

2

Apports de la palynologie à la connaissance de l'histoire du lac Titicaca (Bolivie-Pérou) au cours du Quaternaire récent

Jean-Pierre YBERT¹

Mots-clés : Palynologie, Sédiment lacustre, Paléoclimat, Holocène, Pléistocène sup, Bolivie.

Résumé

L'analyse palynologique d'une carotte de 483 cm prélevée dans le bassin sud-est du lac Titicaca a permis de reconnaître une période froide pouvant se corrélérer avec la fin du glaciaire Choqueyapu ainsi que des oscillations lacustres relativement importantes. Les phases principales sont corrélées avec l'interlacustre Minchin-Tauca (à la base) puis avec le lacustre Tauca. Ensuite on note une phase de très bas niveau qui a débuté vers 10 000 ans BP pour atteindre son minimum entre 7500 et 6000 ans BP. Entre 6000 et 4000 ans BP environ le plan d'eau reste assez bas mais on note deux remontées importantes de courte durée ; de 4000 à 2200 ans BP environ, la remontée est importante mais se fait de façon assez irrégulière ; enfin à partir de 2200 ans BP on observe une remontée régulière jusqu'au niveau actuel avec un plan d'eau légèrement plus haut vers 700 ans.

Les courbes palynologiques mettent également en évidence des oscillations de moindre importance aussi bien par leur amplitude que par leur durée et qui reflètent les oscillations enregistrées par les services hydrologiques pour les périodes les plus récentes.

Palynological contribution to the history of lake Titicaca (Bolivia, Peru) during the Late Quaternary

Key-words: Palynology, Lake sediments, Paleoclimatology, Holocene, Upper Pleistocene, Bolivia.

Abstract

Palynological analysis of a core (483 cm deep) in the south east of Lake Titicaca enabled us to discern a cold period which could be correlated to the end of the Choqueyapu glacial, as well as the lake oscillations which are quite important. The main phases of these oscillations are correlated with the interlacustrine Minchin-Tauca (at the bottom) and then with the lacustrine Tauca. We observe a phase at a very low level which began about 10 000 years BP, attaining its minimum between 7500 and 6000 years BP. Between about 6000 and 4000 years BP, the water level remained quite low, but we observe two important rises of short duration. From 4000 to 2200 years BP, the rise is important but quite irregular; lastly, after 2200 years BP, we observe a regular rise up to the present level with a slightly higher water level at about 700 years.

Palynological curves also show oscillations of lesser importance in amplitude as well as in duration and which reflects the oscillations recorded by the hydrologic departments for the most recent periods.

¹ ORSTOM, UR. 103, Laboratoire de Palynologie, CEGET-CNRS, Domaine Universitaire, 33405 TALENCE CEDEX (France).

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 30951
Cote : B M

P24

et 68°33'36" et 70°02'13" de longitude ouest.

Avec une altitude moyenne de 3808 m, il est le lac navigable le plus haut du monde. Sa superficie d'environ 8560 km² le situe au 21^{ème} rang dans la classification mondiale. Il a une forme qui peut s'inscrire dans un rectangle orienté Nord-Ouest Sud-Est ; sa longueur maximum est de 178 km et sa largeur maximum de 69 km. Le bassin du *Lac Titicaca* se divise en deux parties principales, *Le Grand Lac* ou *Lac Chucuito* (7310 km²) au Nord-Ouest et *Le Petit Lac* ou *Lac Huiñaymarca* (1430 km²) au Sud-Est, séparés par le détroit de Tiquina.

Le lac Chucuito a une profondeur moyenne de 125 m avec un maximum de 284 m ; il comprend 4 baies importantes : Puno à l'Ouest, Ramis au Nord, Achacachi à l'Est et Yunguyo au Sud. On y trouve les îles du Soleil, de la Lune, Campanario, Taquile, Soto, Amantani, pour ne citer que les plus importantes.

Le lac Huiñaymarca a une profondeur moyenne de seulement 9 m avec un maximum de 42 m à la fosse de Chua à l'Ouest. Il se divise en trois parties principales, le bassin Nord avec la fosse de Chua, le bassin Ouest séparé du précédent par un chapelet d'îles (Paquiri, Paco, Calahuta ...) avec des profondeurs maximums de 20 m, et la baie de Guaqui au Sud, séparée du bassin Ouest par la presqu'île de Taraco.

Le bassin versant est entouré de montagnes aux pentes abruptes et aux sommets dépassant 6000 m d'altitude à l'Ouest. A l'Est, les sommets sont moins élevés (inférieurs à 5500 m) et les pentes sont plus douces. Plusieurs rivières alimentent le bassin mais il n'y a qu'un seul exutoire, le Rio Desaguadero, au Sud.

Le climat dans la région du lac est de type froid et semi aride. La température annuelle moyenne est de 8 °C avec des maximums compris entre 18 et 21 °C en Janvier-Février et des minimums de -5 °C entre Juin et Août. La température des eaux du lac Huiñaymarca varie de 8 °C en Juillet à 14 °C de décembre à février.

On observe une saison sèche de mai à août et une saison humide de Décembre à Mars, séparées par deux périodes de transition. Les précipitations sont souvent de type orageux, les moyennes annuelles sont de 945 mm pour le Grand Lac et de 792 pour le Petit Lac.

Les apports en eau du lac sont dus pour un peu plus de 50 % aux fleuves et pour un peu moins de 50 %, directement aux pluies. Du fait du régime tropical des précipitations, près de 73 % des apports se font en été alors que leur élimination, qui est due pour 90 % à l'évaporation, est plus forte en hiver (Carmouze et Aquize Jaen, 1981). Ce déséquilibre saisonnier des apports et des pertes en eau, entraîne des fluctuations saisonnières du niveau du lac de 0,60 à 0,80 m, le niveau le plus haut intervenant généralement en avril et le plus bas en décembre. Les données hydrologiques

connues depuis 1912 font état de variations inter-annuelles pouvant atteindre une amplitude de 5 m. Deux bas niveaux importants ont été enregistrés en 1916-17 et en 1943-44 puis avec une moindre importance en 1957-58 et 1969-71. Des périodes de crues ont été enregistrées en 1921-23, 1933-35, 1955, 1964, 1978-79 et 1985-86.

La végétation terrestre de type herbacé est fortement dominée par les graminées ; les composées et les chénopodiacées sont bien représentées également. Il existe seulement trois espèces d'arbustes autochtones, *Buddleja incana*, *Polylepis tomentella* et *Cantua dependens*. Les cultures sont abondantes sur les rives et sur la majorité des îles.

La végétation aquatique a été étudiée par D. Collot (1980). On peut résumer la répartition des associations végétales de la façon suivante :

- sur les rives on trouve généralement *Lilaeopsis* ou *Hydrocotyle* souvent associés à *Lemna* et *Azolla* ;
- ensuite on trouve une association à *Myriophyllum* et *Elodea* ;
- vers 2,50 m de profondeur, se développent les *Totoras* (*Schoenoplectus tatora*) associés à *Potamogeton*, *Ruppia*, et *Zannichellia* ;
- de 4,50 m à 7,50 m de profondeur environ le fond est colonisé par *Chara* ;
- enfin, si la pente est douce, de 7,50 m à 9 m, on trouve à nouveau *Potamogeton*.

A partir de 9 m de profondeur il n'y a plus de végétation. Par ailleurs, la fougère *Isoetes* que l'on trouve régulièrement dans les lacs d'altitude supérieure à 4250 m n'a jamais été signalée dans le lac Titicaca. (Fuchs-Eckert, 1981)

Le phytoplancton a été étudié par X. Lazzaro (1981, 1982) et par A. Iltis (1984). Ce dernier auteur a dénombré près de 60 taxons d'algues autres que les diatomées. Parmi ces taxons, nous retrouvons en abondance dans nos préparations *Botryococcus* et *Pediastrum* ainsi que moins régulièrement *Ankistrodesmus*, *Spirogyra*, *Staurastrum*, *Mougeotia* et *Zygnema*.

MATERIEL ETUDIE

Les carottés TD sur lesquelles nous avons effectué les analyses palynologiques ont été prélevées à l'aide d'un carottier Mackereth dans le bassin ouest du lac Huiñaymarca, à l'Ouest de l'île Suana, par 19 m de fond (fig. 2). Deux carottes, TD et TD1, d'une longueur respective de 483 et 537,5 cm ont été obtenues sur ce site. Les études sédimentologiques ont été faites par L.F. de Oliveira Almeida (1986) pour TD et par D. Wirmann (1987) pour TD1.

Description de la carotte TD

L.F. de Oliveira Almeida a différencié 5 unités lithologiques dans la carotte TD ; ces unités sont, de la base vers le sommet, les suivantes :

- I1. De 483 à 364 cm : argile très plastique, homogène, de couleur gris foncé ; fraction supérieure à 63 μm pratiquement nulle ; pas de carbonates ; 4 % de matière organique.

- I2. De 364 à 320 cm : argile limoneuse avec intercalations d'argiles organiques de couleur gris foncé à noir ; fraction supérieure à 63 μm pratiquement nulle ; pas de carbonates ; la matière organique varie de 25 à 60 % environ à partir de la base.

- I3. De 320 à 260 cm : alternance de lits organiques et de lits calcaires de couleur noire à marron ; mollusques et oogones de characées fréquents ; la fraction supérieure à 63 μm varie de 0 à 80 % suivant les lits ; les carbonates varient de 10 à 75 % ; la matière organique varie de 25 à 75 %.

- II. De 260 à 109 cm : alternance de laminations calcaires et organiques avec intercalation de croûtes de gypse ; tubulures de characées et oogones abondants ; la fraction supérieure à 63 μm varie de 10 à 90 % suivant les lits ; les carbonates varient de 10 à 70 % ; la matière organique est comprise entre 10 et 20 %.

- III. De 109 cm au sommet : alternances de lits organiques et calcaires très fluides, plus homogène à partir de 34 cm ; les ostracodes sont fréquents ; la fraction supérieure à 63 μm est comprise entre 10 et 20 % ; les carbonates varient progressivement de 60 à 2 % vers le sommet ; la matière organique varie de 30 à 50 %.

Le même auteur regroupe ces 5 unités en 3 séquences sédimentaires qu'il interprète de la façon suivante :

- Séquence 1, de 483 à 260 cm : cette séquence correspondrait à une baisse progressive du niveau du lac depuis un plan d'eau plus haut que l'actuel d'une dizaine de mètres (entre 483 et 364 cm) jusqu'à un plan d'eau plus bas d'environ 10 à 20 mètres (entre 320 et 260 cm) ;

- Séquence 2, de 260 à 109 cm : cette séquence correspond à un bas niveau lacustre estimé à - 20 m par rapport à l'actuel ;

- Séquence 3, de 109 cm au sommet : elle correspond à une remontée progressive du niveau du lac jusqu'aux valeurs actuelles.

Description de la carote TD1

D. Wirmann a différencié les 6 unités lithologiques suivantes :

- Unité 6, de 537,5 à 332,5 cm : argile plastique

azoïque de couleur gris sombre (marron clair à rosé sur le sédiment sec) ; fraction supérieure à 63 μm pratiquement inexistante ; moins de 10 % de carbonates ; moins de 1 % de matière organique ;

- Unité 5, de 332,5 à 181 cm : argile de couleur gris clair ; fraction supérieure à 63 μm pratiquement inexistante ; moins de 10 % de carbonates ; la matière organique est comprise entre 1 et 3 % ;

- Unité 4, de 181 à 155 cm : argile compacte gris verdâtre (gris beige sur le sédiment sec) ; fraction supérieure à 63 μm pratiquement inexistante ; carbonates variant de 1 à 30 % environ de la base vers le haut ; la matière organique est comprise entre 2 et 10 % ;

- Unité 3, de 155 à 141,5 cm : sédiment argilo-sableux avec gypse ; fraction supérieure à 63 μm comprise entre 10 et 80 % ; 80 % de carbonates ; 1 à 2 % de matière organique ;

- Unité 2, de 141,5 à 87 cm : sédiment organo-calcaire gélatineux ; nombreux oogones et restes de characées ; environ 10 % de fraction supérieure à 63 μm ; 80 % de carbonates ; 2 à 3 % de matière organique ;

- Unité 1, de 87 cm au sommet : sédiment organo-calcaire riche en coquilles ; environ 10 % de fraction supérieure à 63 μm ; les carbonates varient de 60 à 10 % vers le haut ; la matière organique est comprise entre 10 et 15 %.

D. Wirmann a regroupé ces 6 unités en 4 séquences sédimentaires pour lesquelles il donne les interprétations suivantes :

- Séquence IV, de 537,5 à 155 cm : milieu de dépôt plus profond que l'actuel (+10 à +15 m) diminuant progressivement ;

- Séquence III, de 155 à 132 cm : très bas niveau lacustre, au moins 18 mètres au dessous de l'actuel ;

- Séquence II, de 132 à 84,5 cm : début du remplissage du bassin en milieu temporairement salé ;

- Séquence I, de 84,5 cm au sommet : continuation du remplissage du bassin jusqu'au niveau actuel, en milieu d'eau douce.

ANALYSE PALYNOLOGIQUE

L'analyse palynologique a été réalisée essentiellement sur la carotte TD, suivant une maille d'échantillonnage de 10 cm comportant quelques niveaux intermédiaires. 64 échantillons ont été analysés sur cette carotte, il faut y ajouter plusieurs niveaux de la carotte TD1 observés à titre de contrôle, ainsi que des prélèvements de sédiments superficiels du lac Titicaca et des lacs d'altitude de la vallée de Ichu Khota analysés pour l'obtention de spectres palynologiques actuels de

référence. Nous avons effectué récemment une campagne de prélèvements complémentaires dont l'étude en cours devrait permettre de préciser les interprétations des oscillations du niveau du plan d'eau.

Le diagramme palynologique (fig. 3) a été élaboré en prenant comme base pour le calcul des pourcentages, la somme des pollens et des spores de ptéridophytes, de mousses et d'hépatiques. Les valeurs relatives des algues, des spores de champignons et des oeufs de plathelminthes ont été calculées par rapport à cette somme.

Les palynomorphes analysés ont été regroupés en 21 ensembles de taxons dont la répartition est la suivante :

Gramineae : Les pollens de Gramineae sont présents tout au long de la coupe. Ils sont relativement peu abondants au-dessous de 390 cm (autour de 20 %) puis augmentent régulièrement pour atteindre des valeurs comprises entre 60 et 80 % entre 320 et 245 cm. Ensuite les Gramineae restent dominantes mais avec des pourcentages légèrement inférieurs (autour de 50 %).

Compositae : Cette famille est représentée essentiellement par la sous-famille des Tubuliflorae. Les valeurs sont inférieures à 10 % au-dessous de 245 cm ; elles sont comprises entre 10 et 30 % au-dessus. La sous-famille des Liguliflorae, présente principalement au-dessous de 320 cm, n'est que très faiblement et très irrégulièrement représentée.

Périporés : Nous avons regroupé sous ce terme les pollens des Amaranthaceae, des Caryophyllaceae et des Chenopodiaceae. Les Amaranthaceae se rencontrent principalement au-dessous de 395 cm mais seulement de façon très discontinue et en très faible quantité. Les Caryophyllaceae, présentes en continu jusqu'à 360 cm, sont plus rares ensuite jusqu'à 255 cm. Elles sont absentes entre 250 et 110 cm puis réapparaissent de façon discontinue. Les Chenopodiaceae sont présentes tout au long de la carotte avec des valeurs inférieures à 4 % jusqu'à 255 cm puis comprises entre 4 et 20 % ensuite.

Rosaceae : Représentée par le genre *Polylepis* et/ou *Acaena*, cette famille est présente tout le long de la carotte avec des valeurs inférieures à 5 %.

Allochtones : Ce groupe est représenté par les genres *Podocarpus*, *Alnus* et *Hedyosmum*. Les *Podocarpus* sont les plus importants, ils peuvent atteindre des valeurs de 15 % au-dessous de 360 cm, ensuite leur présence est irrégulière et les pourcentages ne dépassent pas 4 %.

Dicotylédones diverses : Sont regroupées ici une vingtaine de familles de plantes terrestres dont la présence très discontinue et en très faible quantité ne permet pas de leur attribuer une quelconque signifi-

cation paléoclimatique. Leur valeur globale est toujours inférieure à 5 %. Les familles les plus fréquemment rencontrées sont les Papilionaceae, les Urticaceae, les Cruciferae.

Monocotylédones diverses : Cet ensemble est représenté essentiellement par des Amaryllidaceae et des Bromeliaceae. Elles sont présentes de façon continue au-dessous de 320 cm.

Ephedra : Le pollen de ce gymnosperme se rencontre très irrégulièrement et en très faible quantité.

Plantes terrestres d'altitude : Nous avons regroupé sous ce terme les pollens de plantes terrestres qui poussent actuellement au-dessus de 4000 m. Ce sont les Valerianaceae, les Malvaceae du genre *Nototriche*, les Geraniaceae et les Gentianaceae. Cet ensemble est relativement abondant (2 à 10 %) jusqu'à 345 cm, il est pratiquement absent ensuite. *Valeriana* n'a pas été retrouvé au-dessus de 345 cm.

Plantago : Pratiquement absent jusqu'à 360 cm, ce genre se rencontre ensuite de façon continue avec des valeurs comprises entre 2 et 10 %.

Cyperaceae : Les pollens de Cyperaceae sont relativement abondants (entre 5 et 20 %) de la base de la carotte jusqu'à 360 cm, de 280 à 245 cm puis de 110 cm au sommet. Leur présence est irrégulière entre 360 et 300 cm puis entre 245 et 110 cm.

Ptéridophytes : Les spores trilètes et monolètes, à l'exclusion de *Isoetes* noté séparément, évoluent suivant deux courbes parallèles, elles sont plus abondantes au-dessous de 360 cm.

Mousses et Hépatiques : Les spores de mousses et d'hépatiques sont présentes de façon continue de la base de la carotte jusqu'à 320 cm puis de façon irrégulière jusqu'à 245 cm. Elles sont pratiquement absentes ensuite.

Plantes aquatiques : Nous avons regroupé ici les pollens des Umbelliferae aquatiques, *Elodea*, *Myriophyllum* et *Ruppia*. Cet ensemble est pratiquement absent jusqu'à 320 cm ; il est continu mais très variable ensuite avec des pourcentages allant de 1 à 30 %. Les valeurs les plus fortes se trouvent entre 245 et 110 cm. Le genre *Ruppia* est le mieux représenté.

Isoetes : Cette fougère aquatique d'altitude est abondante (40 à 80 %) au-dessous de 360 cm, elle est fréquente jusqu'à 245 cm et pratiquement absente ensuite.

Pediastrum : Le genre *Pediastrum* est présent tout au long de la carotte avec des valeurs relatives très variables. On peut différencier 5 zones en fonction de sa représentation, deux avec des pourcentages faibles (< 30 %) entre la base et 360 cm puis entre 245 et 110 cm ; deux avec des pourcentages le plus souvent très élevés donnant une courbe en dents de scie de 360 à

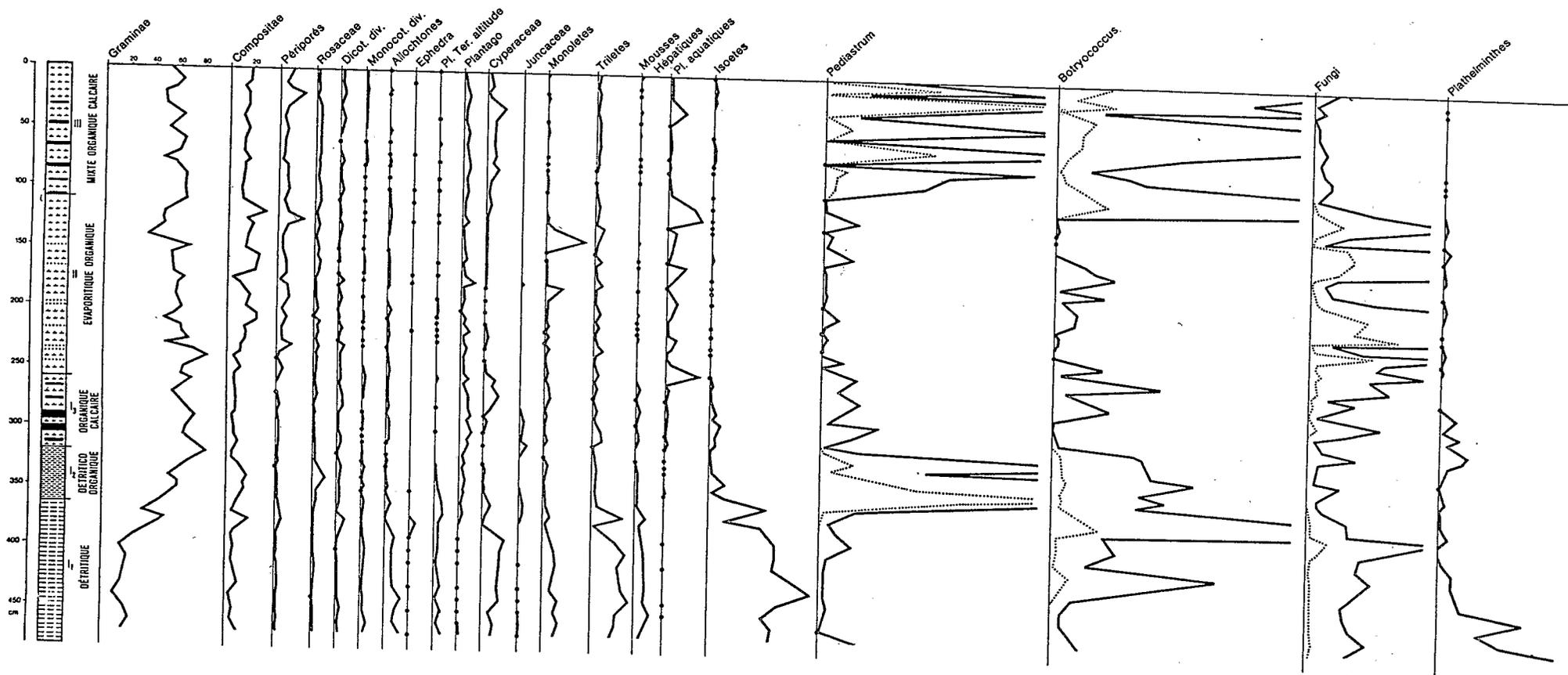


Fig. 3. Diagramme palynologique de la carotte TD.

315 cm et de 100 cm au sommet ; une zone intermédiaire de 315 à 245 cm avec des valeurs situées autour de 50 %. Quatre types rapportés aux espèces *P. boryanum boryanum*, *P. boryanum cornutum*, *P. integrum* et *P. simplex* ont été différenciés. Leur répartition le long de la carotte n'est pas uniforme mais elle n'a pas encore pu être interprétée.

Botryococcus : Cette algue présente, comme *Pediatrum*, une courbe en dents de scie. Les pourcentages sont moyens à forts (10 à 400 %) jusqu'à 310 cm ; faibles (< 50 %) entre 310 et 110 cm ; élevés (de 50 à 500 %) de 110 cm au sommet.

Champignons : Les spores de champignons présentent elles aussi une courbe en dents de scie avec des pics très accentués, on peut la diviser en 5 parties :

- de la base à 360 cm : pourcentages compris entre 30 et 90 % ;
- de 360 à 320 cm : pourcentages inférieurs à 30 % ;
- de 320 à 245 cm : pourcentages compris entre 10 et 70 % ;
- de 245 à 110 cm : pourcentages compris entre 20 et 150 % ;
- de 110 cm au sommet : pourcentages inférieurs à 15 %.

Oeufs de Plathelminthes : Les œufs de vers sont présents de façon continue de la base de la carotte jusqu'à 250 cm. Les valeurs sont relativement élevées jusqu'à 380 cm puis entre 320 et 250 cm. Leur présence est discontinue jusqu'à 110 cm puis épisodique ensuite.

INTERPRETATIONS PALEOCLIMATIQUES ET PALEOHYDROLOGIQUES

Afin de pouvoir interpréter les données palynologiques, nous avons établi 4 groupes de taxons en fonction de leur répartition écologique et analysé les rapports suivants (fig. 4) :

- Somme des taxons "Terrestres" / Somme des taxons de "Bordure lacustre" ;
- Somme des "Algues" / Somme des taxons de "Bordure lacustre" ;
- Somme des "Algues" / Somme des taxons "Terrestres" ;
- Somme des taxons "Froids" / Somme globale.

Ces groupes sont définis comme suit :

Les taxons "Terrestres" regroupent tous les pollens des plantes de milieu habituellement sec ;

Les taxons de "Bordure lacustre" regroupent les plantes de milieu marécageux telles que *Plantago*, Juncaceae, Cyperaceae ainsi que les Ptéridophytes, les Mousses et Hépatiques, les Spores de Champignons et les Oeufs de Plathelminthes qui sont le plus généralement associés aux milieux humides et les Plantes aquatiques dont la répartition est limitée à la zone côtière ;

Les taxons "Froids" regroupent les plantes terrestres d'altitude, les Juncaceae et *Isoètes*.

Interprétation paléohydrologique (fig. 5)

On peut considérer que dans un bassin à pentes faibles comme c'est le cas pour le lac Huiñaymarca, l'importance relative des taxons de "Bordure lacustre" est fonction de la distance à la rive et par conséquent, du niveau du lac. L'analyse des rapports des groupes de taxons définis plus haut nous permet ainsi de déterminer 5 phases successives :

- de la base jusqu'à environ 360 cm : bas niveau du lac caractérisé par la dominance des éléments de Bordure sur les éléments Terrestres et sur les Algues ;
- de 360 à 320 cm : haut niveau du lac. Les éléments de Bordure sont peu abondants et les Algues dominent ;
- de 320 à 260/245 cm : bas niveau du lac marqué par une forte diminution des Algues ;
- de 260/245 à 110 cm : très bas niveau du lac marqué par une forte dominance des éléments de Bordure et des éléments Terrestres. Il y a toutefois plusieurs "pics" d'Algues qui indiquent qu'il y avait des apports d'eau douce et même des remontées temporaires du plan d'eau. La nette augmentation des Chénopodiacées à ce niveau peut être liée à la salinisation du sol mais une action anthropique n'est pas à exclure notamment pour expliquer le maintien de ces valeurs après la remontée du niveau du lac ;
- de 110 cm au sommet : remise en eau du lac rapide dans un premier temps puis progressive ensuite.

Interprétation paléoclimatique

Les travaux de D. Collot (1980) et de C. Ostria (1987) ont permis de connaître les limites altitudinales d'un nombre important de plantes aquatiques ou terrestres. Nous donnons ci-dessous la répartition de celles que nous avons rencontrées dans nos sédiments :

- *Isoètes* : eaux douces entre 4250 et 4700 m ;
- *Ruppia* : eaux douces ou salées (<30 g/l), au-dessous de 4400 m ;

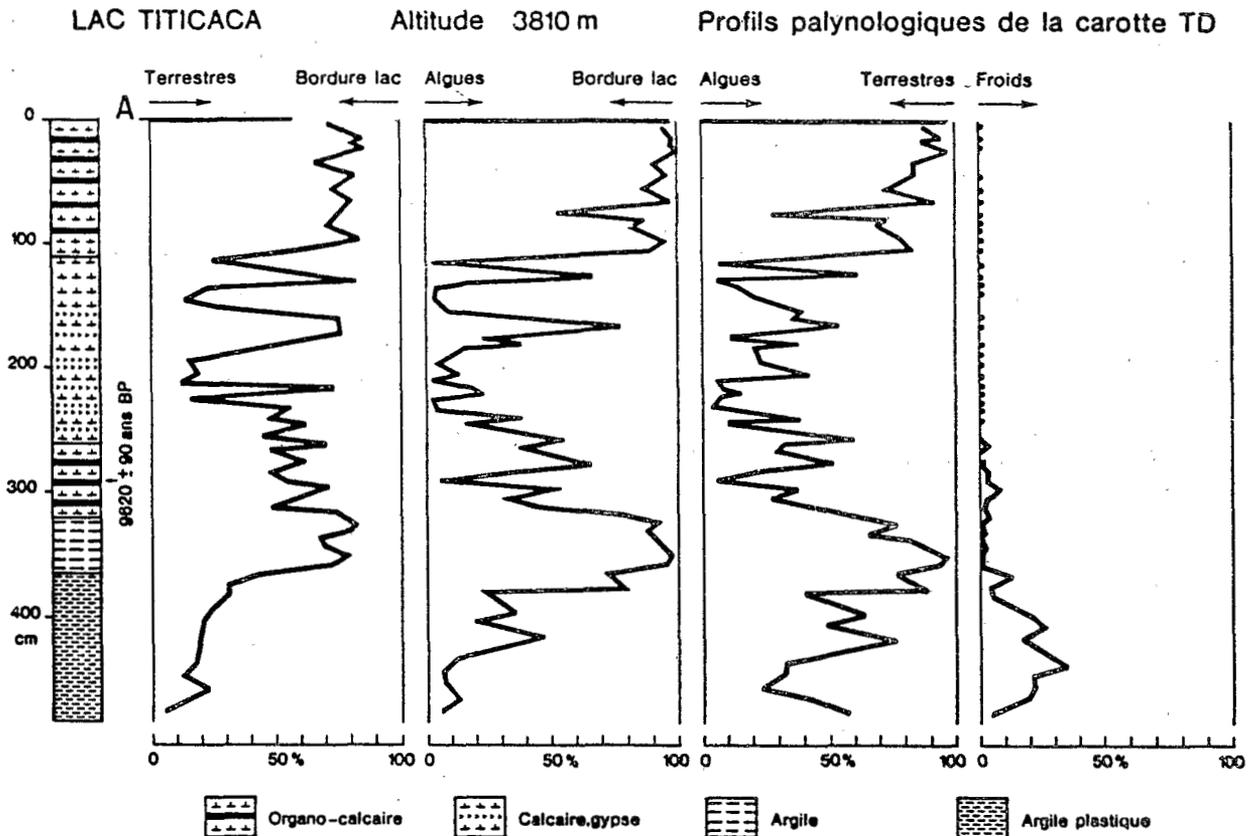


Fig. 4. Evolution des groupes de taxons.

- *Plantago* : au-dessous de 4500 m ;
- *Nototriche*, *Valeriana*, *Juncaceae* : au-dessus de 4500 m.

Compte tenu de ces données écologiques, nous pouvons déterminer, pour la carotte TD, 4 périodes principales en fonction de la température :

- Une période froide de la base jusqu'à environ 360 cm, marquée par la présence de *Valeriana*, *Isoëtes* et *Nototriche* et par l'absence quasi totale de *Plantago* et de *Ruppia*. Le gradient thermique altitudinal déterminé par C. Ostria dans la vallée de Ichu Khota étant de 0,53 °C/100 m, nous pouvons estimer que la température moyenne annuelle était inférieure à l'actuelle de 3 à 5 °C ;

- Une période de réchauffement progressif entre 360 et 320 cm, marquée par la régression des *Isoëtes*, la disparition de *Valeriana* et de *Nototriche* et la présence de *Plantago* puis de *Ruppia* ;

- Une période de refroidissement modéré entre 320 et 245 cm, marquée par une légère augmentation des *Juncaceae* et de *Isoëtes* ;

- Une période équivalente à l'actuelle à partir de 245 cm.

L'analyse du rapport "Terrestres" / "Bordure lacustre" permet de différencier 5 phases climatiques principales :

- de la base jusqu'à 360 cm : climat relativement humide marqué par un faible taux de taxons terrestres ;
- de 360 à 320 cm : climat sec marqué par la dominance des taxons terrestres ;
- de 320 à 230 cm : climat globalement sec ;
- de 230 à 110 cm : climat alternativement sec et humide avec des variations très marquées ;
- de 110 cm au sommet : climat sec.

DISCUSSION

L.F. de Oliveira Almeida (1986) et D. Wirmann (1987) interprètent les 3 unités argileuses de la base des carottes (I1, I2, I3 de TD et 6, 5, 4, de TD1) comme une séquence régressive débutant par des niveaux lacustres plus hauts que l'actuel d'au moins 10 à 15 m et corrélient celle-ci avec la fin du lacustre Tauca. Suivant

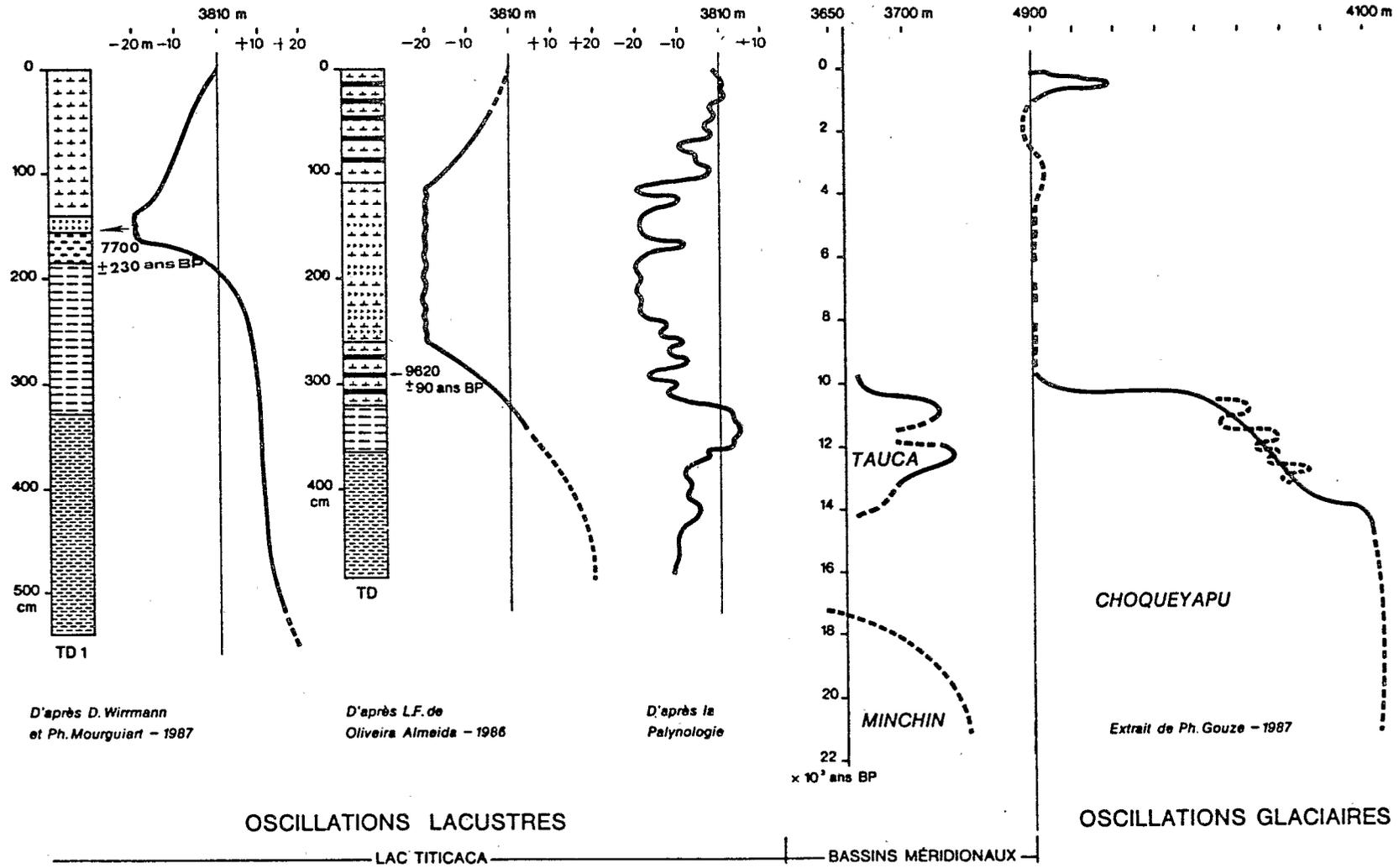


Fig. 5. Interprétation paléohydrologique et corrélations.

cette hypothèse, la base des carottes devrait être datée de 11 000 ans BP environ.

Deux datations au ^{14}C obtenues, la première pour l'intervalle 291,5-295,5 cm de TD, la deuxième pour l'intervalle 157-158 cm de TD1 ayant donné respectivement 9620 ± 90 ans BP et 7700 ± 230 ans BP cela supposerait une vitesse de sédimentation supérieure à 1 mm/an. Or, B. Boulangé *et al.* (1981) ont calculé une vitesse de 0,5 mm/an pour un sédiment carbonaté plus superficiel (entre 45 et 70 cm) donc moins compacté, ce qui amène la base des carottes à au moins 14 000 ans BP pour TD et à plus de 15 000 ans BP pour TD1. Par ailleurs, M. Servant situe la terrasse Tauca à quelques mètres seulement au dessus du niveau actuel, la terrasse située à 10-15 m étant attribuée au lacustre Minchin antérieur à 22 000 ans.

Les données palynologiques montrent au contraire que les trois unités argileuses sont bien individualisées et se sont déposées dans des conditions climatiques différentes. Des analyses microgranulométriques réalisées par la société Instrumat sur les argiles de TD1 confirment ce fait (J.P. Tastet, communication orale).

Nos observations nous amènent donc à corréliser l'unité I1 de TD avec la fin de l'interlacustre Minchin-Tauca et avec la fin de la glaciation Choqueyapu. L'unité I2 qui lui fait suite est corrélée avec le lacustre Tauca daté de 12 500-13 000 à 10 500 ans BP et avec la phase de retrait du glacier.

Pendant l'interlacustre Minchin-Tauca les spectres palynologiques sont caractérisés par une dominance des taxons de milieu humide sur les taxons terrestres. Ce fait peut s'expliquer par un changement dans la nature et dans la répartition des précipitations par rapport à l'époque actuelle. Pendant cette période, les précipitations se seraient produites sous forme de neige et principalement pendant l'hiver austral, favorisant l'alimentation des glaciers et la formation de zones de marécages et de tourbières sans qu'il y ait d'écoulements superficiels importants.

Pendant l'épisode lacustre Tauca, au contraire, on note un réchauffement important qui aurait favorisé la fonte des glaciers et de ce fait, l'alimentation des lacs. Les précipitations auraient été de type orageux et estivaux, favorisant les écoulements superficiels et empêchant la formation de tourbières importantes.

Ces observations confirmeraient l'hypothèse de M. Servant et J. C. Fontes (1984) selon laquelle le facteur principal ayant influé sur le régime hydrologique dans les Andes boliviennes au cours du Quaternaire récent aurait été la modification du régime des précipitations.

La période de dépôt de la troisième unité argileuse (I3), comprise entre 10 000 et 9000 ans BP environ a connu un nouveau refroidissement, moins important toutefois que pendant le dépôt de I1, et un climat un

peu moins sec que pendant I2. Un régime de précipitations hivernales neigeuses s'est installé à nouveau et s'est maintenu pendant une partie de l'unité II, entraînant une baisse importante du niveau du lac.

Pendant le dépôt de la plus grande partie de l'unité II, ces conditions climatiques ont dû dominer mais elles ont été entrecoupées par de courtes périodes d'un régime de précipitations estivaux orageux.

Ensuite, pendant le dépôt de l'unité III, le régime des précipitations estivaux orageux a dû prédominer.

CONCLUSIONS

L'analyse palynologique des sédiments lacustres apporte des précisions importantes sur le climat de l'Altiplano bolivien depuis environ 15 000 ans ainsi que sur l'évolution bathymétrique du lac Titicaca. Les quelques datations absolues obtenues sur les carottes ne sont pas suffisantes pour situer rigoureusement les différents épisodes enregistrés, on peut tout de même donner la chronologie approximative suivante :

- jusqu'à 13 000 ans BP environ, le niveau du lac est plus bas que maintenant, le climat est froid et relativement humide, les précipitations sont de type neigeux ;

- entre 12 500 et 10 500 ans BP environ, le lac monte jusqu'à atteindre un niveau plus haut que l'actuel d'environ 5 m. Le climat se réchauffe et devient plus sec ;

- entre 10 500 et 8000 ans BP environ, le niveau du lac baisse à nouveau et il y a un léger refroidissement. Le climat sec se maintient ;

- peu après 8000 ans BP le lac atteint son niveau le plus bas. Il s'y maintient jusque vers 3600 ans mais accuse deux courtes remontées importantes vers 5500 ans BP et vers 4000 ans BP. Le climat est alternativement sec et humide ;

- vers 3600 ans BP le niveau remonte brutalement puis redescend légèrement jusqu'aux environs de 2500 ans pour remonter ensuite progressivement jusqu'au niveau actuel et même légèrement plus haut entre 750 et 500 ans BP environ. Le climat est sec, la température est sensiblement égale à l'actuelle.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre des accords de coopération scientifique entre l'Université Majeure de San Andres (UMSA) de La Paz et l'Institut Français de Recherche scientifique pour le Développement en

Coopération (ORSTOM).

Nous remercions les autorités de l'UMSA pour les appuis qu'elles nous ont accordés. Nous remercions

également les Dr J. Argollo, C. Vargas et Y. Miranda pour leur aide permanente au cours des travaux de terrain et de laboratoire.

BIBLIOGRAPHIE

- BOULANGE, B. et AQUIZE JAEN, E., 1981, "Morphologie, hydrographie et climatologie du lac Titicaca et de son bassin versant", *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14(4), 269-287.
- BOULANGE, B., VARGAS, C. et RODRIGO, L.A., 1981, "La sédimentation actuelle dans le lac Titicaca", *Rev. Hydrobiol.*, 14(4), 299-309.
- CARMOUZE, J.P. et AQUIZE JAEN, E., 1981, "La régulation hydrique du lac Titicaca et l'hydrologie de ses tributaires", *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14(4), 329-348.
- COLLOT, D., 1980, "Les macrophytes de quelques lacs andins (lac Titicaca, lac Poopo, lacs de vallées d'Hichu Kkota et d'Ovejhujo)", *Doc. dactyl.*, 115 p.
- FUCHS ECKERT, H.P., 1981, "Enumeratio methodica specierum generis *Isoetes* in Republica Boliviana atque in Republica Peruviana necnon in regionibus confinantibus proximis hucusque cognitatum", *Doc. dactyl.*, 15 p.
- GOUZE, Ph., 1987, "La cordillère orientale de Bolivie : Glaciations Plio-Pléistocènes. Essai de paléohydrologie (30 000 ans BP - Actuel) d'après les oscillations des glaciers et la composition isotopique des macrorestes végétaux", *Thèse 3^{ème} Cycle, Univ. Paris Sud*, 173 p.
- ILTIS, A., 1984, "Algues du lac Titicaca et des lacs de la vallée d'Ichu Kkota (Bolivie)", *Cryptogamie, Algologie*, 5(2-3), 85-108.
- LAVENU, A., FORNARI, M. et SEBRIER, M., 1984, "Existence de deux nouveaux épisodes lacustres quaternaires dans l'Altiplano péruvo-bolivien", *Cah. ORSTOM sér., Géol.*, 14(1), 103-114.
- LAZZARO, X., 1981, "Biomasses, peuplements phyto-planctoniques et production primaire du lac Titicaca", *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14(4), 349-380.
- LAZZARO, X., 1982, "Peuplements, biomasses et productions phyto-planctoniques du lac Titicaca", *Thèse 3^{ème} Cycle, Univ. Paris 6*, 144 p.
- MOURGUIART, Ph., 1987, "Les ostracodes lacustres de l'Altiplano bolivien. Le polymorphisme, son intérêt dans les reconstitutions paléohydrologiques et paléoclimatiques de l'Holocène", *Thèse 3^{ème} Cycle, Univ. Bordeaux I*, 263 p., 29 pl.
- OLIVEIRA ALMEIDA (de), L.F., 1986, "Estudio sedimentológico de testigos del lago Titicaca. Implicaciones paleoclimáticas" *Tesis de Grado, UMSA, La Paz, Bolivia*, 134 p.
- OSTRIA, C., 1987, "Végétation de haute altitude des Andes de Bolivie (exemple d'une vallée glaciaire : Hichu Kkota, Cordillère Royale)", *Séminaire : Paléolacs et Paléoclimats en Amérique latine et en Afrique, ORSTOM Bondy*, 25-29.
- SERVANT, M., 1977, "Le cadre stratigraphique du Plio-Quaternaire des Andes tropicales en Bolivie", *Recherches françaises sur le Quaternaire, INQUA 1977, Bull. AFEQ*, 50, 323-327.
- SERVANT, M. et FONTES, J.Ch., 1978, "Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques", *Cah. ORSTOM, Sér. Géol.*, 4(1), 9-24.
- WIRRMANN, D., 1987, "El lago Titicaca, sedimentologia y paleohidrologia durante el Holoceno (10 000 años BP-Actual)", *ORSTOM en Bolivia, mission de La Paz, Informe N° 6*, 61 p.
- WIRRMANN, D. et OLIVEIRA ALMEIDA (de), L.F., 1987, "Low Holocene level (7700 to 3650 years ago) of lake Titicaca (Bolivia)", *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 59, 315-323.

PALYNOLOGIE, ÉCOLOGIE, PALÉOÉCOLOGIE

ACTES DU X^e SYMPOSIUM

de

L'ASSOCIATION DES PALYNOLOGUES DE LANGUE FRANÇAISE



Publié avec le concours de
l'Agence de Coopération Culturelle et Technique

INSTITUT FRANÇAIS DE PONDICHÉRY
Travaux de la Section Scientifique et Technique
Tome XXV