

La sédimentation actuelle dans le lac Titicaca⁽¹⁾

Bruno BOULANGÉ*, Carlos VARGAS**,
Luis Alberto RODRIGO**

RÉSUMÉ

Dans ce travail, qui ne se veut être qu'une approche de la sédimentation actuelle, il est d'abord présenté une détermination qualitative des sédiments détritiques transportés par les principaux affluents, en relation avec le contexte géologique du bassin. Les sédiments superficiels sont répartis suivant 6 faciès en fonction de leurs teneurs en éléments détritiques, carbonate de calcium et matière organique. Une carte de distribution est présentée. Une mesure de datation (¹⁴C) a été effectuée indiquant une vitesse de sédimentation de 0,5 mm/an.

MOTS-CLÉS : Lac Titicaca — Amérique du Sud — Sédimentologie.

ABSTRACT

THE PRESENT SEDIMENTATION IN LAKE TITICACA

In this work which claims to be only an approach to the present sedimentation, there is, first, a qualitative determination of the detrital sediments carried by the main tributaries as influenced by the geological conditions of the basin. The distribution of the surface sediments is mapped out into 6 facies according to their percentages of detrital elements, calcium carbonate and organic matter. Moreover, a settling velocity amounting to 0,5 mm/year was revealed through the ¹⁴C method.

KEY WORDS : Lake Titicaca — South America — Sedimentology.

RESUMEN

LA SEDIMENTACIÓN ACTUAL EN EL LAGO TITICACA

En ese trabajo que quiere ser sólo una aproximación de la sedimentación actual, se presenta primero una determinación cualitativa de los sedimentos detríticos transportados por los principales afluentes respecto a las condiciones geológicas de la cuenca. Se levanta un mapa de la distribución de los sedimentos superficiales según seis facies determinados por sus contenidos de elementos detríticos, carbonato de calcio y materia orgánica. Además, se determinó una velocidad de sedimentación de 0,5 mm/año por medio de un método de datación (¹⁴C).

PALABRAS CLAVES : Lago Titicaca — América del Sur — Sedimentología.

(1) Étude réalisée dans le cadre de la convention signée entre l'Universidad Mayor de San Andrés (La Paz, Bolivie) et l'O.R.S.T.O.M.

* O.R.S.T.O.M. Géologie, 24, rue Bayard, 75008 Paris (France).

** Departamento de geología, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz (Bolivia).

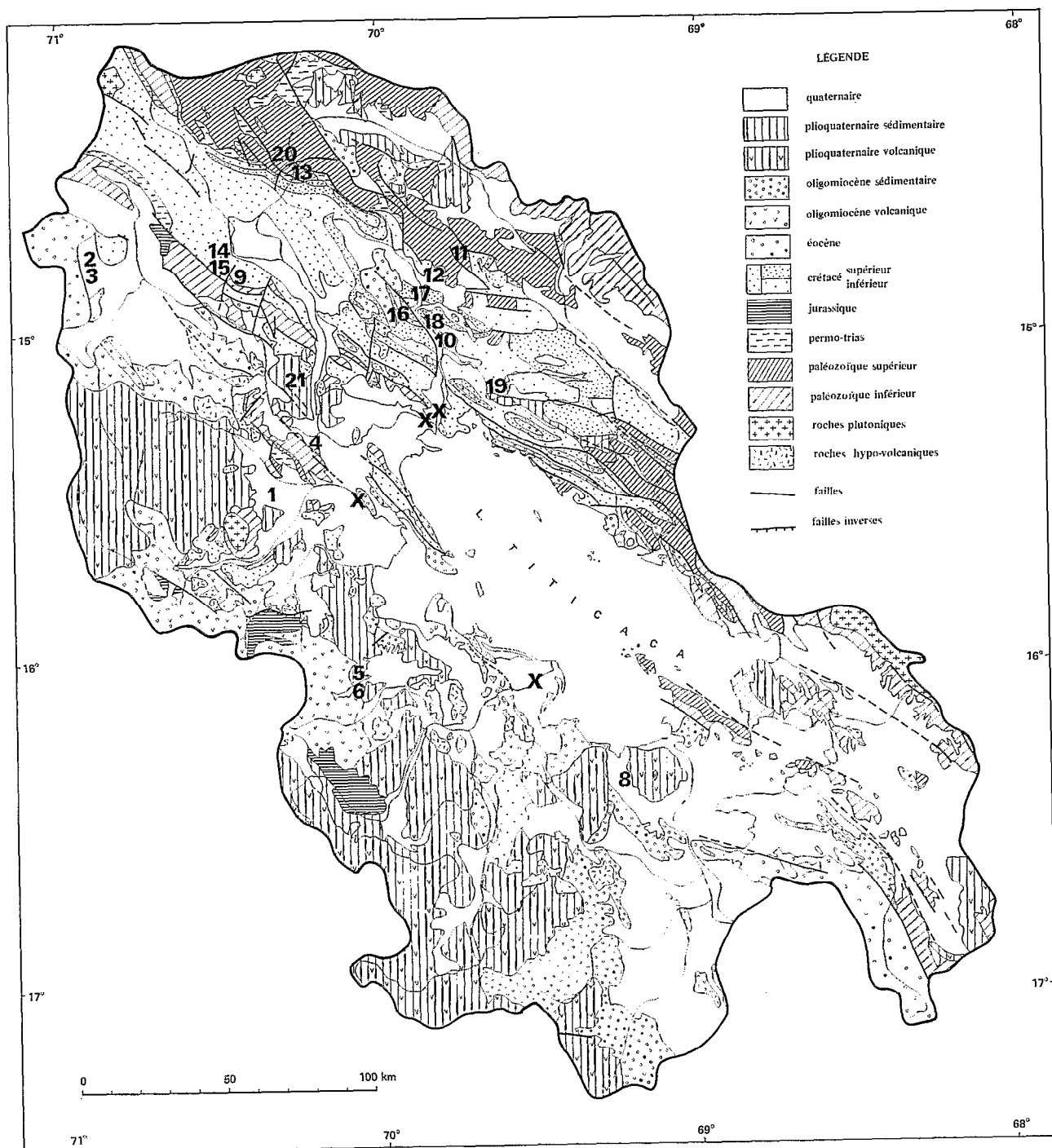


FIG. 1. — Carte géologique. Localisation des points de prélèvements sur les affluents

Le lac Titicaca, traversé par la frontière de la Bolivie et du Pérou, est situé sur le haut plateau andin, Altiplano, entre les Cordillères Orientale et Occidentale. Son étude morphologique et climatologique est présentée par ailleurs (BOULANGÉ *et al.*, 1981).

C'est une dépression conique d'origine tectonique (LAVENU, 1981), dont la profondeur maximale est de 284 m. Les côtes sont abruptes quand elles correspondent aux directions de failles, plates quand elles correspondent aux plaines alluviales.

Les principales plaines alluviales sont celles des Rios Ramis et Huancane, Coata, Ilave, Suhez dans le Grand Lac, et des Rios Tiwanaku et Batallas dans le Petit Lac. Les cours inférieurs de ces rios ont une pente très faible.

Le climat, pour l'ensemble du bassin, est un climat de montagne semi-aride. Les températures moyennes annuelles sont de 9 °C aux abords du lac, de 6 °C dans les plaines éloignées du lac. La température des eaux du lac se maintient toute l'année aux environs de 11 °C. Les précipitations se répartissent suivant 4 périodes : une période humide (décembre à mars), une période sèche (mai à août) et deux périodes de transition. La hauteur des précipitations est de 650 à 700 mm sur le bassin, et d'environ 950 mm sur le Grand Lac, 800 mm sur le Petit Lac.

La direction dominante des vents est NNE-SSW.

Conjointement aux études physico-chimiques des eaux menées entre 1975 et 1978 (CARMOUZE *et al.*, 1981 a), il paraissait intéressant de définir, dans une première approche, ce qu'est la sédimentation actuelle dans ce milieu fermé. Un échantillonnage des sédiments de surface a été effectué durant cette période. De plus, une détermination qualitative des apports solides provenant des affluents a été faite en relation avec les apports en solution (CARMOUZE *et al.*, 1981 b).

Il apparaît, en raison de la faible pente du cours aval des rivières et du filtre que représente la végétation de bordure du lac (*Tolara* (1) et algues) (COLLOT, 1980) que la sédimentation détritique est assez faible et que les facteurs de la sédimentogénèse sont essentiellement bio-géochimiques. C'est donc en fonction des teneurs en carbonate de calcium, en matière organique et en résidus insolubles que seront définis différents faciès dont nous représenterons ici la carte de répartition.

1. APPORTS FLUVIATILES

Des échantillonnages ont été effectués à l'embouchure des grandes rivières du bassin et sur quelques affluents en essayant de tenir compte au maximum d'une homogénéité géologique de la source d'apport. La situation des prélèvements est donnée sur la carte de la figure 1 (2).

Les déterminations qualitatives des minéraux lourds ont été faites sur la fraction 50-500 μ . Les fractions légères des sédiments ont fait l'objet d'une étude aux RX (3).

Les résultats sont reportés dans les tableaux 1 et II. Il est possible de préciser les caractères minéralogiques des sables en quatre grands groupes :

— les sables d'origine volcanique (éch. 21, 5 et 7).

Ils ont un pourcentage pondéral de minéraux lourds relativement élevé, toujours supérieur à 1 %. Trois espèces minérales principales sont réparties en proportions variables : pyroxène monoclinique, hypersthène, hornblendes vertes et brunes. La fraction légère contient quartz, labrador et des traces de mica.

— les sables des formations dévoniennes (éch. 9).

Ils se caractérisent par un fort pourcentage de minéraux résistants (tourmaline, zircon) usés, et par la présence de minéraux d'origine métamorphique (hornblende-andalousite).

La fraction légère est surtout formée de quartz avec une très faible quantité de plagioclases, kaolinite et smectites;

— les sables des formations carbonifères (éch. 20, 13, 11).

Les minéraux résistants sont abondants. Ces sables se caractérisent surtout par la présence d'andalousites, très belles, non usées, limpides, avec pléochroïsme rose saumon (éch. 20).

La fraction légère est surtout formée de quartz avec traces de micas, de plagioclases, de kaolinite et de smectites.

— les sables des formations crétacées (éch. 14, 10, 19).

Ils se caractérisent par l'importance des minéraux résistants (zircons, tourmalines) fortement usés,

(1) *Tolara* : Cypéracée caractéristique du lac dont la tige peut atteindre 4 m. Les habitants des bords du lac les utilisent pour fabriquer des embarcations (balsa), des nattes... et comme nourriture pour le bétail.

(2) L'esquisse géologique du bassin a été dressée à partir des documents suivants : carte structurale des Andes septentrionales de Bolivie au 1.000.000^e (C. MARTINEZ-O.R.S.T.O.M. et ERTS-GEOBOL, Bolivie); carte géologique de la Cordillère orientale et de l'Altiplano au 1.500.000^e (G. LAUBACHER-O.R.S.T.O.M. et INGEOMIN-Pérou); les cartes géologiques du département de Puno au 1.250.000^e INGEOMIN-Pérou.

(3) Laboratoire de Géologie. O.R.S.T.O.M. M^{me} DELAUNE-MAYÈRE, M. VERDONI.

TABLEAU I

Distribution des minéraux lourds des sédiments des rivières en relation avec les unités géologiques (M^{me} DELAUNE-MAYÈRE)

Origine	N°	Olivine	Hypersthène	Pyrox. Mon.	Augite tit.	Hornblende	Andalousite	Sillimanite	Disthène	Staurolite	Grenat	Epidotes	Zircon	Tourmaline	Rutile	Monazite	Anatase	% pondéral
Volcanique....	21	2	13	64		16						3	2					7.70
	5	+	39	45		11						3	2					2.14
	7		32	48		20							+					4.65
Devonien.....	9			6	+	10	12	+		1	+	9	28	27	2		5	0.13
Carbonifère....	20			1	2	+	14				+	7	46	17	8	3	2	0.12
	13			6	1	+	61	1	+		1	8	12	10	+	+		0.73
	11						52	1					28	14	3	1	1	0.24
Crétacé.....	14			2	8	1	15	+	2	+	1	1	56	7	3	+	6	0.09
	10			25		1	10						23	17		1	2	0.02
	19			+	+	2	7						56	29	+	1	4	0.014
Devonien ?...	1		36	42		12					1	7	1		1			1.23
Groupe Puno..	2		9	39		30					6	5	11			+		8.60
R. Ramis....			7	70		10	4	1			+	7	+		+	1		0.78
R. Huancane..				3		8	2					6	44	25	4	1	7	0.05
R. Coata.....			16	58		15	+					11						3.76
R. Ilave.....			32	32		32						2			1	1		6.92

provenant vraisemblablement de sédiments éoliens. Ils ont une très faible teneur en minéraux lourds. L'échantillon 14, prélevé dans une rivière drainant le crétacé inférieur, contient de l'augite titanifère.

La fraction légère contient des quartz et des traces de plagioclases et smectites.

L'échantillon 1 prélevé à la sortie d'un bassin dévonien et l'échantillon 2 prélevé à la sortie d'un bassin drainant les formations du groupe Puno (Tertiaire) paraissent plus en relation avec les sables volcaniques.

Cette distinction, en raison du petit nombre de prélèvements ne peut donc être considérée de manière rigoureuse, sinon en tant que simple donnée sur l'origine des apports.

Au niveau des grands affluents, toutes ces données se trouvent intégrées et il n'apparaît que le caractère dominant du bassin.

1.1. Rio Ramis

Il comprend deux grands bassins, l'un au nord drainant des formations carbonifères (20, 13), crétacés (14) (Rio Azangaro), et dévoniennes (9), l'autre à l'ouest (Rio Pucara) drainant des formations du

Groupe Puno (1) et des formations volcaniques (21).

Ce sont ces dernières qui, en raison de leur forte proportion de minéraux lourds marquent le plus les caractères de ces sables : les pyroxènes monocliniques, les hornblendes et l'olivine sont abondants.

La fraction légère est surtout formée de quartz (80 %), de labrador (20 %) avec traces de micas et de smectites.

La fraction en suspension se caractérise par la présence de montmorillonite et d'illite avec un peu de chlorite, de quartz et de feldspaths.

1.2. Rio Huancane

Son bassin versant relativement homogène draine les terrains crétacés (10, 19). Les sables reflètent cette homogénéité.

1.3. Rio Ilave et Rio Coata

Leurs bassins versants sont presque entièrement sur roches volcaniques (1, 5, 7). Les sables en ont les caractères principaux.

La fraction en suspension se caractérise par l'abondance de montmorillonite, avec traces d'illite, chlorite, quartz et feldspaths.

TABLEAU II

Détermination minéralogique de la charge solide des eaux et de la fraction légère des sédiments

Origine	N°	Quartz	Labrador	Plagioclases	Micas	Smectites	Kaolinite	Montmor.	Illite
Volcanique (sable)	21 5 7	+++ ++ +++	+++ ++++ +++		++ +				
Devonien (sable)	9	++++		+		+	+		
Carbonifère (sable)	20 13 11	++++ ++++ ++++		++ ++	++ ++ +	++ ++ +	+		
Crétacé (sable)	14 10 19	++++ ++++ ++++		++ +		++ ++ +	+		
Devonien ? (sable)	1	+++	++		++	+			
Groupe Puno (sable)	2	+++	+++						
R. Ramis (sables) (suspension)		++++ +	+++	+	+	++ ++	+	+++	+++
R. Huancane (sables)		++++		+		+			
R. Coata (sables) (suspension)		+++ +	+++	+		++	+	++++	++
R. Ilave (sables) (suspension)		+++ +	+++	+		++	+	++++	++

1.4. Rio Suchez

Les analyses ont porté uniquement sur le matériel en suspension. Il se caractérise par l'abondance d'illite, un peu de montmorillonite et des traces de kaolinite.

La fraction sableuse est essentiellement formée de quartz.

2. LES SÉDIMENTS LAGUSTRES

Les sédiments de surface étudiés ici correspondent à des prélèvements effectués jusqu'à 20 cm; ceux-ci

ont été réalisés à l'aide d'une benne (Type EKMAN) confectionnée sur place, pour les fonds inférieurs à 40 m, et d'une drague (cylindre métallique muni d'une poche en toile) pour les fonds supérieurs à 40 m.

Les prélèvements se répartissent comme suit :

- 50 points sur le Petit Lac,
- 40 points sur la partie bolivienne du Grand Lac,
- 10 points sur la partie péruvienne du Grand Lac

Les sédiments ont été traités dans leur ensemble au laboratoire de l'UMSA. Les analyses ont porté sur les déterminations quantitatives de la matière organique par calcination (1) et du carbonate de

(1) La calcination a été effectuée successivement à 500° puis à 1000° pour tenir compte de la décomposition de CO_3Ca dans l'évaluation de la matière organique.

calcium par calcimétrie; de plus quelques granulométries et séparations d'argiles ont été effectuées.

Trois composantes ont été retenues pour la détermination des faciès actuels de sédimentation : la matière organique et le carbonate de calcium particulièrement abondants, et les résidus insolubles à l'acide.

Des cartes de répartition ont été établies pour chacune de ces composantes. Leur superposition a permis de définir des zones de sédimentation présentant chacune un faciès caractéristique dont les résultats analytiques sont présentés sur un triangle de composition (cf. fig. 2).

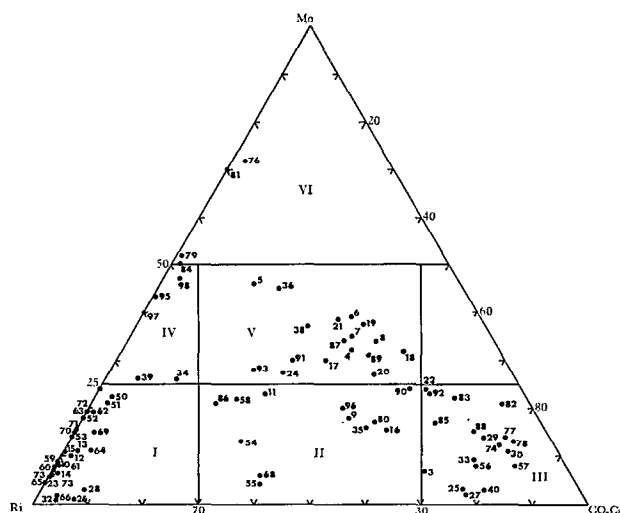


FIG. 2. — Triangle de composition : matière organique, MO ; carbonate de calcium, CO_3Ca ; résidu insoluble, Ri

Ces faciès, dont la distribution est présentée sur la carte de la figure 3 sont au nombre de six :

- faciès détritique (I),
- faciès détritique carbonaté (II),
- faciès carbonaté (III),
- faciès organo-détritique (IV),
- faciès organo-détritique carbonaté (V),
- faciès organique (VI).

2.1. Description des faciès

2.1.1. FACIÈS DÉTRITIQUE (I)

Ces sédiments ont plus de 70 % de matériaux détritiques, moins de 25 % de matière organique et très peu de carbonate. Ils se répartissent sur les zones de bordure et aux débouchés des affluents. La majeure

partie des sédiments des zones profondes du Grand Lac appartiennent à cette catégorie. Il convient de distinguer les galets, les sables, les vases sableuses et les vases argileuses (1).

(a) Les galets

Les fonds couverts de galets prolongent les plages à galets sur toute la côte nord du Petit Lac entre Chua et Huatajata (H1 à H5). Ce sont principalement des galets de grès et quartzites à formes dominantes tabulaires et sphéroïdales. La moyenne des grands axes est comprise entre 6 et 9 cm et leur indice de sphéricité est de 0,7.

Ces galets proviennent directement des formations Pliocène dans lesquelles ils ont les mêmes caractéristiques. Ils n'ont subi qu'un très faible remaniement, l'action des vagues étant inexistante en raison de la présence d'une bande protectrice de « totorales ».

A l'extrémité de la péninsule de Taraco se trouve aussi une frange de galets de grès et quartzites beaucoup mieux classés. Ils sont de forme sphérique, plus rarement tabulaire. Leur dimension moyenne est de 5 cm, leur indice de sphéricité de 0,8 à 0,9. Ils proviennent des dépôts conglomératiques de la formation Taraco.

Au nord-est du Petit Lac en bordure de la presqu'île de Copacabana, les galets sont des débris de roches volcaniques; leur taille moyenne est de 12 cm. Ils sont équidimensionnels et ont conservé une forme angulaire. Ils proviennent de dépôts conglomératiques volcaniques d'une formation équivalente à la formation Taraco.

Sur les bords du Grand Lac, les formations anciennes à galets étant rares les seuls épandages reconnus, sont dans la Baie de Copacabana. Ce sont les mêmes galets d'origine volcanique.

(b) Les sables

Les fonds sableux sont peu étendus. Ils se localisent face aux plages sableuses, aux débouchés des Rios Suhez et Ilave le long de la côte ouest du Petit Lac.

Le long de la côte ouest du Petit Lac (94) les sables sont composés de 2 % de sable moyen, 65 % de sables fin et très fin, 27 % de limons et argiles, et 6 % de matière organique. Ces sables contiennent surtout des grains de quartz angulaires à subarrondis, des biotites, quelques feldspaths, amphiboles et pyroxènes. Ils proviennent des roches volcaniques du Cerro Capia.

Dans le Grand Lac, en face du Rio Suhez, les fonds sableux (65, 66, 67) ont presque 5 km d'extension. La pente étant assez forte, ils s'étendent jusqu'en bordure de la fosse centrale (— 50 m). Ils

(1) La terminologie est basée sur la classification préconisée par R. FOLK, 1974.

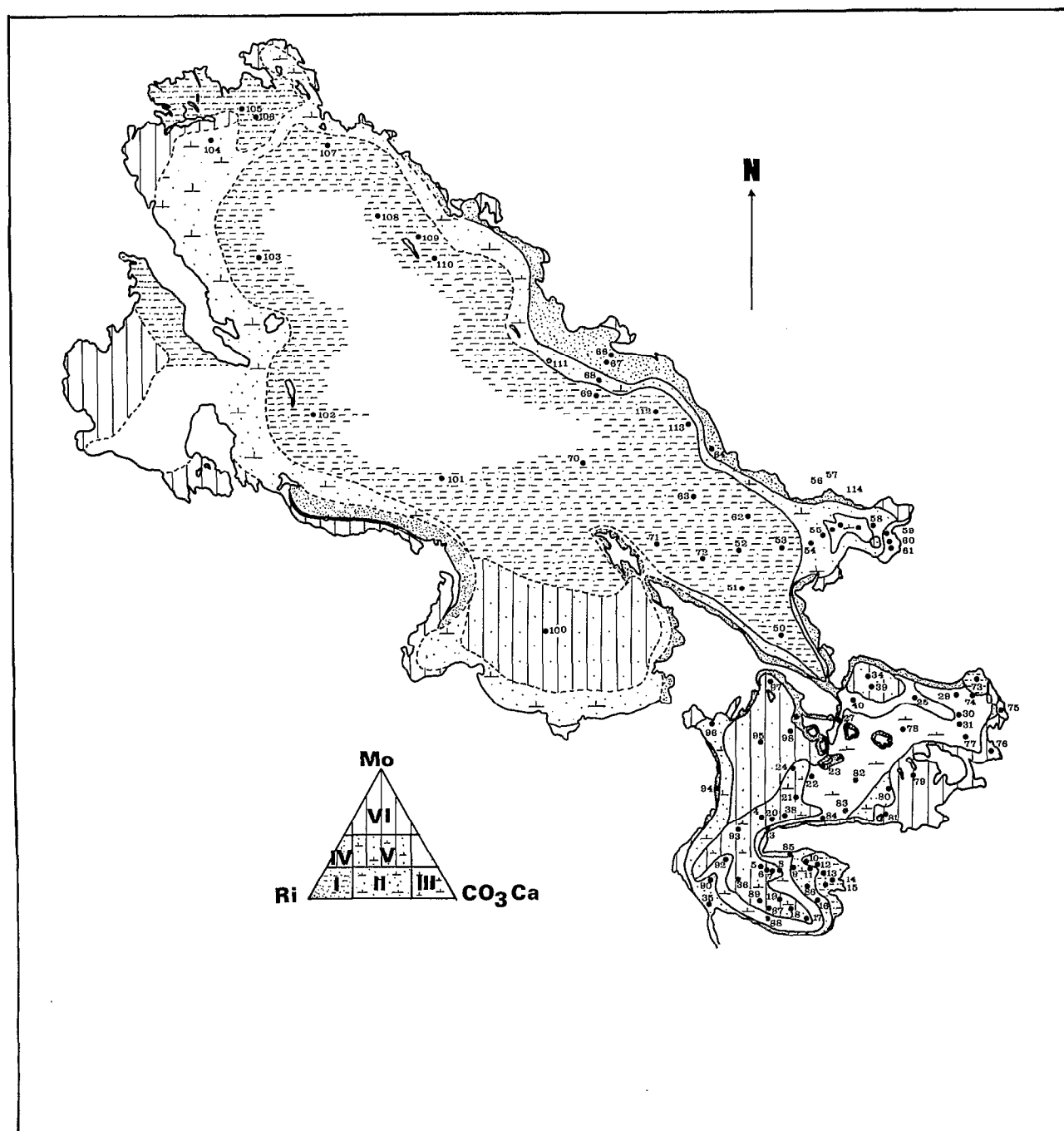


Fig. 3. — Carte de répartition des faciès des sédiments de surface. I : faciès détritique ; II : faciès détritique carbonaté ; III : faciès carbonaté ; IV : faciès organo-détritique ; V : faciès organo-détritique carbonaté ; VI : faciès organique

sont soumis à un classement par gravité : limons et sables très fins en bordure du lac, sables fin et moyen en bordure de la fosse centrale; 4 % de carbonates dans ces échantillons sont liés à la présence de coquilles et de characées fixatrices de calcium.

(c) *Les vases limoneuses*

Elles sont localisées à l'embouchure des rios. On peut relever trois zones d'épandage dans le Petit Lac : au nord (73), à l'embouchure du Rio Batallas (75) et à l'embouchure du Rio Tiwanaku (10, 12, 13, 14, 15). Dans le Grand Lac, on note deux grandes zones d'épandage : la baie du Rio Ramis (105, 106) et l'embouchure du Rio Coata dans la baie de Puno.

Les teneurs en carbonate sont proches de 0, la matière organique est aussi en faible quantité (7 à 10 %) pour 90 % de limons et argiles.

La fraction limoneuse (70 %) est à dominante quartzreuse, la fraction argileuse (20 %) est formée d'illite et de montmorillonite.

Ces boues renferment un peu d'hématite qui leur donne une couleur marron. Elles sont homogènes et compactes.

(d) *Les vases limono-argileuses*

Ces vases forment les sédiments actuels de la fosse centrale du Grand Lac. Ce sont des vases homogènes gris verdâtre sombre (50, 51, 52), marron noir à noir (62, 63, 107), gris sombre à noir (69 à 72, 101 à 103, 108 à 110, 112-113). Elles contiennent 15 à 20 % de matière organique; le carbonate de calcium est en faible proportion (0 à 30 %) et se trouve localisé sur les zones à forte pente en bordure de la fosse.

La fraction résiduelle renferme 30 à 40 % de limons (quartz, un peu de feldspaths) et 60 à 70 % d'argiles (montmorillonite et illite).

2.1.2. FACIÈS DÉTRITIQUE CARBONATÉ (II)

Ces sédiments contiennent moins de 25 % de matière organique et de 20 à 70 % de carbonate de calcium. Ils se localisent dans le Petit Lac comme dans le Grand Lac sur les bords, faisant suite aux faciès détritiques (I) et au faciès organique (VI).

Pour le Petit Lac (9, 11, 16, 35, 80, 86, 90, 96), ce sont des vases (95 % de limons et argiles), gris verdâtre sans stratification apparente et renfermant des débris de plantes et coquilles. La teneur moyenne en carbonate de calcium est relativement élevée (44 %) pour une teneur moyenne en matière organique de 17 %. La fraction résiduelle est formée de limons quartzeux et d'argiles (illite-montmorillonite). Les fractions sables fins et moyens (moins de 5 %) contiennent principalement des débris de coquilles.

Pour le Grand Lac (54, 55, 58, 68, 104), ce sont des vases sableuses (60 à 70 % de limons et argiles)

gris sombre à marron noir homogène avec débris plus ou moins abondants de coquilles fragmentées. Les teneurs moyennes en carbonate et en matière organique sont respectivement de 34 % et 12 %. Les sables et limons (80 %) sont formés de quartz et de débris de coquilles. La fraction argileuse (20 %) renferme de la montmorillonite et de l'illite.

Bien que ces sédiments apparaissent pour le Grand Lac et le Petit Lac sous le même faciès, il convient d'en noter les différences :

— les teneurs en matière organique sont plus élevées dans le Petit Lac, en raison de la profondeur (moins de 5 m) et de l'abondante végétation en résultant;

— les teneurs en carbonate de calcium sont plus élevées dans le Petit Lac avec cependant très peu de coquilles. Il est à noter que dans ces zones où les « totorales » sont moins abondantes, commencent à apparaître les characées fixatrices de calcium.

Dans le Grand Lac au contraire les coquilles plus abondantes sont entraînées, sur les pentes raides de la fosse centrale;

— la fraction résiduelle est plus importante et plus sableuse dans le Grand Lac que dans le Petit Lac en raison de la morphologie du fond à forte pente d'un côté, et très faible pente de l'autre.

2.1.3. FACIÈS CARBONATÉ (III)

Ces sédiments contiennent moins de 25 % de matière organique et plus de 60 % de carbonate de calcium.

Presque totalement absents dans le Grand Lac, à l'exception de deux petites zones dans les baies de Puno et d'Achacachi (56, 57, 114), ils couvrent une bonne partie des fonds du Petit Lac (3, 22, 29 à 31, 33, 74, 77, 78, 82, 83, 85, 88, 92). La présence de ce faciès est directement liée à la profondeur (4 à 10 m) et à une abondante couverture de characées.

Ce sont des boues carbonatées, homogènes, très fluides, gris clair à gris verdâtre, renfermant des débris de coquilles et des restes de plantes calcaires.

La matière organique (moy. 15 %) provient essentiellement de la décomposition du plancton. Elle est moins abondante dans la baie d'Achacachi (8 %).

La fraction sable moyen est formée de coquilles plus nombreuses dans la baie d'Achacachi (10 à 15 %) que dans le Petit Lac (moins de 5 %).

Les fractions sables fins et très fins sont formées d'une poudre de coquilles fragmentées à laquelle se mélangent quelques grains de quartz.

Les fractions limoneuse et argileuse (80 %) sont formées principalement de petits cristaux de calcite,

mélangés à une faible proportion d'argile (illite-montmorillonite).

La zone cerclant la fosse du Petit Lac face à Chua ayant une profondeur de 10 à 20 m ne présente pas un tapis de végétation. Les teneurs en carbonate de calcium y sont cependant élevées. La calcite est mieux cristallisée. On peut y voir une zone plus en pente alimentée par les zones à sédiments carbonatés, située entre 4 et 10 m, ou une ancienne zone peuplée elle aussi de characées durant une période où le lac se serait maintenu à un bas niveau.

2.1.4. FACIÈS ORGANO-DÉTRITIQUE (IV)

Ces sédiments contiennent de 25 à 50 % de matière organique et moins de 15 % de carbonate de calcium.

Dans le Petit Lac, ce sont les sédiments des zones profondes, comprises entre 20 et 40 m (34, 39, 95, 97, 98). Dans le Grand Lac, ce sont les sédiments de la baie de Copacabana (100) sur les fonds de 80 à 100 m.

Ce sont des vases sombres, grises à noires, homogènes, gélatineuses, à forte odeur d'hydrogène sulfuré, renfermant très peu de coquilles.

La matière organique (moy. 36 %) provient essentiellement de la décomposition du plancton.

Le carbonate de calcium (moy. inférieure à 5 %) est lié à la présence de quelques débris de coquilles.

La fraction des sables moyens (moins de 2 %) est uniquement formée de restes de coquilles.

Les fractions des sables fins et limons sont formées de grains de quartz, d'un peu de biotite et d'une très faible proportion de calcite et de débris de coquilles.

La fraction argileuse est composée d'illite et de montmorillonite.

2.1.5. FACIÈS ORGANO-DÉTRITIQUE CARBONATÉ (V)

Ces sédiments contiennent de 25 à 50 % de matière organique et de 15 à 50 % de carbonate de calcium.

C'est un faciès intermédiaire entre le faciès carbonaté (III) et le faciès organo-détritique (IV). Il est présent dans le Petit Lac (4 à 8, 17 à 24, 36, 38, 87, 89, 93) où il forme une bande intermédiaire entre les 2 zones précédentes. Il n'a pas été reconnu dans le Grand Lac. Il se situe sur des fonds plats entre 10 à 20 m là où les characées s'installent provisoirement en plus ou moins grande quantité suivant le niveau de l'eau dans le lac.

Ce sont des vases (95 % de limons et argiles), grises à gris verdâtre, gélatineuses avec quelques coquilles et restes de plantes. Elles sont fréquemment stratifiées, présentant une alternance de lits millimétriques, blancs, carbonatés et gris, organiques à forte odeur d'hydrogène sulfuré.

La fraction des sables moyens (moins de 3 %) est

formée uniquement de coquilles et de graines de characées.

Les fractions de sables fins et très fins (moins de 5 %) sont formées de grains de quartz, angulaires à subarrondis et de débris de coquilles.

Les fractions limoneuse et argileuse sont principalement constituées de petits cristaux de calcite et d'argiles (illite-montmorillonite).

2.1.6. FACIÈS ORGANIQUE (VI)

Ces sédiments contiennent plus de 50 % de matière organique et très peu de carbonate de calcium.

Ils se trouvent dans les fonds de baies (76, 79, 81) où les eaux sont tranquilles, la profondeur inférieure à 2 m et les « totorales » abondantes.

Ce sont des vases gris sombre à noir, relativement compactes, avec de nombreux restes de plantes.

La fraction détritique (25 à 30 %) est formée de sables moyens et fins, de limons, et d'une forte proportion d'argiles (illite et montmorillonite).

2.2. Processus de sédimentation

2.2.1. PETIT LAC

L'étude d'une séquence complète dans la baie de Guaqui montre de la périphérie vers le centre, l'existence de cinq zones :

— en bordure, c'est la zone d'apport du Rio Tiwanaku : faciès détritique (I), on y remarque un développement important des « totorales ». Celles-ci forment un véritable filtre pour les sédiments.

En l'absence d'apports détritiques, la végétation de « totorales » est plus abondante encore. Leur décomposition engendre des sédiments à faciès organique (VI);

— entre 2 et 4 m, les « totorales » diminuent, les characées fixatrices de calcium apparaissent progressivement. Les sédiments sont à faciès détritique carbonaté (II);

— entre 4 et 8 m, c'est la zone de développement maximum des characées. Les sédiments sont à faciès carbonaté (III);

— entre 8 et 10 m, il y a diminution des characées et du taux de fixation du carbonate de calcium; comme les apports détritiques sont faibles, on note une forte augmentation du taux de matière organique provenant de la décomposition du plancton. Les sédiments sont à faciès organo-détritique carbonaté (V);

— au-delà d'une profondeur de 10 m, il y a absence totale de characées. La sédimentation résulte du dépôt de matériaux détritiques limoneux et

argileux transportés en suspension et du dépôt de matière organique provenant de la décomposition du plancton. Les sédiments sont à faciès organo-détritique (IV).

Il est évident que, fonction de la profondeur et de la végétation, cette zonation est susceptible de se déplacer dans un sens ou dans l'autre en suivant les variations de niveau du lac. S'il est peu probable que des changements se produisent à l'échelle de l'année, ceux-ci interviennent certainement avec les grandes variations décennales et centenaires.

Actuellement, malgré la montée régulière du niveau du lac depuis 10 ans, les sédiments détritiques en provenance du Rio Tiwanaku ont toujours tendance à progresser vers le centre du lac. Sous le faciès détritique (13, 10) on trouve le faciès détritique carbonaté puis le faciès carbonaté; sous le faciès détritique carbonaté actuel (9) on trouve un faciès carbonaté.

2.2.2. GRAND LAC

La séquence la plus commune est du rivage vers le centre du lac :

— une zone de sédiments à faciès détritique (I) jusqu'à une profondeur de 50 m. En raison de la

forte pente, les sédiments sont granoclassés : sables fins près de la côte et sables moyens entre 20 et 50 m;

— une zone de sédiments à faciès détritique et carbonaté, située entre 50 et 100 m de fond sur les bords très inclinés de la fosse centrale : la teneur en carbonate est principalement liée à la présence de coquilles de mollusques vivant sur les sédiments détritiques de bordure et tombant une fois l'organisme mort;

— au-delà de 100 m de fond, les sédiments ont un faciès détritique. Ils sont formés principalement d'argiles : montmorillonite provenant en plus grande partie des formations volcaniques de la Cordillère Occidentale, illite provenant en plus grande partie de la Cordillère Orientale.

Les fortes pentes doivent occasionner des courants de turbidité. Ceux-ci n'ont toujours pas été mis en évidence.

2.3. Vitesse de sédimentation

Un échantillonnage sur 70 cm de profondeur a pu être effectué à l'entrée de la baie d'Achacachi (57) dans lequel deux niveaux étaient abondants en coquilles.

TABLEAU III

Datations radiométriques sur une carotte dans l'entrée de la baie d'Achacachi (hauteur d'eau 7 m)

	Profondeur	M.O.	CO ₃ Ca	A _R	Age
57 a....	0-5 cm	8	83		
57 b....	5-15 cm	9	83		
57 c....	15-35 cm	6	76		
57 d....	35-45 cm	7	82		
57 e....	45-50 cm	Coquilles		89.3 ± 1 %	910 ± 80 ans
57 f....	60-70 cm		8	85.5 ± 1,5 %	1240 ± 120 ans
57 g....		9	63		

M.O. : Matière Organique

A_R : Age radiométrique

Ce profil est situé dans une zone à faciès carbonaté. Il ne montre que peu de variations dans sa composition et sa granulométrie (cf. tabl. III).

Les datations radiométriques (1) (¹⁴C) indiquent pour cet endroit une vitesse moyenne de 0,5 mm/an.

Il est à noter la constance de ce profil dans sa composition, montrant pour cette zone peu de changement au cours du dernier millénaire.

2.4. Éléments traces

Quelques analyses par spectroscopie (2) ont été réalisées pour déceler la présence d'éléments traces. Les résultats sont donnés dans le tableau IV. Hors la présence notable de Zn et B il ne semble pas possible pour le moment de tirer une relation entre ces éléments et les faciès.

(1) Laboratoire de Géologie Dynamique, Orsay (J. C. FONTES).

(2) Services Scientifiques Centraux, O.R.S.T.O.M., Bondy.

TABLEAU IV
Éléments traces en ppm. dans des sédiments de surface du Petit Lac

N° Faciès	B	Pb	Mo	Sn	V	Cu	Co	Zn
25 III.....	20	< 3	< 3	< 3	3	3	< 3	100
27 III.....	15	< 3	< 3	< 3	3	3	< 3	300
30 III.....	10	< 3	< 3	< 3	< 3	3	< 3	< 100
34 IV.....	50	5	< 3	3	10	10	< 3	200
35 II.....	10	3	3	< 3	10	5	< 3	300
36 V.....	30	5	< 3	< 3	10	10	< 3	200
38 III.....	20	3	< 3	< 3	10	10	< 3	200
39 IV.....	50	5	< 3	3	8	10	< 3	200
40 V.....	15	< 3	< 3	< 3	3	3	< 3	100

3. CONCLUSION

Cette brève étude permet une détermination qualitative des apports en fonction des unités géologiques du bassin versant. La fraction argileuse est principalement formée de montmorillonite et d'illite et forme l'essentiel des sédiments du Grand Lac.

A l'exception des argiles, les apports détritiques sont retenus aux abords directs des embouchures en raison de l'abondante végétation de bordure et de la faiblesse des courants.

Les processus biochimiques sont importants au moins dans le Petit Lac et dans les grandes baies :

fixation du carbonate de calcium par les algues, destruction du plancton et production de matière organique. Les faciès déterminés en fonction de ces facteurs se répartissent régulièrement de la périphérie vers le centre. Ils sont la marque d'un état du lac et leur alternance est une indication des variations de profondeur et donc de niveau du lac.

Une datation dans un niveau à coquille indique une vitesse de sédimentation de 0,5 mm/an.

Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.,
le 11 septembre 1981

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BOULANGÉ (B.), AGUIZE JAEN (E. L.), 1981. — Morphologie, hydrographie et climatologie du lac Titicaca et de son bassin versant. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14 (4) : 269-287.
- CARMOUZE (J.-P.), AGUIZE JAEN (E. L.), 1981. — La régulation hydrique du lac Titicaca et l'hydrologie de ses tributaires. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14 (4) : 311-328.
- CARMOUZE (J.-P.), ARCE (C.), QUINTANILLA (J.), 1981. — Régulation hydrochimique du lac Titicaca et l'hydrochimie de ses tributaires. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14 (4) : 329-348.
- COLLOT (D.), 1980. — Les macrophytes de quelques lacs andins (Lac Titicaca ; Lac Poopo, Lacs des Vallées d'Hichu Kkota et d'Ovejhujo). O.R.S.T.O.M., *rapp. multigr.*, 115 p.
- FOLK (R. L.), 1974. — *Petrology of sedimentary rocks*. Memphill Publishing Co. Texas.