

Oxygène-18, Carbone-13, Carbone-14
et Diatomées dans quatre carottes
du lac Huyñamarca (Bolivie)
- Premiers résultats -

Denis WIRRMANN*, Simone SERVANT-VILDARY**, Jean-Charles FONTES***

*Convention UMSA-ORSTOM, Cajón Postal 8714, La Paz, Bolivie

**Muséum d'Histoire Naturelle, Lab. Géol., 75231 Paris Cedex 05

***Lab. d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique

Université de Paris-Sud, 91405 ORSAY Cedex

DP = 1982/ca

INTRODUCTION

Suite aux travaux de reconnaissance du lac Titicaca, (CARMOUZE et al., 1977; BOULANGE et AQUIZE JAEN, 1981), P. MAGAT et J.P. YBERT ont réalisé en décembre 1980 la première campagne de carottage dans la partie sud de ce lac, ou lac Huyñamarca. La vingtaine de carottes prélevées a permis la réalisation d'un travail de thèse (VARGAS, 1982) ainsi que cette étude isotopique préliminaire portant sur une partie de ce matériel.

GENERALITES

Les échantillons analysés proviennent des carottes B₁, D₄, S₅ et C₂ (Figure 1). Les principaux résultats de l'analyse sédimentologique sont regroupés dans les Figures 2 et 3 et dans le Tableau I. Pour plus de détails l'on se reportera au rapport consacré à la description des carottes (WIRRMANN, 1981).

Ces résultats permettent de dresser un premier bilan de la sédimentation lacustre dans cette zone.

Fonds Documentaire IRD



010023206

Fonds Documentaire IRD

Cote : Bx 23206 Ex : *unique*

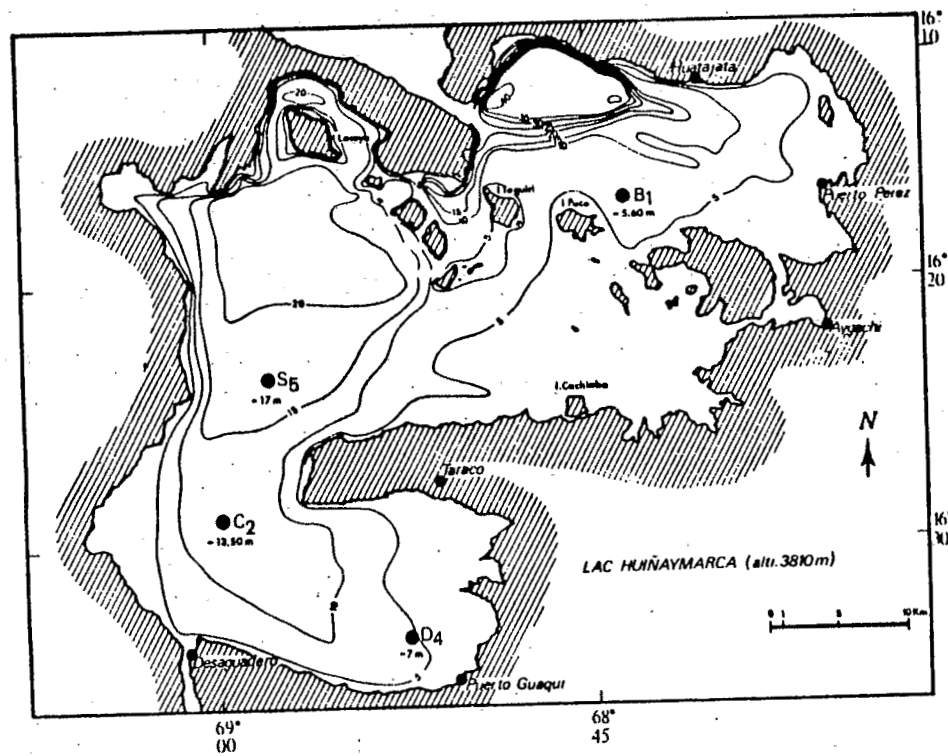


Fig. 1

Tableau I.- Résultats de l'analyse par absorption atomique
exprimés par rapport au poids de l'échantillon sec

Carottes	Niveaux cm	Na ₂ O %	K ₂ O %	CaO %	MgO %	Fe ₂ O ₃ %	Mn ₂ O ₃ %
S 5	0-2,5	0,42	0,05	10,1	0,37	0,041	0,01
	40-42,5	0,44	0,05	30,7	0,48	0,066	0,04
	60-62,5	0,38	0,03	23,8	0,75	0,028	0,03
	97,5-100	0,42	0,06	45,1	1,53	0,084	0,03
B 1	7,5-10	0,28	0,03	51,2	1,16	0,017	0,004
	40-42,5	0,27	0,03	42,5	1,11	0,031	0,004
	90-92,5	0,23	0,02	56,8	1,19	0,020	0,003
	137,5-140	0,23	0,02	49,0	1,29	0,049	0,005
D 4	7,5-10	0,34	0,04	31,5	0,82	0,056	0,010
	20-22,5	0,33	0,05	15,4	0,52	0,073	0,010
	40-42,5	0,34	0,03	28,8	0,75	0,045	0,010
	67,5-70	0,88	0,04	35,2	1,034	0,055	0,010
	90-92,5	0,35	0,02	43,1	0,986	0,052	0,027
	117,5-120	0,32	0,04	52,3	1,25	0,029	0,013
C 2	0-10	0,32	0,02	70,5	1,21	0,03	0,009
	49-50	0,35	0,03	33,6	0,81	0,05	0,014
	59-60	0,34	0,02	50,4	0,88	0,03	0,022
	69-70	0,16	0,05	18,5	0,39	0,03	0,059
	89-90	0,13	0,05	50,4	0,36	0,03	0,065
	94-95	0,12	0,02	58,5	0,42	0,07	0,109

LA SEDIMENTATION ACTUELLE

Trois secteurs au moins sont différenciés, en accord avec la carte de distribution des faciès sédimentaires actuels, dressée par BOULANGE et VARGAS (1981) :

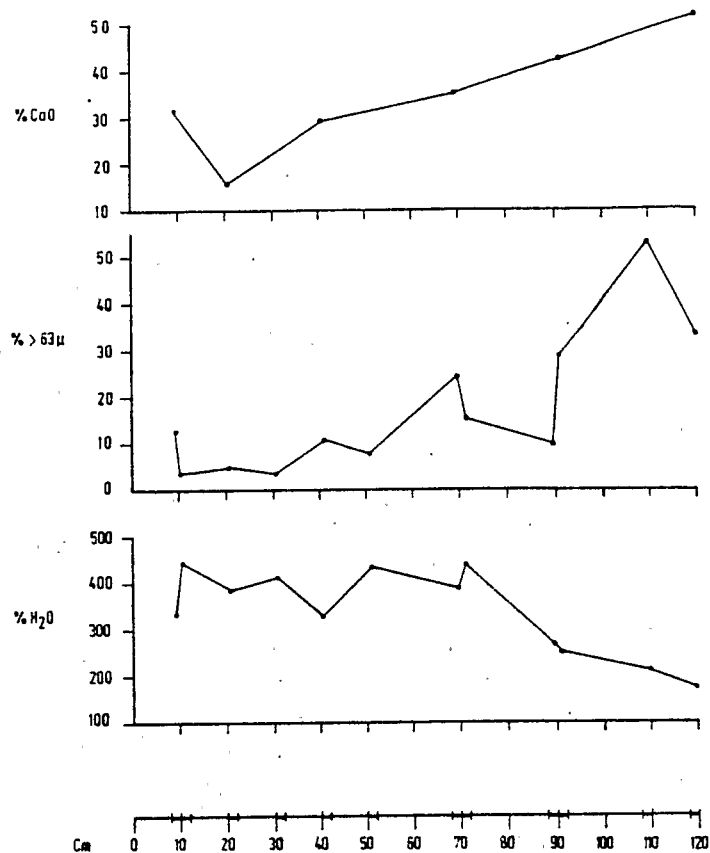
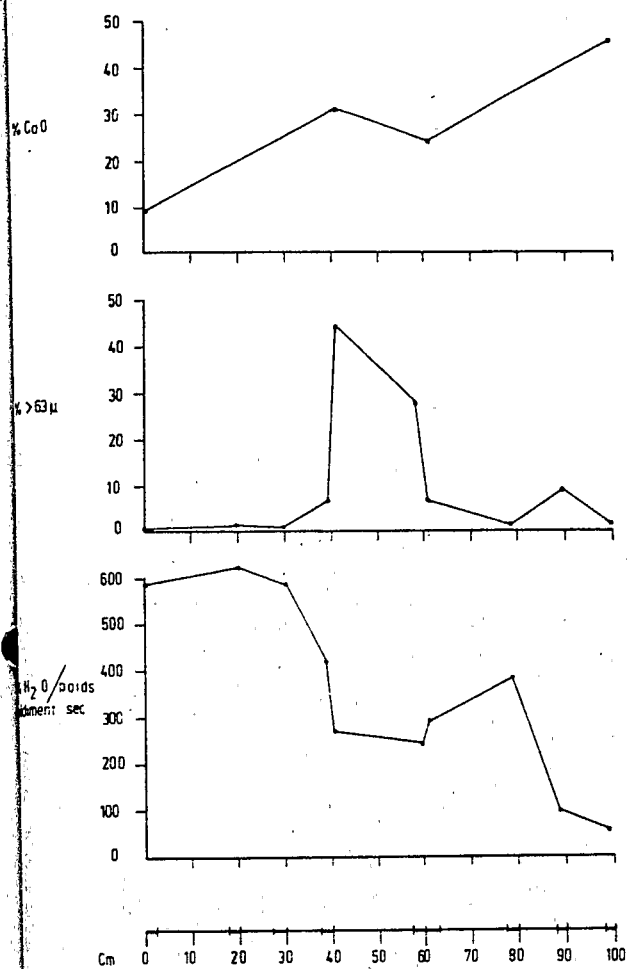
- à l'Est (carotte B₁), les dépôts superficiels sont du type biogène carbonaté à Characées, mollusques et Ostracodes. L'influence détritique est nulle;
- au Sud-Est et Sud-Ouest (carottes D₄ et C₂), les sédiments de surface sont des dépôts biogènes carbonatés associés à de la matière organique et à des éléments détritiques (traces de quartz et de minéraux argileux du type illite, chlorite et smectites);
- au Centre Ouest (carotte S₅), le faciès sédimentaire est un dépôt organo-détritique contenant une faible proportion de phase biogène carbonatée (≈ 10%).

LA SEDIMENTATION ANCIENNE

La sédimentation a également varié au cours du temps, comme en témoignent les changements brusques de la lithologie enregistrés dans les carottes S₅ et C₂ (Figures 2 et 3) :

- au Centre-Ouest (carotte S₅), le faciès organo-détritique de surface, d'une épaisseur de 40 cm, se superpose à un dépôt biogène carbonaté détritique (50 cm de puissance), qui passe à un faciès carbonaté à faune d'Ostracodes, riche en Diatomées et contenant des concrétions calcaires millimétriques;
- au Sud-Ouest (carotte C₂), les dépôts biogènes carbonatés organo-détritiques (68 cm d'épaisseur) surmontent un faciès organo-détritique (22 cm) qui pourrait correspondre à une phase d'émersion (traces de quartz, de feldspath, minéraux argileux plus abondants et présence de Diatomées aérophiles). Cet épisode assure la transition avec un niveau de base carbonaté, très pauvre en mollusques, contenant de nombreux grains calcaires, comparable au niveau de base de la carotte S₅.

CAROTTE D4 -7m



CAROTTE B1 -5.6m

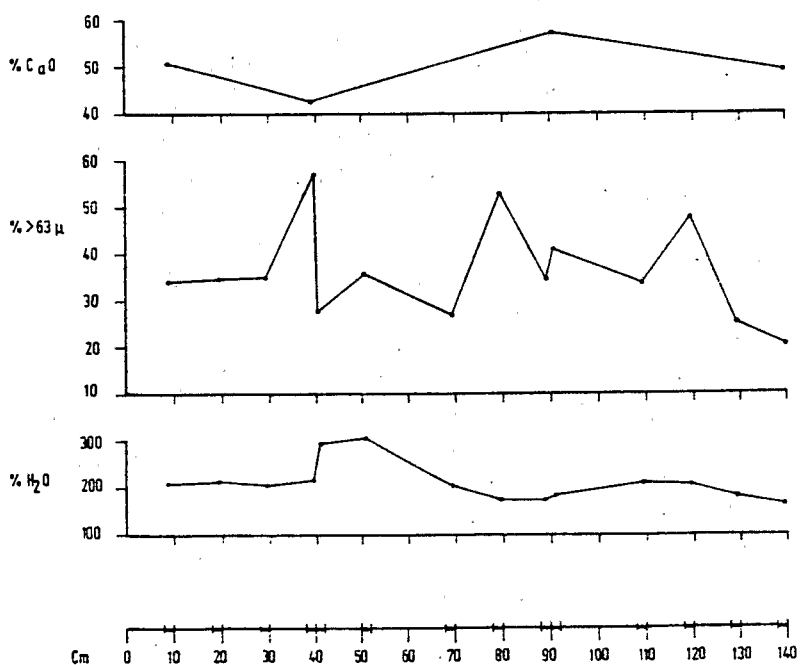
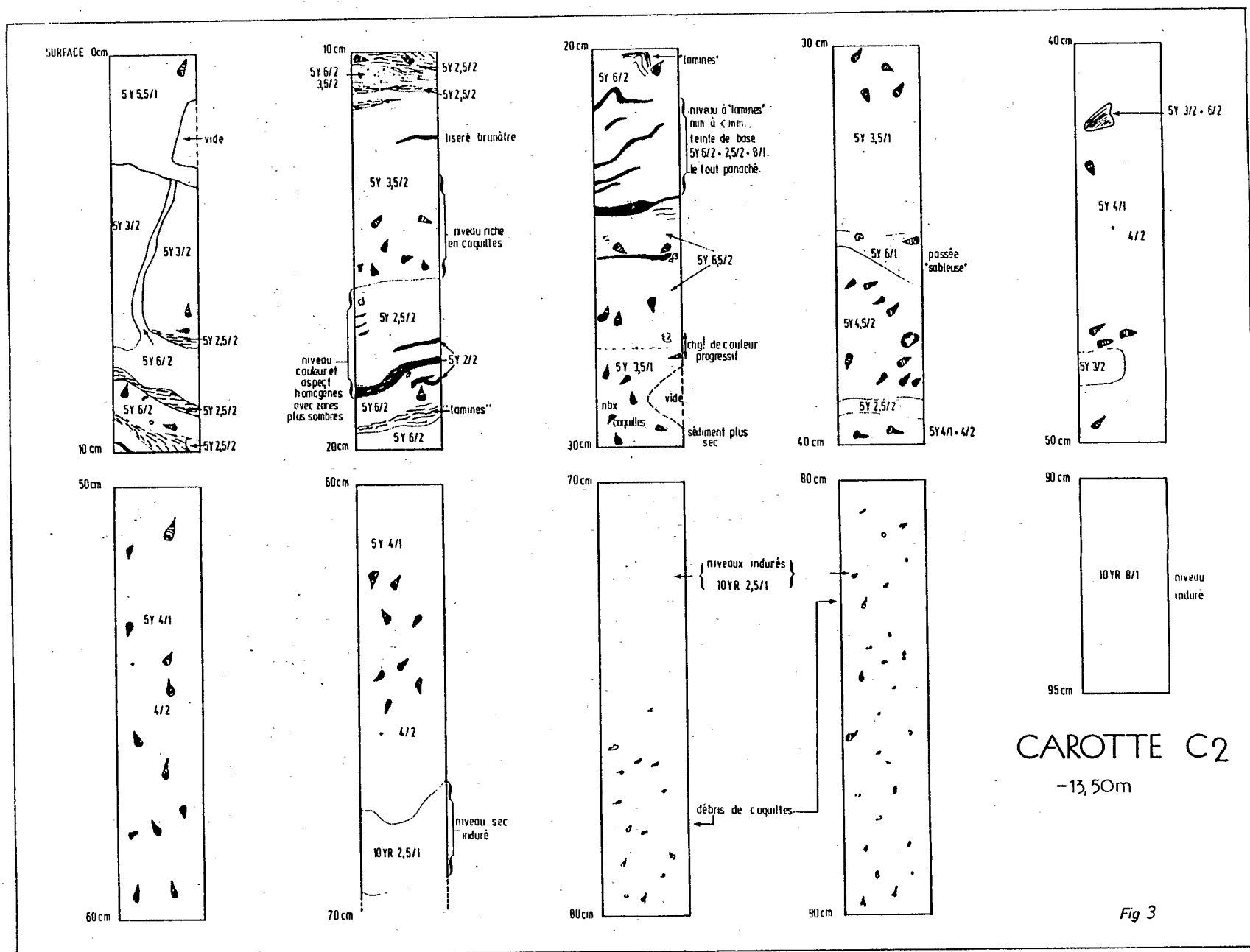


Fig. 2



Ces variations lithologiques sont absentes dans la carotte B₁, dans laquelle les dépôts biogènes carbonatés sont homogènes tout au long des 140 cm du profil.

Dans la carotte D₄, les sédiments passent progressivement d'un pôle carbonaté organo-détritique à un pôle carbonaté.

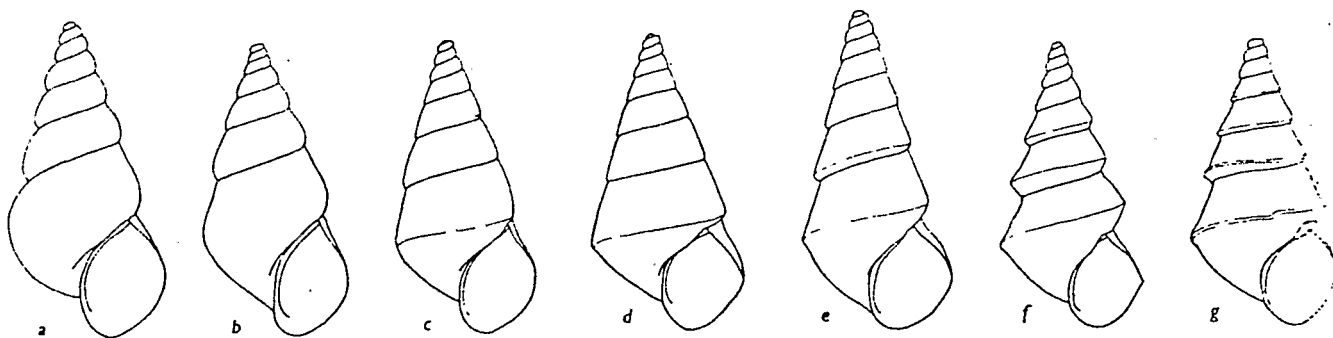
Ainsi, en fonction de la localisation dans le petit lac, les variations de la sédimentation (récente ou ancienne) sont-elles très bien marquées, plus discrètes ou absentes. Cette observation traduit l'influence de la profondeur actuelle ainsi que de la paléobathymétrie, à laquelle s'ajoutent peut-être des phénomènes de non dépôt à la faveur d'émersion due à une baisse importante du niveau du lac. C'est l'hypothèse que nous nous proposons de vérifier par l'analyse isotopique.

LA GEOCHIMIE ISOTOPIQUE. LE MATERIEL ETUDIE

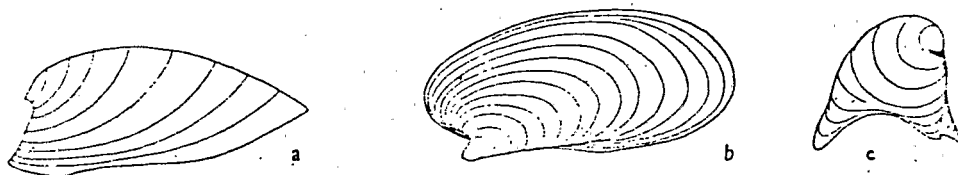
Il s'agit en majorité de coquilles de mollusques. Quelques constituants grossiers (oogones de Characées, concrétions calcaires) ainsi que certains échantillons de sédiment total ont également été analysés.

La faune de mollusques, représentée par cinq espèces dominantes a été déterminée par référence au travail de F. HAAS (1955). Ce sont (Figure 4) :

- des gastéropodes à enroulement trochospirale :
 - Littoridina* à coquille lisse
 - Littoridina* à coquille carénée;
- des gastéropodes à enroulement planispirale :
 - Taphius montanus* (D'Orbigny);
- des bivalves :
 - Sphaerelidae*;
- des mollusques à coquille univalve, de forme allongée elliptique, avec un apex prononcé situé sur le côté droit de la coquille :

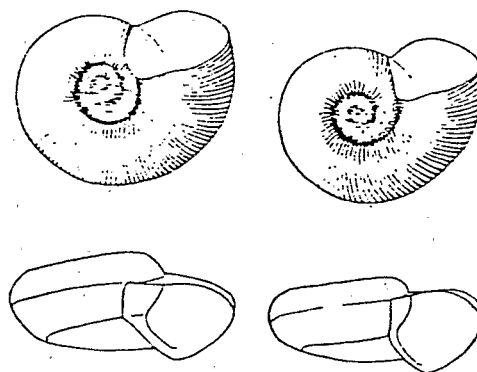


De *Littoridina andecola* (D'Orbigny) aux formes à carènes ou *culminea* (D'Orbigny) et *neveui* Bavay. x 6.



Anisancylus crequii (Bavay). x 10.

- a) vu de côté;
- b) vu de dessus;
- c) vu de l'arrière.



Thaphius montanus (D'Orbigny). Vu de dessous et de côté. x 1,6.

Ancylus crequii (BAVAY, 1904), reclassé depuis dans le genre *Anisancylus crequii* (PILSBRY, 1924).

Les bivalves vivent sur le fond, alors que les gastéropodes sont épiphytes.

Seule la composition en isotopes stables des quatre premiers groupes a été étudiée.

Les teneurs en carbone-13 et oxygène-18 des carbonates coquilliers sont exprimées en parts pour mille de différence relative à celle du carbonate standart "PDB", extrait du rostre de *Belemnitella americana* de la "Pee Dee Formation" (Caroline du Sud, USA). Pour chacune des espèces et par niveau de prélèvement, un seul individu a servi à la détermination de la composition isotopique. L'erreur expérimentale commise sur la mesure des teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ est de $\pm 0,1$ o/oo.

Les datations ^{14}C des échantillons de sédiment total sont faites par la mesure de l'activité du radiocarbone naturel -selon une méthode dite par "scintillation liquide" (FONTES, 1961)- exprimée en parts pour cent de celle d'un carbone dit "moderne", qui représente 0,95 de l'activité en 1950 de l'acide oxalique étalon, distribué par le "National Bureau of Standards" des USA.

LES RESULTATS

Les teneurs en isotopes stables, exprimées vs PDB, sont réunies dans le tableau II.

L'OXYGENE-18

Les compositions en $\delta^{18}\text{O}$ varient de + 3,80 o/oo à - 3,6 o/oo pour les oogones de Characées et les coquilles.

Actuellement la composition isotopique en ^{18}O du CO_2 atmosphérique en équilibre avec les eaux du lac Titicaca est de - 4,9 o/oo. Cette valeur a été recalculée en utilisant un $\delta^{18}\text{O}$ moyen des eaux du lac (calculée sur 74 mesures) exprimée par rapport au standart SNOW de - 4,42 o/oo (FONTES et al., 1979), sachant que :

Tableau II.- RESULTATS DE L'ANALYSE ISOTOPIQUE EN ^{18}O ET ^{13}C
exprimés en ‰ par rapport au PDB

	coquilles niveaux (cm)	<i>Littoridina</i>		<i>Taphius montanus</i> (D'Orbigny)	<i>Sphaerilidès</i>	Autres constituants
		lisse	carénée			
C A R O T T E	0-1	$\delta^{13}\text{C}$	- 0.35			
		$\delta^{18}\text{O}$	- 0.74			
	26,5-29	$\delta^{13}\text{C}$	- 2.47	+ 0.45		
		$\delta^{18}\text{O}$	- 0.99	- 0.47		
	34,5-35,5	$\delta^{13}\text{C}$	- 1.59	+ 0.17	- 0.98	+ 1.25 oogones
		$\delta^{18}\text{O}$	- 0.17	- 2.06	- 0.95	- 2.98
	59-60	$\delta^{13}\text{C}$	- 1.8			
		$\delta^{18}\text{O}$	- 0.78			
	69,5-70,5	$\delta^{13}\text{C}$	+ 1.42			
		$\delta^{18}\text{O}$	- 0.20			
	74,5-77	$\delta^{13}\text{C}$	- 0.91			
		$\delta^{18}\text{O}$	+ 3.80			
	85,5-87,5	$\delta^{13}\text{C}$	- 1.54			
		$\delta^{18}\text{O}$	- 1.26			
	92-94	$\delta^{13}\text{C}$	- 1.83			
		$\delta^{18}\text{O}$	- 0.49			
C ₂	94,5-95	$\delta^{13}\text{C}$				+ 2.86 sédiment total
		$\delta^{18}\text{O}$				- 1.00
C A R O T T E	37,5-40	$\delta^{13}\text{C}$	+ 0.12			
		$\delta^{18}\text{O}$	- 1.12			
	40-42,5	$\delta^{13}\text{C}$	+ 0.08	- 1.07	+ 2.34	- 2.06
		$\delta^{18}\text{O}$	- 0.55	- 0.56	- 0.04	- 0.53
	60-62,5	$\delta^{13}\text{C}$	- 2.72	- 3.05		- 2.65
		$\delta^{18}\text{O}$	- 1.36	- 2.41		- 1.15
	87,5-90	$\delta^{13}\text{C}$	- 2.64		- 5.04	
		$\delta^{18}\text{O}$	- 1.96		- 1.77	
	97,5-100	$\delta^{13}\text{C}$				+ 3.04 croûte calcaire
		$\delta^{18}\text{O}$				- 6.30

	coquilles niveaux (cm)	<i>Littoridina</i>		<i>Taphius montanus</i> (D'Orbigny)	<i>Sphaerilidès</i>
		lisse	carénée		
C A R O T T E	7,5-10	$\delta^{13}\text{C}$	+ 1.45		
		$\delta^{18}\text{O}$	- 2.25		
	37,5-40	$\delta^{13}\text{C}$	+ 2.24	+ 2.26	- 1.28
		$\delta^{18}\text{O}$	- 2.81	- 2.43	- 3.52
	77,5-80	$\delta^{13}\text{C}$	+ 0.96	+ 1.03	+ 0.30
		$\delta^{18}\text{O}$	- 2.98	- 1.70	- 3.10
	127,5-130	$\delta^{13}\text{C}$	+ 1.08	+ 1.52	+ 2.58
		$\delta^{18}\text{O}$	- 2.07	- 1.93	- 1.67
	137,5-140	$\delta^{13}\text{C}$	+ 0.85		
		$\delta^{18}\text{O}$	- 2.41		
C A R O T T E	7,5-10	$\delta^{13}\text{C}$	+ 5.04	+ 2.93	+ 3.21
		$\delta^{18}\text{O}$	+ 0.5	- 1.33	- 1.77
	30-32,5	$\delta^{13}\text{C}$	+ 2.40	+ 1.52	
		$\delta^{18}\text{O}$	0.00	- 1.11	
	70-72,5	$\delta^{13}\text{C}$	+ 2.78	- 0.12	
		$\delta^{18}\text{O}$	+ 0.71	- 0.38	
	90-92,5	$\delta^{13}\text{C}$	- 0.61	- 0.77	
		$\delta^{18}\text{O}$	- 0.03	- 0.60	
	117,5-120	$\delta^{13}\text{C}$	+ 1.52	- 1.89	- 3.72
		$\delta^{18}\text{O}$	- 0.52	- 1.22	- 1.38

$$^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{SNOW} = 1,01465 \cdot ^{18}\text{O}_{\text{CO}_2 \text{ équilibrant/PDB}} + 0,53307$$

En utilisant l'équation des paléotempératures proposée par CRAIG (1965) :

$$t^\circ(\text{C}) = 16,9 - 4,2 \Delta^{18} - 0,13 (\Delta^{18})^2$$

avec Δ^{18} : différence de teneurs en oxygène-18 ($\delta^{18}\text{O}$) entre le carbonate solide et l'eau du milieu, exprimées par rapport au même étalon, et en fonction des températures extrêmes enregistrées dans les eaux du lac Huyñamarca (-7°C et -15°C , LAZZARO, 1982), nous avons recherché l'intervalle des valeurs théoriques pour les $\delta^{18}\text{O}$ des coquilles, à condition que celles-ci se soient formées dans des eaux à l'équilibre avec le CO_2 atmosphérique actuel.

Pour une température de 7°C les solutions de l'équation de CRAIG sont $\delta^{18}\text{O} = -2,34 \text{ o/oo}$ et $\delta^{18}\text{O} = +24,84 \text{ o/oo}$.

Pour une température de 15°C , les solutions sont $-4,44 \text{ o/oo}$ et $+26,9 \text{ o/oo}$.

Seul l'intervalle des valeurs théoriques variant de $-4,44 \text{ o/oo}$ à $-2,34 \text{ o/oo}$ est retenu, les autres valeurs étant par trop élevées (FONTES et al., 1980). Cet intervalle est représenté en hachures sur le diagramme de la figure 5.

LE CARBONE-13

Les teneurs en $\delta^{13}\text{C}$ des carbonates coquilliers ont été normalisées par rapport à la calcite, car l'analyse minéralogique par diffraction aux RX de chaque coquille a montré que celles-ci sont composées à 100% d'aragonite.

Pour l'ensemble des échantillons, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ varient de -5 o/oo à $+5 \text{ o/oo}$.

Nous avons comparé ces valeurs aux teneurs théoriques en carbone-13, calculées pour un $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 atmosphérique de $-7,5 \text{ o/oo}$ et de $-8,5 \text{ o/oo}$ vs PDB (respectivement valeurs moyennes estimées d'été et d'hiver), en utilisant l'équation de paléotempératures proposée par FONTES et POUCHAN (1975) :

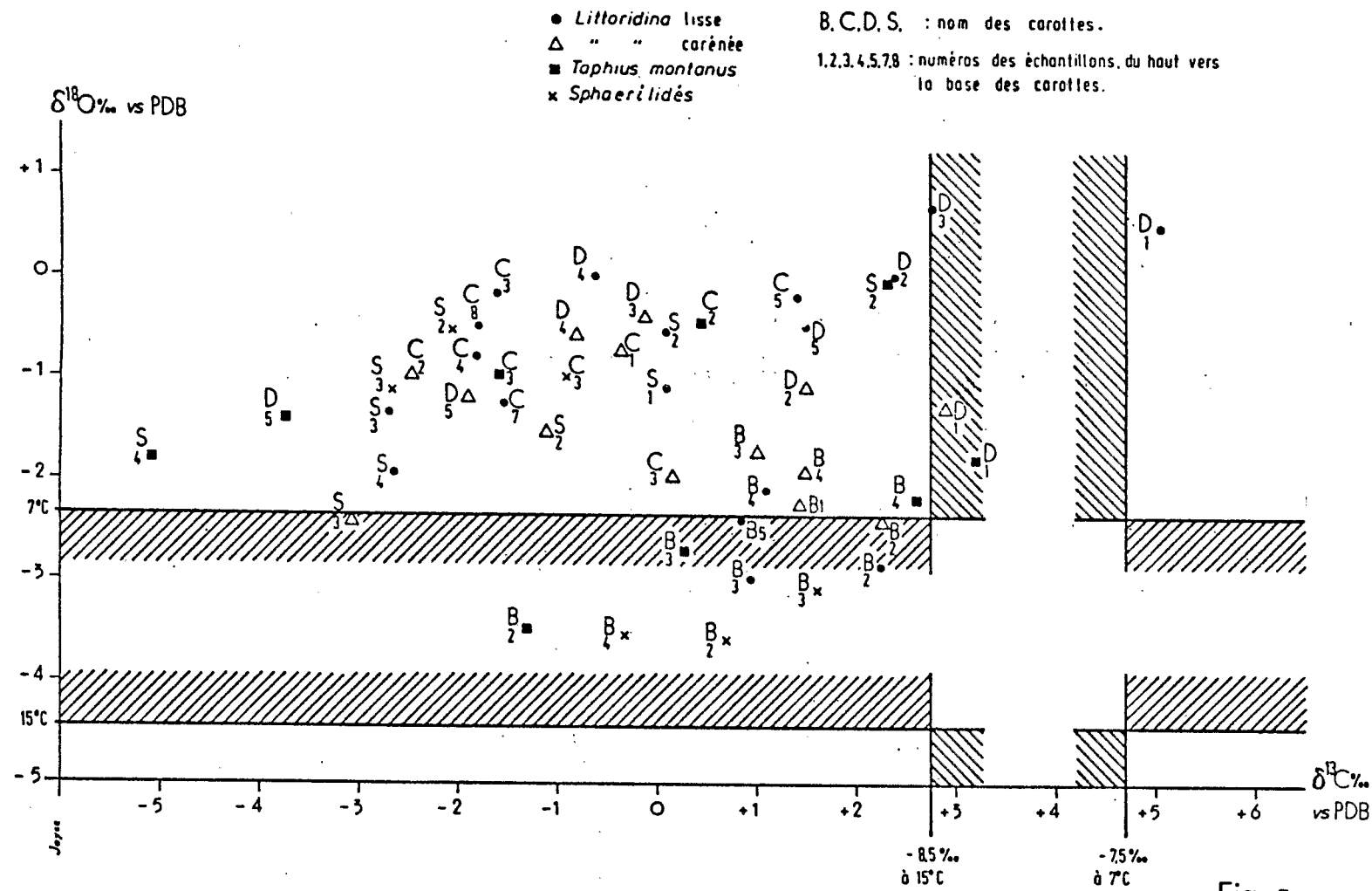


Fig. 5

$$t^{\circ}(C) = 147,7 - 14,8 \Delta^{13} - 0,266 (\Delta^{13})^2$$

avec Δ^{13} : différence de composition isotopique du carbone entre le carbonate et le CO_2 équilibrant, exprimée vs PDB, ceci pour les températures extrêmes de l'eau du petit lac.

Les résultats théoriques (voir tableau ci-dessous) permettent de définir un intervalle de mesures variant de + 2,74 o/oo à + 4,67 o/oo, représenté en hachures sur le diagramme de la figure 5.

Valeurs théoriques du $\delta^{13}C$ du carbonate
coquillier exprimées vs PDB

$t^{\circ}C$ des eaux du petit lac \ $\delta^{13}C$ du CO_2 atm.	- 7,5 o/oo (été)	- 8,5 o/oo (hiver)
7	+ 4,67 o/oo	+ 3,67 o/oo
15	+ 3,74 o/oo	+ 2,74 o/oo

DISCUSSION

L'OXYGENE-18

Dans l'ensemble les teneurs en $\delta^{18}O$ du carbonate coquillier sont enrichies par rapport aux valeurs théoriques calculées en fonction des températures extrêmes des eaux du lac et dans des conditions d'équilibre avec le CO_2 atmosphérique actuel.

Ce phénomène général (Figure 5) traduit un processus de concentration des isotopes lourds dans les eaux, qui peut être expliqué par une baisse du niveau du lac (évaporation intense) et/ou par l'hétérogénéité de la masse d'eau (venues souterraines par exemple). Au vu des connaissances actuelles il semblerait que ce soit l'ampleur des phénomènes d'évaporation qui joue un rôle primordial, car les eaux du lac sont bien brassées (FONTES et al., 1979).

Seule la majeure partie des valeurs de la carotte B₁ sont bien regroupées au sein de l'intervalle théorique. Cette observation montre que les conditions de croissance des gastéropodes dans ce secteur ont été similaires à celles d'aujourd'hui, donc que les dépôts de la carotte B₁ sont récents. La confirmation en est donnée par l'âge de la base du prélèvement : 280 ans $\pm$ 120 B.P. (cf. paragraphe suivant).

Le cas des échantillons superficiels des carottes D₄, C₂ et S₅ pose un problème. En effet, les teneurs en $\delta^{18}O$ des carbonates coquilliers sont enrichies par rapport aux valeurs théoriques calculées dans des conditions d'équilibre avec le milieu actuel. Pour l'instant aucun argument sédimentologique ne permet d'expliquer cette observation.

LE CARBONE-13

Le spectre des mesures est très grand, il s'étale de - 5 o/oo à + 5 o/oo. Par rapport à l'intervalle théorique, l'ensemble des teneurs est appauvri (Figure 5).

Les travaux de MOOK et VOGEL (1968), de FRITZ et POPLAWSKI (1974) ainsi que de LEMEILLE (1980) ont montré que le carbonate coquillier se dépose dans des conditions très proches de l'équilibre avec le bicarbonate dissous, aux facteurs de fractionnement isotopique près. Ainsi les teneurs en ^{13}C des coquilles sont-elles le reflet de l'origine du carbone dissous dans l'eau du milieu. Deux mécanismes président à la formation d'ions bicarbonates dans un lac :

- l'un résulte de la dissolution directe du CO₂ atmosphérique,
- l'autre provient de la respiration des plantes aquatiques et de la décomposition de la matière organique.

Ces deux voies produisent des effets opposés quant à la composition isotopique des carbonates élaborés. Le carbone d'origine inorganique conduit à des teneurs enrichies, alors que le carbone biochimique est appauvri en ^{13}C par rapport au CO_2 atmosphérique.

De tous les carbonates coquilliers seuls ceux des échantillons de surface de la carotte D_4 ont précipité dans des conditions d'équilibre avec le CO_2 atmosphérique actuel. Les autres teneurs rendent compte de la participation -de plus en plus sensible vers la base des carottes- du carbone organique dans l'élaboration du carbonate coquillier.

Ce résultat n'est pas incompatible avec un taux d'évaporation élevé. En effet, une baisse du niveau des eaux va entraîner l'accroissement relatif de l'importance de la végétation aquatique et de la matière organique par rapport au volume du lac, d'où le renforcement des apports en carbone organogène, renforcement qui va contrebalancer l'effet de concentration en isotopes lourds dû à l'évaporation.

Pour l'instant, en l'absence de données plus sérieuses, il n'a pas été possible de chiffrer la baisse du niveau du lac.

Cependant, et sous toutes réserves, l'on peut essayer d'évaluer l'ampleur de ce phénomène. COLLOT (1980) a montré que les macrophytes du lac ne se développent bien qu'entre 0 et 8 mètres de profondeur. Or dans le cas de la carotte S_5 , prélevée actuellement sous 17 mètres d'eau, toutes les teneurs en $\delta^{13}\text{C}$ -sauf une- sont inférieures à 0,3 o/oo et varient jusqu'à - 5 o/oo dans les niveaux de base. Une telle diminution doit faire parvenir un apport très marqué en carbone organique, ce qui impliquerait une baisse du niveau du lac de l'ordre de la dizaine de mètres, afin d'augmenter considérablement le taux de végétation aquatique dans ce secteur. Cette évaluation ne paraît pas exagérée au vu des premières indications fournies par la flore de Diatomées (S. SERVANT-VILDARY, communication personnelle). En effet, les associations rencontrées plaident en faveur d'une paléobathymétrie de l'ordre de 2-3 mètres avec conjointement la présence d'un milieu chloruré-sodique dont la concentration était de plus de 15 gr/l, et ce pour la base des carottes S_5 et C_2 .

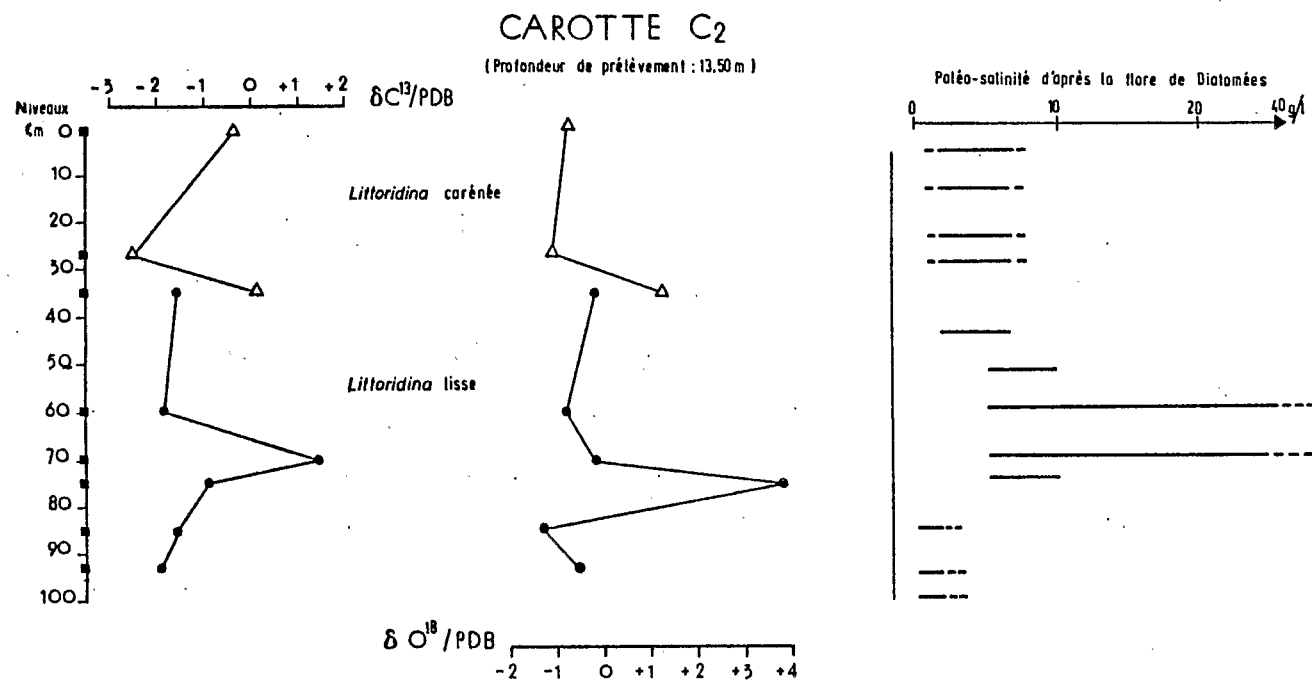


Fig. 6

A titre d'exemple, l'évolution de la paléosalinité a été confrontée aux variations des teneurs en ^{13}C et ^{18}O des carbonates coquilliers le long du profil C_2 (Figure 6). La corrélation teneurs en isotopes lourds-paléosalinité est très bonne. L'augmentation des valeurs en carbone-13 et oxygène-18 dans le niveau 80-60 cm traduit un fort épisode d'évaporation, dont la réponse est l'élévation considérable de la concentration en sels de l'eau du lac. Le retour à des conditions normales se faisant ensuite.

LE CARBONE-14

Les âges radiométriques obtenus sont les suivants :

	<u>Niveaux en cm</u>	<u>Age</u>
Carotte B_1	0-7,5	Actuel
	132,5-137,5	280 ans $\pm$ 120 B.P.
Carotte D_4	0-7,5	Actuel
	112,5-117,5	1820 ans $\pm$ 280 B.P.
Carotte C_2	60-70	3650 ans $\pm$ 330 B.P.
	70-80	5325 ans $\pm$ 395 B.P.
	90-95	12460 ans $\pm$ 2000 B.P. (à reconfirmer)
Carotte S_5	93,5-97,5	5080 ans $\pm$ 110 B.P.

Ces résultats permettent de donner quelques indications relatives à la vitesse de sédimentation, tout en notant qu'il ne s'agit que de valeurs préliminaires qu'il conviendra de préciser par une étude ultérieure spécifique.

Le taux moyen de sédimentation actuelle dans le secteur est du petit lac, pour des dépôts biogènes carbonatés (carotte B_1) est de 5 mm/an. Cette valeur est la plus forte notée jusqu'à présent pour des sédiments de ce type (FONTES et al., 1981).

La vitesse d'accumulation des dépôts carbonatés a varié au cours des derniers millénaires. En effet la carotte D_4 donne une valeur de 0,6 mm/an.

Les carottes S₅ et C₂, fournissent des taux nettement plus faibles, moins de 0,2 mm/an. Ces valeurs doivent être considérées comme exceptionnelles et liées aux conditions particulières d'environnement dues à la phase de baisse du niveau du lac. Cette période comprise entre 3650 et 5325 ans B.P. est à corréler au phénomène d'assèchement du climat dans la zone intertropicale, déjà signalé par VAN DER HAMMEN, 1974; VAN DER HAMMEN et al., 1978; SOUBIES, 1979-1980.

CONCLUSIONS

Cette première analyse de la géochimie isotopique des carbonates coquilliers du lac Huaynamarca souligne l'importance des phénomènes climatiques qui ont affecté le bilan hydrologique du lac Titicaca.

L'échantillonnage actuellement en cours d'étude ainsi que les carottages de grande taille qui seront réalisés en juin 1983 avec la participation de C. BARTON (Université de Rhode Island, USA) permettront de préciser la première chronologie des variations lacustres établie par SERVANT et FONTES (1978).

BIBLIOGRAPHIE

- BAVAY (A.) -1904- Mission de Créqui-Montfort et Sénéchal de la Grange en Amérique du Sud. Mollusques terrestres et fluviatiles récoltés par le Dr. Neveu-Lemaire. *Bull. Soc. zool. Fr.*, XXIX : 152-156.
- 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. trop.* 14, 4 : 299-309.
- CARMOUZE (J.P.), ARCE (C.) et QUINTANILLA (J.) -1977- La régulation hydrique des lacs Titicaca et Poopó. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol.*, XI, 4 : 269-284.
- COLLOT (D.) -1980- Les macrophytes de quelques lacs andins (lac Titicaca, lac Poopó, lacs des vallées d'Hicchu-Kkota et d'Ovejhujo). Travaux réalisés au cours du VSNA en Bolivie, doc. dact., inédit, 115 p.
- CRAIG (H.) -1965- The measurement of oxygen isotope paléotemperature. In E. TONGIORGI (ed.), *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*, Spoleto, CNR, Pisa.
- FONTES (J.C.) -1961- Un ensemble destiné à la mesure de l'activité du radiocarbonate naturel par scintillation liquide. *Rev. de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, 2, v. XIII, Fasc. I : 67-86.
- FONTES (J.C.), POUCHAN (P.) -1975- Les cheminées du lac Abbé (Djibouti) : stations hydroclimatiques de l'Holocène. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, D, 280 : 383-386.

- FONTES (J.C.), BOULANGE (B.), CARMOUZE (J.P.), FLORKOWSKI (T.) -1979- Preliminary oxygen-18 and deuterium study of the dynamic of Lake Titicaca. p. 145-150. *In Isotopes in Lake Studies*, International Atomic Energy Agency, Vienne, 1979.
- FONTES (J.C.), GAUDANT (J.), TRUC (G.) -1980- Données paléoécologiques, teneurs en isotopes lourds et paléohydrologie du bassin gypsifère oligocène d'Aix en Provence. *Bull. Soc. Géol., Fr.*, 7, t. XXII, 3 : 491-500.
- FONTES (J.C.), BOULANGE (B.), RODRIGO (L.A.) -1981- Carbone-14, carbone 13 et oxygène-18 dans les sédiments carbonatés du lac Titicaca. Premières estimations des vitesses de sédimentation et essai de paléoclimatologie. *C.R. Acad. Sc. Paris, D*, 293 : 53-56.
- FRITZ (P.), POPLAWSKI (S.) -1974- ^{18}O and ^{13}C in the shells of fresh water molluscs and their environments. *Earth and Planetary Sci. Letters*, 24 : 91-98.
- HAAS (F.) -1955- Percy Sladen Expedition : XVII Mollusca : Gastropoda. Reprinted from the transactions of the Linnean Society of London, 275-308.
- LAZZARO (X.) -1982- Peuplements, biomasses et productions phytoplanctoniques du lac Titicaca. Thèse 3e cycle, Paris VI, 144 p.
- LEMEILLE (E.) -1980- Contribution à la géochimie isotopique et à la minéralogie des carbonates lacustres : l'aragonite des coquilles de mollusques. Thèse 3e cycle, Paris VI, Orsay, 87 p.
- MOOK (W.G.), VOGEL (J.C.) -1968- Isotopic equilibrium between shells and their environment. *Science*, 159 : 874-875.
- PILSBRY (H.A.) -1924- South American land and fresh-water mollusks. Notes and descriptions. I. Mollusks of Lake Titicaca. *Proc. Acad. Nat. Sci. Philad.* LXXVI : 49-51.

- SERVANT (M.), FONTES (J.C.) -1978- Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, X, 1 : 9-23.
- SERVANT-VILDARY (S.) -1981- Communication personnelle.
- SOUBIES (F.) -1979-1980- Existence d'une phase sèche en Amazonie brésilienne datée par la présence de charbons dans les sols (6000-3000 ans B.P.). *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, XI, 1 : 133-148.
- VAN DER HAMMEN (T.) -1974- The Pleistocene changes of vegetation and climate in tropical South America. *Journal of Biogeography*, 1 : 3-26.
- VAN DER HAMMEN (T.), CORREAL URREGO (G.) -1978- Prehistoric man on the sabana de Bogota : data for an ecological prehistory. *Paleogeogr., climatol., ecol.*, v. 25, 1-2 : 179-190.
- VARGAS (C.) -1982- La sédimentation subactuelle d'un bassin intramontagneux : le lac Titicaca (Partie lac Huyñamarca - Bolivie). Thèse 3e cycle, Bordeaux I, 91 p.
- X WIRRMANN (D.) -1981- Rapport de stage, dactylographié, inédit, 17 p. Marseille-Luminy, mars 1981.

ORSTOM - BOLIVIE
DOCUMENTATION



RESUME

L'étude de géochimie isotopique des carbonates coquilliers de quatre carottes du lac Huyñamarca (Bolivie), ainsi que les datations au carbone-14 de quelques échantillons montrent qu'au cours des dix derniers millénaires le bilan hydrologique du lac Titicaca a considérablement varié. Une phase sèche, située entre 3650 et 5325 ans B.P. se traduit par une baisse du niveau du lac d'au moins dix mètres par rapport à l'actuel, avec comme corrolaire l'augmentation de la teneur en sels dissous dans les eaux (plus de 20 gr/litre).

RESUMEN

El estudio de geoquímica isotópica de los carbonatos de las conchas de cuatro testigos del lago Huyñamarca (Bolivia), así como de las dataciones al Carbono-14 de algunas muestras, demuestran que durante los últimos diez millones de años el balance hidrológico del lago Titicaca ha variado considerablemente. Una fase seca, situada entre 3650 y 5325 años B.P. se traduce por una baja del nivel del lago de por lo menos diez metros, en comparación del nivel actual, teniendo ésta como consecuencia un aumento de las sales disueltas en las aguas (mas de 20 gr/litro).