 200 m d'altitude. Dans le détail, nous identifions des oscillations de courtes périodes qui sont particulièrement bien marquées après 5 000 ans B.P. La maille d'échantillonnage et les datations encore plus nombreuses par le radiocarbone, font qu'il est difficile de bien cerner ces oscillations de courtes périodes et d'en établir précisément la chronologie. Une étude en cours, basée sur d'autres sondages plus favorables, leur est consacrée. Nos résultats sont en bon accord avec ce que l'on sait sur les changements de la température à l'Holocène en Amérique du Sud [16]. La période comprise entre 9 500 et 5 000 ans B.P. environ, est caractérisée par des températures proches de l'actuel, avec des valeurs maximales ($+2^\circ\text{C}$) vers 9 000 ans B.P. au Sud du Chili [3] et vers 6 000 ans B.P. en Colombie [17]. A partir de 5 000 ans, une

nette tendance au refroidissement a été mise en évidence à différentes latitudes de la Cordillère des Andes ([18], [3]). Cette tendance est compliquée, comme en Bolivie, par d'amples oscillations de courtes périodes. Dans le Sud du Chili par exemple, des récurrences chaudes sont observées vers 3 000 et 900 ans B.P. [3].

Les évaluations de température que nous proposons pour la Bolivie, semblent également en bon accord avec celles qui ont été faites en Europe. Dans la plus grande partie de l'Europe du Nord [2], les températures de juillet étaient d'environ 2°C supérieures aux valeurs actuelles vers 6 000 ans B.P. En France, les températures moyennes annuelles étaient proches des valeurs actuelles à l'Holocène ancien et/ou moyen. Après 5 000 ans B.P., une tendance au refroidissement est également observée [1].

CONCLUSION. — 1. Cette étude montre que les milieux aquatiques à faible teneur en sels dissous se prêtent, en haute montagne, à une évaluation des paléotempératures par les diatomées. 2. Les évaluations que nous proposons s'ajoutent aux données paléohydrologiques obtenues sur les bassins de l'Altiplano [19]. Elles sont indispensables à une évaluation des variations des bilans en eau. 3. Les analogies observées avec d'autres régions du monde suggèrent que les variations holocènes de température en Bolivie ne sont pas uniquement liées à des conditions climatiques régionales.

Note remise le 7 juin 1990, acceptée le 19 juin 1990.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J. GUIOT, A. PONS, J. L. DE BEAULIEU et M. REILLE, *Nature*, 338, 1989, p. 309-313.
- [2] B. HUNTLEY et I. COLIN PRENTICE, *Science*, 1988, 241, 1988, p. 687-690.
- [3] C. J. HEUSSER et S. S. STREETER, *Science*, 210, 1980, p. 1345-1347.
- [4] T. VAN DER HAMMEN, A. PEREZ PRECIADO et P. PINTO E., J. CRAMER éd., 1983, 345 p.
- [5] S. SERVANT-VILDARY, *Acta Geol. Acad. Scientiarum Hungaricae*, 25, n° 1-2, p. 179-210.
- [6] M. ROUX et S. SERVANT-VILDARY, *Hydrobiologica* (sous presse).
- [7] S. SERVANT-VILDARY, *Cahiers de Micropaléontologie*, 1, n° 3 et 4, 1986, p. 99-124.
- [8] J. D. WERNER, *Botanical Monographs Blackwell Scientific Publ.*, 13, 1977, 498 p.
- [9] A. ILTIS, Informe Convenio U.M.S.A.-ORSTOM, n° 14, 1988, 50 p.
- [10] C. OSTRIA, *Thèse Sci.*, Université de Paris-VI, 1987, 180 p.
- [11] F. SHERIFF, *Revista Geografica*, 89, 1979, p. 45-68.
- [12] J. IMBRIE et J. KIPP, in *The Late Cenozoic glacial ages*, K. TUREKIAN éd., Yale University Press, New Haven, 1971, p. 71-181.
- [13] J. P. BENZECRI et coll., *L'Analyse des correspondances*, Dunod, Paris, 1973, 619 p.
- [14] M. J. GREENACRE, *Acad. press*, 1984, 364 p.
- [15] H. W. LILLIEFORS, *Journal of the American Statistical Association*, 62, p. 399-402.
- [16] V. MARKGRAF, *Quaternary Science Reviews*, 8, 1989, p. 1-24.
- [17] T. VAN DER HAMMEN, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 32, 1981, p. 247-340.
- [18] T. VAN DER HAMMEN, *Journal of Biogeography*, 1, p. 3-26.
- [19] M. SERVANT et J. C. FONTES, *Cah. ORSTOM, ser. Géol.*, X, 1, 1978, p. 9-24.

S. S.-V. : ORSTOM et Museum, Laboratoire de Géologie, 43, rue Buffon, 75005 Paris;
M. R. : C.N.R.S., C.E.P.E., route de Mende, B. P. n° 5051, 34033 Montpellier.