

## Régulation hydrochimique<sup>(1)</sup> du lac Titicaca et l'hydrochimie de ses tributaires

Jean-Pierre CARMOUZE\*, Carlos ARCE\*\*  
et George QUINTANILLA\*\*

### RÉSUMÉ

L'étude porte sur l'hydrochimie des éléments majeurs des tributaires du Titicaca et sur sa régulation hydrochimique. Le lac est alimenté en grande partie par des rivières issues de formations volcaniques et sédimentaires caractérisées par des eaux à salures élevées (5-20 mM/l) et à faciès bicarbonaté calco-sodique.

En moyenne ces eaux se concentrent dans le lac selon un facteur de 3,4. Entre 1964 et 1978 les pertes moyennes annuelles sont assurées à 40 % par les infiltrations, à 28,5 % par les sédimentations chimiques et à 11,5 % par son effluent le Desaguadero, le restant par augmentation de la réserve saline du lac.

Le renouvellement annuel des sels très faible est compris entre 0,20 et 0,50 % selon les éléments majeurs. Il en résulte une forte stabilité chimique du milieu.

MOTS-CLÉS : Lac Titicaca — Amérique du Sud — Chimie des eaux — Renouvellement des sels minéraux.

### SUMMARY

#### THE HYDROCHEMICAL REGULATION OF LAKE TITICACA AND HYDROCHEMISTRY OF ITS TRIBUTARIES

The hydrochemistry of Lake Titicaca tributaries and the hydrochemical regulation of the lake have been studied.

The main fluvial input is due to rivers coming from volcanic and sedimentary formations with high salinities (5-20 mM/l) and bicarbonate-sulfate-chlorine facies, the rest is due to rivers coming from crystalline formation with low salinities (5 mM/l) and a bicarbonate calco-sodic facies.

The river waters are concentrated in the lake by a factor of 3.4. Between 1964 and 1978, the mean annual salt output proceeds from infiltration (40 %), chemical sedimentation (28.5 %), the effluent Desaguadero (11.5 %) and the rest is stocked in the lake.

The annual salt turn-overs vary from 0.20 to 0.50 % according to the major elements. Consequently, the time fluctuations of the hydrochemistry of the lake are very weak.

KEY WORDS : Lake Titicaca — South America — Water chemistry — Salt turn-overs.

### RESUMEN

#### LA REGULACIÓN HIDROQUÍMICA DEL LAGO TITICACA Y LA HIDROQUÍMICA DE SUS TRIBUTARIOS

El estudio trata de la hidroquímica de los elementos mayores de los afluentes del lago Titicaca y su regulación hidroquímica. La alimentación de éste lago proviene en gran parte de los ríos que desembocan de formaciones volcánicas y sedimentarias, caracterizadas por aguas de salinidad elevada (5-20 mM/l) y con faciès bicarbonatado, sulfatado y

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

\* C.R.O., B.P. V 18, Abidjan (Côte d'Ivoire).

\*\* Instituto de Investigaciones químicas de la Universidad Mayor de San Andrés, La Paz (Bolivia).

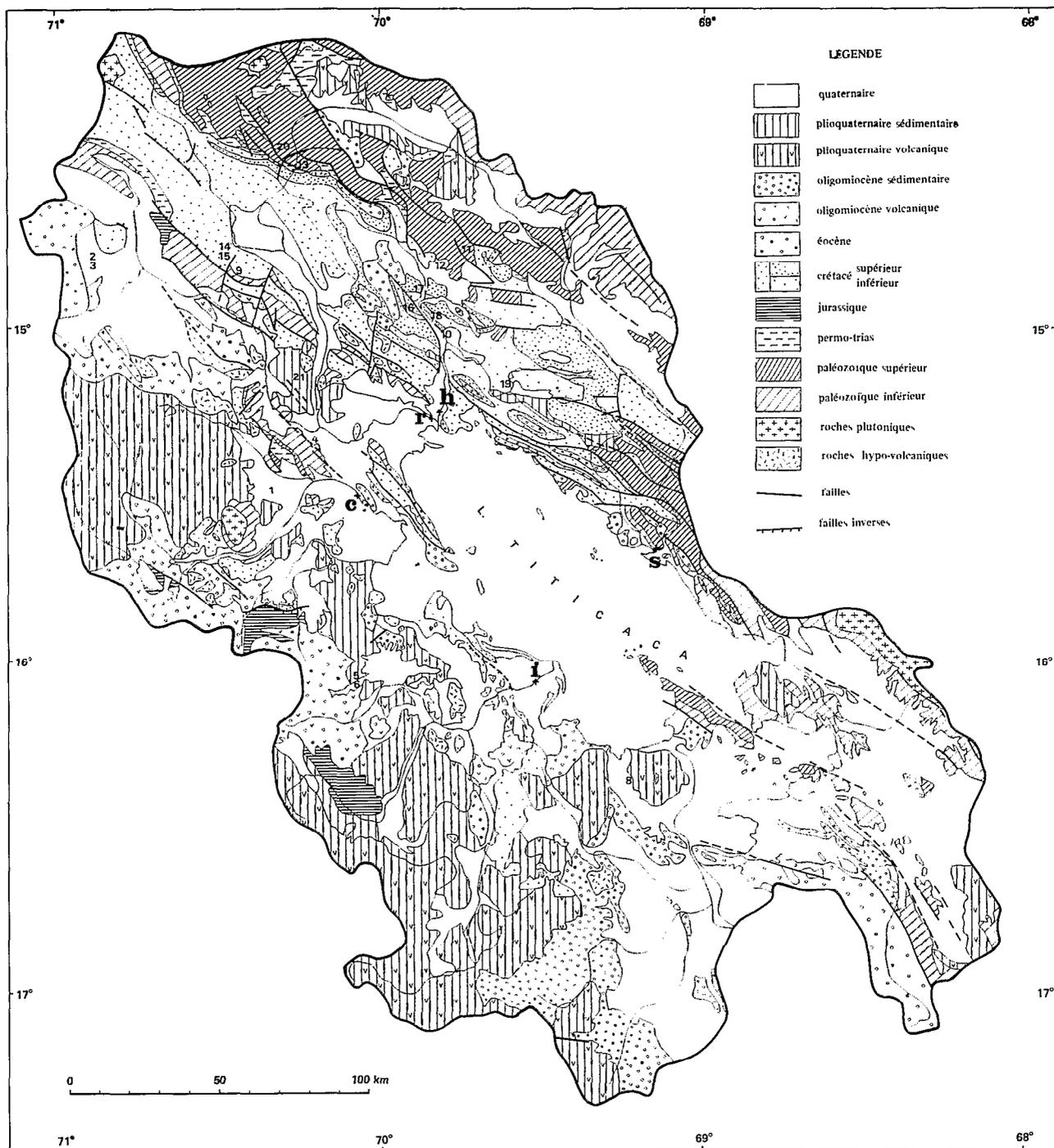


FIG. 1. — Les formations géologiques du Bassin versant du Titicaca localisation des prélèvements d'eau (r = Ramis, h = Huancane, c = Coata, i = Ilave et s = Suchez)

chlorurado, y en menor parte por ríos que desembocan de formaciones cristalinas, caracterizadas por aguas poco saladas (menos de 5 mM/l) y con facies bicarbonatado calco-sódico.

En promedio estas aguas se concentran en el lago según un factor de 3,4. Entre 1964 y 1978, las pérdidas medias anuales de sales proceden en 40 % por infiltraciones, en 28,5 % por sedimentación química y en 11,5 % por su efluente el río Desaguadero, y el resto por almacenamiento en el lago.

Las tasas anuales de renovaciones de las sales son muy bajas, comprendidas entre 0,20 y 0,50 % según los elementos mayores. En consecuencia la hidroquímica del lago Titicaca es muy estable con el tiempo.

PALABRAS CLAVES : Lago Titicaca — América del Sur — Hidroquímica — Renovación de los sales minerales.

Les premières données sur la composition chimique du lac Titicaca en éléments majeurs dissous remontent au début du siècle (NEUVEU LEMAIRE, 1906 ; POSNANSKY, 1911). Elles ont été suivies par celle de l'expédition PERCY SLADEN en 1937 (GILSON 1939-1940, 1964). Récemment des études plus complètes ont été réalisées sur le Grand Lac (1) (RICHERSON *et al.*, 1977) et sur l'ensemble du lac (CARMOUZE *et al.*, 1977).

Nous avons effectué un premier bilan approximatif des principaux éléments dissous pour saisir les grands traits de la régulation de la salure des eaux (CARMOUZE *et al.*, 1977). Un bilan plus précis peut maintenant être établi au niveau du Grand Lac et du Petit Lac (1) grâce à des données nouvelles sur l'hydrologie fluviale et lacustre (CARMOUZE et AQUIZE, 1981) et sur l'hydrochimie fluviale.

Cette dernière, mal connue jusqu'à ce jour (GIBSON, 1964; CARMOUZE *et al.*, 1977) a fait l'objet d'une étude suivie de 1976 à 1979. Nous en présenterons ici les résultats avant d'aborder la régulation hydrochimique du lac dont ils servent de données de base.

## 1. L'HYDROCHIMIE FLUVIALE

Nous allons présenter les caractéristiques chimiques des eaux des cours inférieurs des principales rivières (Ramis, Coata, Ilave, Huanacán et Suchez) ainsi que celles des rivières secondaires (Pallina, Catari, Tiwanaku, Challa Yahaira, Chilla, Batallas Chicas, Keka, Huaycho, Zapatilla) qui ont été prélevées entre 1976 et 1979 (fig. 1) (1).

Une étude sommaire sur la composition chimique des eaux des cours supérieurs de certaines rivières en relation avec la nature géologique des sous-bassins correspondants va nous permettre ensuite de faire quelques remarques générales sur l'acquisition des éléments dissous.

### 1.1. Le Ramis

La salure globale moyenne exprimant les principaux éléments dissous est de 5,52 mM/l. Sa composition est la suivante :

$$\begin{array}{l} \text{HCO}_3 = 28,4 \text{ \%}; \quad \text{SO}_4 = 13,94 \text{ \%}; \quad \text{Cl} = 11,58 \text{ \%}; \quad \text{Na} = 18,46 \text{ \%}; \\ \text{K} = 1,23 \text{ \%}; \quad \text{Ca} = 18,55 \text{ \%}; \quad \text{Mg} = 5,72 \text{ \%}; \quad \text{SiO}_4\text{H}_4 = 2,08 \text{ \%}. \end{array}$$

Le faciès bicarbonaté calcique est légèrement dominant (fig. 2).

La salure globale est marquée par des variations saisonnières (fig. 3). Les eaux de début de crue sont les plus minéralisées (10,43 mM/l.) celles de maximum de crue les moins minéralisées (1,27 mM/l.). Les premières présentent un double faciès bicarbonaté-calcique et chloruré-sodique tandis que les secondes présentent un seul faciès bicarbonaté-calcique (2).

### 1.2. Le Coata

La salure globale moyenne des eaux du Rio Coata est de 6,10 mM/l. Ces eaux ont un faciès chloruré-sodique dominant (fig. 1).

(1) Cf. BOULANGÉ et AQUIZE (1981) pour la présentation géographique du Titicaca et de son réseau hydrographique.

(2) Les données brutes d'hydrochimie fluviale sont fournies en annexe.

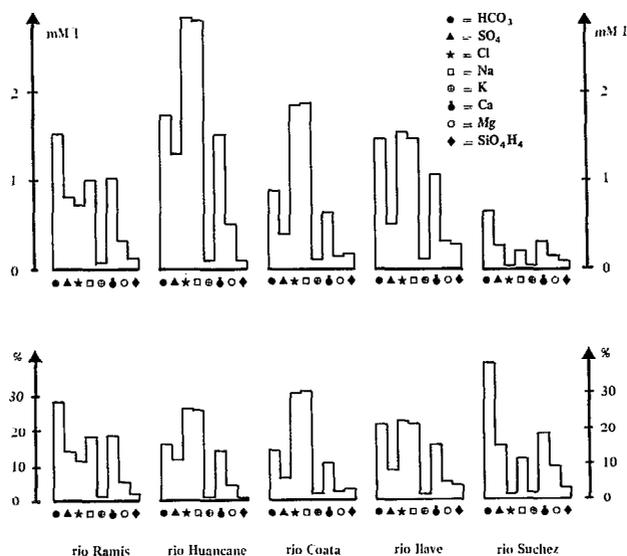


FIG. 2. — Composition chimique moyenne des eaux des cours inférieurs du Ramis, du Huancané, du Coata, d'Ilave et du Suchez

$$\begin{array}{l} \text{HCO}_3 = 14,6 \text{ \%}; \quad \text{SO}_4 = 6,35 \text{ \%}; \quad \text{Cl} = 30,5 \text{ \%}; \quad \text{Na} = 30,7 \text{ \%}; \\ \text{K} = 1,9 \text{ \%}; \quad \text{Ca} = 10,35 \text{ \%}; \quad \text{Mg} = 1,45 \text{ \%}; \quad \text{SiO}_4\text{H}_4 = 3,03 \text{ \%}. \end{array}$$

Les variations de la salure sont à la fois :

— très marquées au cours de l'année (les eaux de début de crue atteignent une salure de 18,4 mM/l, les eaux de maximum de crue 4,55 mM/l.);

— très accentuées d'une année à l'autre pour une même époque (18,4 mM/l. le 15.11.76, 7,55 mM/l. le 26.11.78) (fig. 4).

L'évolution du faciès chimique en fonction de l'époque est importante. Na+Cl représentent 70 % de la salure totale dans les eaux de début de crue, 59 % dans celles de maximum de crue.

### 1.3. L'Ilave

La salure globale moyenne des eaux du Rio Ilave est de 5,50 mM/l. Ces eaux sont à faciès mixte chloruré-sodique et bicarbonaté-calcique (fig. 1).

$$\begin{array}{l} \text{HCO}_3 = 21,2 \text{ \%}; \quad \text{SO}_4 = 8,57 \text{ \%}; \quad \text{Cl} = 22,4 \text{ \%}; \quad \text{Na} = 21,53 \text{ \%}; \\ \text{K} = 1,75 \text{ \%}; \quad \text{Ca} = 15,31 \text{ \%}; \quad \text{Mg} = 4,35 \text{ \%}; \quad \text{SiO}_4\text{H}_4 = 4,22 \text{ \%}. \end{array}$$

Les variations saisonnières de la salure sont relativement atténuées. Les eaux de début de crue ont une salure de 9,5 mM/l., celles de maximum de crue de 4,35 mM/l. Les premières ont un faciès chloruré-sodique légèrement dominant (Na+Cl = 51 % de la salure totale) tandis que les secondes ont un faciès bicarbonaté-calcique plus marqué (HCO<sub>3</sub>+Ca = 41,4 %). Toutefois, quels que soient les débits, les variations qualitatives de la salure sont peu marquées (fig. 5).

### 1.4. Le Huancané

La salure globale moyenne du Rio Huancané est de 10,95 mM/l. Les eaux ont un faciès chloruré-sodique prédominant (fig. 1).

$$\begin{array}{l} \text{HCO}_3 = 15,96 \text{ \%}; \quad \text{SO}_4 = 11,73 \text{ \%}; \quad \text{Cl} = 26,11 \text{ \%}; \quad \text{Na} = 25,75 \text{ \%}; \\ \text{K} = 0,96 \text{ \%}; \quad \text{Ca} = 14,24 \text{ \%}; \quad \text{Mg} = 4,41 \text{ \%}; \quad \text{SiO}_4\text{H}_4 = 0,83 \text{ \%}. \end{array}$$

Les variations saisonnières sont très importantes. Les eaux de début de crue peuvent atteindre une salure

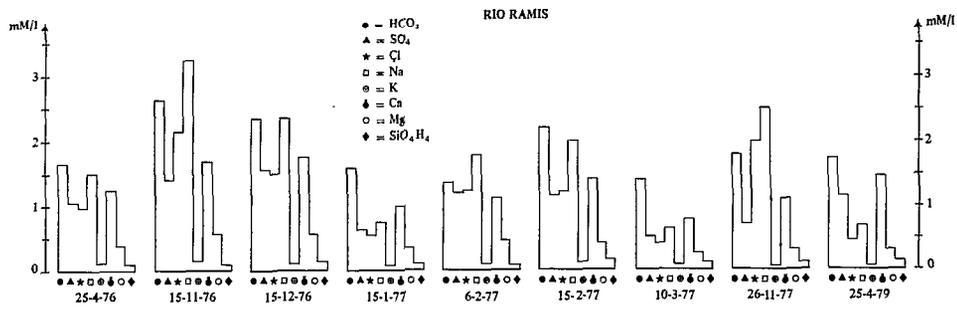


FIG. 3. — Composition chimique des eaux du cours inférieur du Ramis à différentes époques de l'année

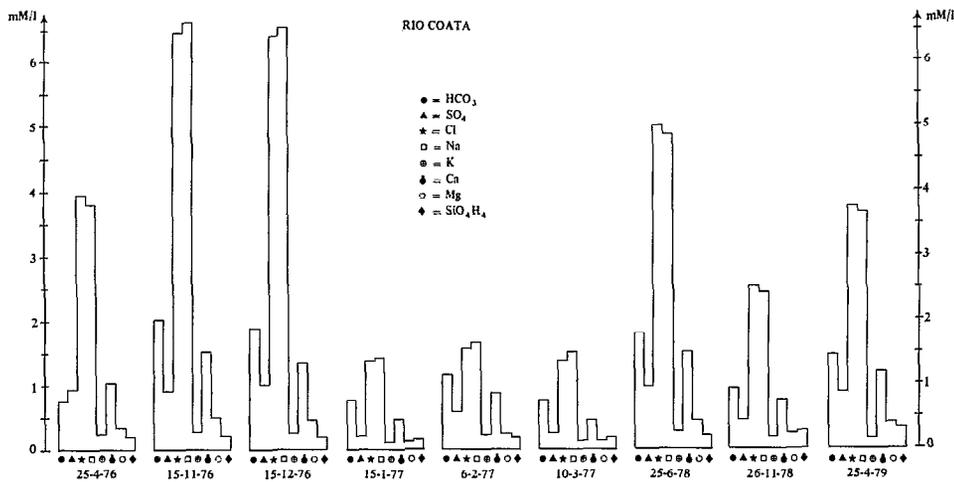


FIG. 4. — Composition chimique des eaux du cours inférieur du Coata à différentes époques de l'année

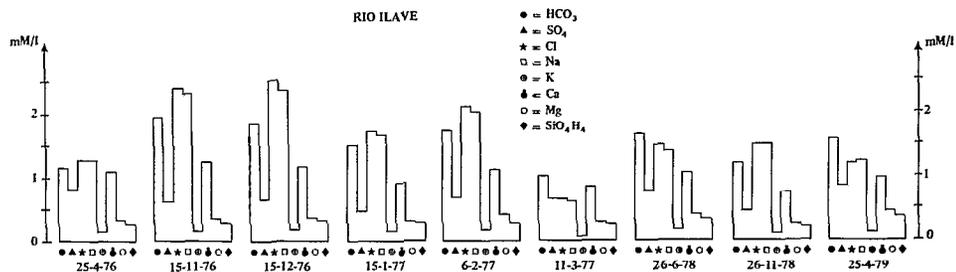


FIG. 5. — Composition chimique des eaux du cours inférieur d'Ilave à différentes époques de l'année

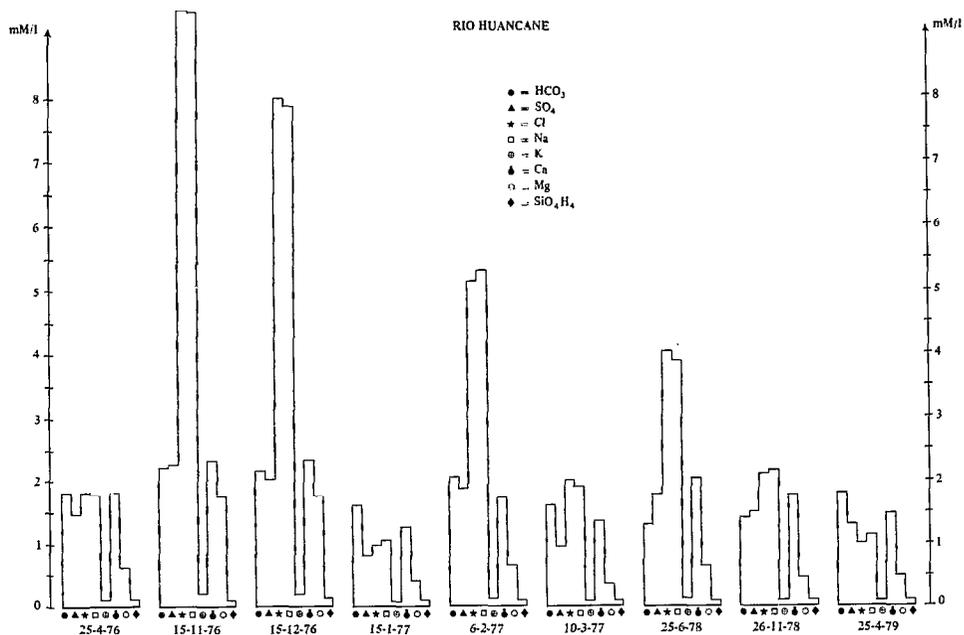


FIG. 6. — Composition chimique des eaux du cours inférieur du Huacane à différentes époques de l'année

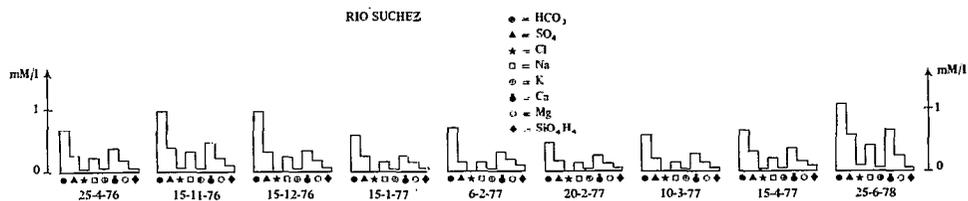


FIG. 7. — Composition chimique des eaux du cours inférieur du Suchez à différentes époques de l'année

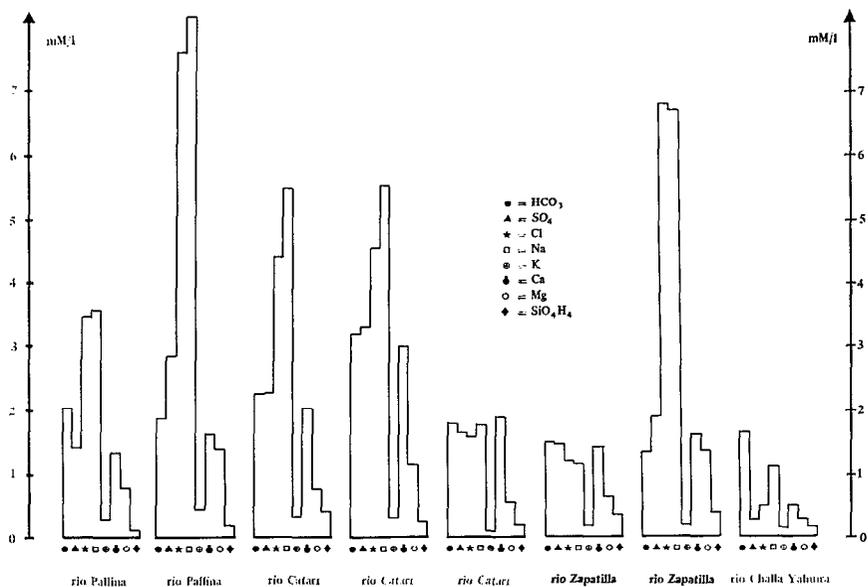


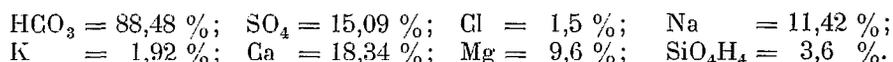
FIG. 8. — Composition chimique des eaux de diverses rivières secondaires s'écoulant directement au lac

de 26,84 mM/l, les eaux de maximum de crue ont une salure trois fois plus faible (8,45 mM/l). De plus, il faut noter que, pour une époque donnée, les variations peuvent être très marquées d'une année à l'autre en raison des irrégularités du régime hydrologique (26,8 mM/l en novembre 1976 contre 10,3 mM/l en novembre 1978). Des variations sont également enregistrées à une échelle beaucoup plus courte associée aux irrégularités hydrologiques intra-mensuelles (23,3 mM/l le 15.12.76; 6,3 mM/l le 15.1.77; 16,9 mM/l le 6.2.77).

Qualitativement, les eaux de début de crue sont nettement chloruré-sodique : Na et Cl représentent 70,5 % de la salure globale; pour les eaux de crue cette proportion n'est plus que de 46 % (fig. 6).

### 1.5. Le Suchez

Les eaux du Rio Suchez sont très faiblement minéralisées. La salure moyenne est de 1,66 mM/l. Sa composition moyenne est la suivante :



Le faciès bicarbonaté-calcique prédomine ( $\text{HCO}_3 + \text{Ca} = 57$  % de la salure globale). Les variations saisonnières de la salure sont peu marquées. Les eaux de début de crue sont moins de deux fois plus salées que celles de maximum de crue (2,5 mM/l contre 1,40 mM/l) (fig. 1 et 7).

Quelle que soit l'époque, le faciès bicarbonaté-calcique reste prédominant.

### 1.6. Les rivières secondaires

Le rio Zapatilla, au vu des deux seuls prélèvements dont nous disposons a une composition chimique fort variable, tant quantitativement que qualitativement au cours de l'année. Fin décembre 1976 la salure est de 7,95 mM/l., début février 1977 de 19,95 mM/l. En époque de forts débits, les faciès chloruré et bicarbonaté sont à peu près également représentés ( $\text{HCO}_3 = 18,6$  %;  $\text{SO}_4 = 18,2$ ;  $\text{Cl} = 15,3$ ). En époque de faibles débits, le faciès chlorurésodique domine largement ( $\text{Na} + \text{Cl} = 67,5$  %) (fig. 8).

Les Rios Challa Jahuirra et Chilla présentent des compositions voisines en époque de crue. La salure du premier est de 4,61 mM/l, celle du second de 5,55 mM/l Tous les deux présentent des faciès bicarbonatés-calciques dominants (fig. 8 et 9).

Le Rio Tiwanaku se caractérise par des eaux qui évoluent peu chimiquement au cours de l'année. La salure des eaux de crue est de 4,75 mM/l, celle des eaux d'étiage est de 9,05 mM/l. Le faciès bicarbonaté-calcique prédomine en toute époque (fig. 9).

Les Rios Palina et Catari ont des eaux relativement minéralisées. En époque d'étiage, la salure du Rio Palina est de 23,9 mM/l, celle du Rio Catari de 9,55 mM/l Ces eaux sont caractérisées par un faciès chloruré-sodique prédominant.

En époque de crue, la salure des eaux du Catari (9,55 mM/l) prend un faciès mixte bicarbonaté calcique et chloruré sodique. Il doit en être de même des eaux de crue du Rio Pallina (fig. 8).

Les Rios Batallas Chicas et Keka sont très peu minéralisés (respectivement 0,925 mM/l et 1,05 mM/l), Les bicarbonates prédominent tandis que les chlorures sont peu ou pas représentés (fig. 9).

Le Rio Huaycho a une salure de 4,7-6,2 mM/l dans laquelle les bicarbonates chlorures et sulfates sont bien représentés (fig. 9).

### 1.7. Considérations générales sur l'acquisition des éléments dissous des eaux des rivières

Le problème de l'origine des éléments dissous des eaux, dans le cas du bassin versant de Titicaca, se pose en termes relativement complexes. En effet la géologie du milieu comprend un nombre relativement élevé de formations géologiques auxquelles sont associés autant de milieux pétrographiques distincts.

Nous avons abordé ce problème de manière fort succincte en prélevant des eaux au pied des principales formations, à savoir le siluro-dévonien, le carbonifère inférieur, le crétacé inférieur moyen et supérieur, le tertiaire inférieur et moyen et enfin le pleistocène. Ces deux dernières formations sont de nature volcanique, tandis que les autres sont de nature sédimentaire (fig. 9).

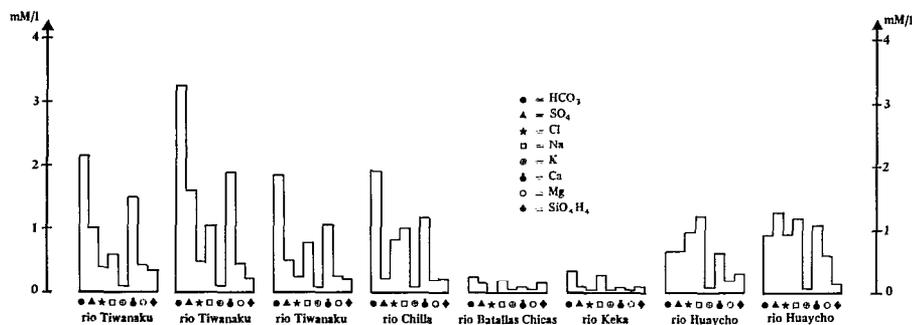


FIG. 9. — Composition chimique des eaux de diverses rivières secondaires s'écoulant directement au lac

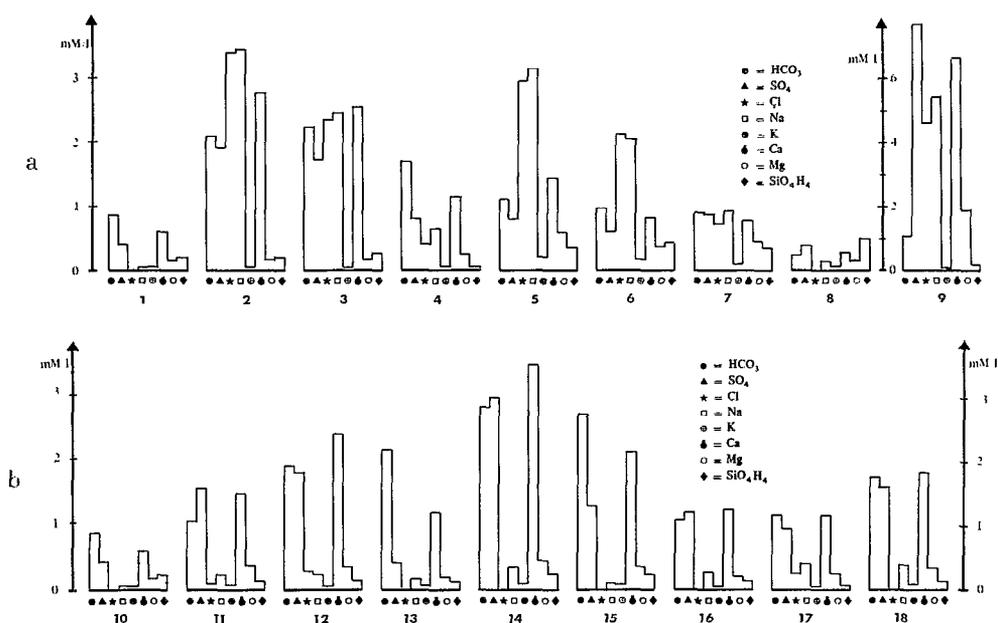


FIG. 10 a et b. — Composition chimique des eaux de rivières situées au pied de différentes formations géologiques

Les résultats sont consignés sur la figure 10 (1).

L'interprétation est délicate pour deux raisons majeures. Nous ne disposons, pour un rio d'une formation donnée, que de un, parfois deux prélèvements d'eau. Or la composition chimique peut évoluer dans de larges proportions d'une époque à l'autre. De plus, les prélèvements ont été souvent effectués à quelques km en aval de la formation, ce qui n'écarte pas une possible évolution des eaux entre le pied de la formation et le lieu du prélèvement.

Toutefois un certain nombre de considérations peuvent être établies (fig. 1 et 10 a et b).

(a) Les rios en provenance de massifs granitiques et traversant des plaines peu développées, tels que le Suhez, le Keka, Batallas Chicas, ont des eaux très faiblement minéralisées (1 à 2 mM/l). Les chlorures sont peu ou pas représentés.

(1) Données brutes en annexe.

(b) *Les rios de la Partie du bassin versant du Ramis* située au-dessus de 4000 m, sont occupés principalement par des formations du paléozoïque siluro-dévonien et carbonifère de nature sédimentaire (schistes et marnes pour les premières, principalement gréseuses pour les secondes), peu ou pas de chlorures (cf. points 11 et 13). Or, les eaux du Rio Ramis qui pénètrent dans le lac contiennent un pourcentage de chlorures sensiblement égal à celui des bicarbonates et sulfates. Il y a donc enrichissement des eaux en chlorure dans le cours inférieur de ce fleuve.

(c) *Les rios qui forment le Huancané* proviennent en grande partie de formations du Crétacé. Leurs salures ne dépassent pas 6,2 mM/l et se caractérisent par un faciès bicarbonaté-calcique (cf. points 10, 16, 17 et 18). Au contraire, la salure des eaux du Huancané est toujours nettement supérieure à cette valeur (entre 8,5 et 27 mM/l) et présente un faciès chloruré sodique très marqué. Il y a un très net enrichissement des eaux en chlorure de sodium dans les régions basses. Il y a en outre dans la partie orientale du bassin une série de petits lacs qui jouent le rôle de bassin de concentration différentielle des sels dissous (enrichissement relatif en NaCl = cf. point 19).

(d) *Les parties amont des Rios Coata et Ilave* sont des formations du tertiaire inférieur sédimentaire, du tertiaire moyen volcanique et du pleistocène volcanique. Les faciès des eaux d'une même formation sont très variables (points 4 et 5 pour le tertiaire volcanique, 7 et 8 pour le pleistocène volcanique). En fait il semble que les eaux sont d'autant plus pauvres en chlorures qu'elles sont prélevées plus près des formations en question; les points 4 et 8 sont au pied respectivement de formations du pleistocène et du tertiaire volcanique; les autres points sont situés plus en aval. On peut penser qu'il y a enrichissement des eaux en chlorure très rapidement dans les zones quaternaires en aval.

## 2. LA RÉGULATION HYDROCHIMIQUE DU LAC

Les eaux d'apport au lac Titicaca ont la composition chimique moyenne suivante, exprimée en mM/l :

$$\begin{array}{llll} [\text{HCO}_3]_{\text{F}} = 1,31 & [\text{SO}_4]_{\text{F}} = 0,76 & [\text{Cl}]_{\text{F}} = 1,51 & [\text{Na}]_{\text{F}} = 1,65; \\ [\text{K}]_{\text{F}} = 0,11 & [\text{Ca}]_{\text{F}} = 0,98 & [\text{Mg}]_{\text{F}} = 0,34 & [\text{SiO}_4\text{H}_4] = 0,16. \end{array}$$

tandis que les eaux du lac ont les caractéristiques suivantes :

$$\begin{array}{llll} [\text{HCO}_3/\text{CO}_3]_{\text{L}} = 2,19 & [\text{SO}_4]_{\text{L}} = 2,64 & [\text{Cl}]_{\text{L}} = 7,11 & [\text{Na}]_{\text{L}} = 7,78; \\ [\text{K}]_{\text{L}} = 0,395 & [\text{Ca}]_{\text{L}} = 1,63 & [\text{Mg}]_{\text{L}} = 1,44 & [\text{SiO}_4\text{H}_4]_{\text{L}} = 0,03 (1). \end{array}$$

Ainsi, on constate, par exemple, que dans le lac la teneur de Na augmente selon un facteur de 4,7, celle de Ca selon un facteur de 1,7, tandis que la teneur en silice dissoute diminue d'un facteur de 5,3.

Pour comprendre l'évolution de la concentration de chacun des éléments dissous dans le lac, il faut pour chacun d'eux préciser la valeur des différents courants établis aux frontières du lac. Il s'agit de courants associés aux courants hydriques (apports et pertes fluviales, infiltrations...) et de courants associés aux réactions bio-géochimiques. Ces courants varient dans l'espace et dans le temps ce qui entraîne des hétérogénéités locales et des fluctuations temporelles.

Pour cette raison, deux approximations vont être introduites :

— pour réduire les modifications spatiales, le lac est divisé en deux milieux de moindre hétérogénéité : le Grand Lac et le Petit Lac qui représentent deux entités bien distinctes (nous les dénommerons GL et PL);

— en considérant une grande période de temps, l'état hydrochimique du lac oscille autour d'un état moyen car les « entrées » et « sorties » de sels dissous s'équilibrent approximativement.

Aussi avons nous retenu la période la plus large possible en fonction des données disponibles, soit 1964-1978 (2), pour établir le bilan moyen annuel de chacun des éléments dissous.

(1) Des données sur la composition chimique des eaux du Titicaca sont fournies en annexe.

(2) 1964-1979 recouvre la période pour laquelle des données hydrologiques sont disponibles. Les données hydrochimiques recueillies entre 1976 et 1979 permettent de définir une composition chimique moyenne annuelle pour chaque rivière, qui est ensuite utilisée pour le calcul des apports moyens annuels en sels. Cette manière de procéder entraîne évidemment une assez lourde incertitude sur ce terme du bilan. Malgré cela en retenant la période 1964-1978, on peut fournir un schéma de régulation saline beaucoup plus satisfaisant que sur la période 1967-1978.

Les termes du bilan annuel sont les suivants :

- pour le lac pris dans son ensemble :  $(i)_F = (i)_I + (i)_S + (i)_D + \Delta(i)^L$ ;
- pour le GL :  $(i)_F^{GL} = (i)_I^{GL} + (i)_S^{GL} + (i)_T + \Delta(i)^{GL}$ ;
- pour le PL :  $(i)_F^{PL} + (i)_T = (i)_I^{PL} + (i)_S^{PL} + (i)_D + \Delta(i)^{PL}$ .

$(i)_F$ ,  $(i)_I^{GL}$  et  $(i)_I^{PL}$  représentent dans l'ordre les apports fluviaux en  $i$  au lac, au GL et au PL;  $(i)_I$ ,  $(i)_I^{GL}$  et  $(i)_I^{PL}$  les pertes en  $i$  par infiltration dans le lac le GL et le PL;  $(i)_S$ ,  $(i)_S^{GL}$  et  $(i)_S^{PL}$  les pertes en  $i$  par sédimentation dans le lac, le GL et le PL;  $(i)_D$  les pertes en  $i$  par le Desaguadero;  $(i)_T$  la quantité de  $i$  qui passe du GL au PL par le détroit de Tiquina (1);  $\Delta(i)^L$ ,  $\Delta(i)^{GL}$  et  $\Delta(i)^{PL}$  les variations de la réserve en  $i$  dans le lac, le GL et le PL.

### 2.1. Apports en sels dissous par les fleuves

Pour le calcul des apports moyens annuels en sels dissous au lac, il a d'abord été établi pour chacune des régions hydrologiques la composition chimique moyenne annuelle des eaux, puis ceux-ci ont été estimés (tabl. I), après pondération faite en fonction des débits moyens d'eau fournis dans CARMOUZE et AQUIZE, 1981.

TABLEAU I

Concentrations moyennes annuelles,  $[i]$  et apports moyens annuels,  $(i)$ , des eaux des tributaires du lac et des eaux de ruissellement des zones littorales (lit.),  $[i]^9$  est exprimé en mM/l et  $(i)$  en  $M \times 10^9$

	HCO <sub>3</sub>	(HCO <sub>3</sub> )	[SO <sub>4</sub> ]	<sup>2</sup> (SO <sub>4</sub> )	[Cl]	(Cl)	Na	(Na)	[K]	(K)	[Ca]	(Ca)	[Mg]	(Mg)	[SiO <sub>4</sub> Hy]	(SiO <sub>4</sub> <sup>2</sup> Hy)
Huancané, lit. Moho.....	1,75	1,266	1,295	0,931	2,85	2,065	2,82	2,045	0,105	0,076	1,56	1,13	0,485	0,35	0,091	0,066
Ramis, lit. Arapa et Capachica.	1,57	4,17	0,77	2,046	0,64	1,70	1,02	2,71	0,068	0,18	1,025	2,725	0,315	0,839	0,115	0,306
Iipa.....	1,78	0,388	1,25	0,272	10,20	2,376	10,75	2,343	0,465	0,101	1,38	0,30	1,15	0,251	0,056	0,125
Coata, lit. Puno et Ilave.....	0,895	1,23	0,39	0,566	1,865	3,568	1,875	2,583	0,118	0,162	0,63	0,871	0,15	0,206	0,185	0,255
Zapatilla et lit. Juli-Tiquina..	0,85	0,488	0,94	0,54	1,18	0,678	1,22	0,70	0,121	0,069	0,865	0,50	0,455	0,262	0,28	0,161
Lit. Tiquina- Desaguadero.	0,29	0,059	0,40	0,103	0,025	0,006	0,12	0,030	0,065	0,008	0,28	0,072	0,15	0,038	0,218	0,058
Ilave.....	1,47	1,565	0,595	0,631	1,55	1,65	1,49	1,586	0,121	0,128	1,06	1,128	0,345	0,366	0,292	0,311
Lit. Desagua- dero-Guaqui..	1,775	0,036	0,245	0,005	0,645	0,013	1,05	0,020	0,107	0,004	0,815	0,016	0,232	0,005	0,246	0,005
Tiwanaku, lit. Taraco.....	1,915	0,354	0,59	0,109	0,276	0,051	0,53	0,095	0,076	0,014	1,155	0,213	0,27	0,05	0,153	0,028
Catariet Pallina.	1,95	1,057	1,89	1,025	2,57	1,39	2,89	1,55	0,16	0,086	1,92	1,04	0,68	0,368	0,131	0,07
Batallas Chicas, lit. Watajata- Tiquina.....	0,25	0,033	0,13	0,017	0,025	0,003	0,20	0,025	0,03	0,04	0,09	0,012	0,06	0,008	0,103	0,013
Keka, lit. Tiqui- na-Achacachi, lit. Achacachi- Escoma.....	0,35	0,128	0,08	0,029	0,03	0,011	0,30	0,11	0,03	0,011	0,100	0,037	0,07	0,025	0,072	0,026
Suchez.....	0,64	0,151	0,251	0,059	0,025	0,006	0,19	0,043	0,032	0,007	0,305	0,071	0,16	0,038	0,06	0,014
Huaycho.....	0,67	0,116	0,71	0,123	0,955	0,165	1,22	0,103	0,085	0,013	0,67	0,116	0,217	0,038	0,19	0,033

Pour certains rios, faute de données, nous avons été conduits à faire des approximations :

-- pour les eaux du littoral Huancané la même composition chimique que celles des eaux du Rio Huancané;

(1) Cf. La présentation géographique du milieu dans BOULANGÉ et AQUIZE, (1981).

- pour les eaux du littoral Arapa-Capachica la même composition chimique que celle des eaux du Rio Ramis;
- pour les eaux du littoral de Puno à Tiquina une composition chimique intermédiaire entre celle des eaux du Rio Zapatilla et du Rio caractérisé par le point 8 (fig. 1);
- pour les eaux du littoral Desaguadero-Guaqui, une composition chimique intermédiaire entre celle des eaux des Rios Challa Jahuira et Chilla;
- pour les eaux du littoral Taraco, la même composition chimique que celle des eaux du Rio Tiwanaku;
- pour les eaux du littoral Wuatajata Tiquina, la même composition chimique que celles des eaux du Rio Batallas Chicas;
- pour les eaux du littoral Tiquina-Achacachi-Escoma, la même composition chimique que celle des eaux du Rio Keka.

Les apports au lac pris dans son ensemble, au Grand Lac GL, et au Petit Lac PL, sont ensuite calculés en moyenne annuelle sur la période 1964-1978 en utilisant les volumes d'eau moyens annuels des différentes rivières écoulés en 1964 et 1978 :

$(\text{HCO}_3)_F^L = 11,04;$	$(\text{SO}_4)_F^L = 6,43;$	$(\text{Cl})_F^L = 12,69;$	$(\text{Na})_F^L = 3,93;$
$(\text{K})_F^L = 0,90;$	$(\text{Ca})_F^L = 8,23;$	$(\text{Mg})_F^L = 2,84;$	$(\text{SiO}_4\text{H}_4)_F^L = 1,37.$
$(\text{HCO}_3)_F^{GL} = 9,50;$	$(\text{SO}_4)_F^{GL} = 5,167;$	$(\text{Cl})_F^{GL} = 11,20;$	$(\text{Na})_F^{GL} = 12,20;$
$(\text{K})_F^{GL} = 0,74;$	$(\text{Ca})_F^{GL} = 6,88;$	$(\text{Mg})_F^{GL} = 2,38;$	$(\text{SiO}_4\text{H}_4)_F^{GL} = 1,20.$
$(\text{HCO}_3)_F^{PL} = 1,54;$	$(\text{SO}_4)_F^{PL} = 1,26;$	$(\text{Cl})_F^{PL} = 1,46,$	$(\text{Na})_F^{PL} = 1,72;$
$(\text{K})_F^{PL} = 0,15;$	$(\text{Ca})_F^{PL} = 1,35;$	$(\text{Mg})_F^{PL} = 0,47;$	$(\text{SiO}_4\text{H}_4)_F^{PL} = 0,17.$

Ainsi, le Grand Lac reçoit en moyenne près de 85 % des apports totaux en sels dissous contre 15 % pour le Petit Lac.

## 2.2. Les pertes en sels dissous par le Desaguadero

L'étude hydrologique du lac (CARMOUZE et AQUIZE, 1981) a montré qu'au cours de certaines années en janvier-février, le Desaguadero joue le rôle d'affluent. Les eaux qui entrent dans le lac sont de composition chimique sensiblement voisines de celles des eaux du lac lui-même dans la région du Desaguadero car ce sont des eaux d'origine lacustre qui sont refoulées de la plaine d'inondation adjacente au lac.

On peut donc évaluer avec une précision satisfaisante les pertes « nettes » en sels dissous par le Desaguadero en tenant compte de la composition chimique moyenne des eaux lacustres à proximité du Desaguadero (cf. tabl. II) et du volume « net » écoulé en moyenne annuelle sur la période retenue 1964-1978, soit  $0,217 \times 10^9 \text{ m}^3$ .

TABLEAU II

Composition chimique des eaux du Lac [i]<sup>L</sup>, du GL [i]<sup>GL</sup>, du PL [i]<sup>PL</sup> et du Desaguadero [i]<sup>D</sup> en mM/l. Variation des réserves salines moyennes annuelles de 1964 à 1978 dans le Lac Δ(i)<sup>L</sup>, le GL Δ(i)<sup>GL</sup> et le PL Δ(i)<sup>PL</sup> en M × 10<sup>6</sup>. Transit de sels dissous à Tiquina, (i)<sup>T</sup>, en M/10<sup>9</sup>/an

	[i] <sup>L</sup>	[i] <sup>GL</sup>	[i] <sup>PL</sup>	[i] <sup>D</sup>	(i) <sup>T</sup>	Δ(i) <sup>L</sup>	Δ(i) <sup>GL</sup>	Δ(i) <sup>PL</sup>
HCO <sub>3</sub> /CO <sub>3</sub> .....	2,19	2,21	1,97	1,90	0,412	0,394	0,33	0,06
So <sub>4</sub> .....	2,64	2,64	2,80	2,65	0,575	0,468	0,40	0,084
Cl.....	7,11	7,10	7,60	7,95	1,725	1,28	1,06	0,22
Na.....	7,78	7,76	8,40	8,55	1,855	1,40	1,16	0,25
K.....	0,395	0,39	0,43	0,445	0,096	0,07	0,06	0,013
Ca.....	1,63	1,64	1,54	1,53	0,332	0,29	0,25	0,046
Mg.....	1,44	1,44	1,53	1,50	0,325	0,26	0,22	0,046
SiO <sub>4</sub> H <sub>4</sub> .....	0,03	0,03	0,03	0,0125	0,003	0,005	0,004	0,009

Celles-ci, exprimées en moles  $\times 10^9$  sont les suivantes :

$$\begin{aligned} (\text{HCO}_3/\text{CO}_3)_D &= 0,41; & (\text{SO}_4)_D &= 0,57; & (\text{Cl})_D &= 1,72; & (\text{Na})_D &= 1,86; \\ (\text{K})_D &= 0,095; & (\text{Ca})_D &= 0,33; & (\text{Mg})_D &= 0,32; & (\text{SiO}_4\text{H}_4)_D &= 0,003. \end{aligned}$$

Remarquons que les apports fluviaux en moyenne annuelle entre 1964 et 1978 représentent  $46,5 \times 10^9$  moles tandis que les pertes fluviales représentent  $5,3 \times 10^9$  moles. Le Desaguadero n'évacue donc que 11,4 % des apports fluviaux. Le restant est éliminé par les infiltrations et des sédimentations biogéochimiques ou stocké dans le milieu.

### 2.3. Les pertes par infiltration

Nous supposons que les eaux qui s'infiltrent ont une composition chimique moyenne voisine de celles des eaux lacustres elles-mêmes (tabl. II).

Le volume moyen des eaux qui s'infiltrent a été estimé à partir du bilan de Cl (CARMOUZE et AQUIZE, 1981). Ce volume est égal à  $1,36 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/an pour le lac pris dans son ensemble,  $0,93 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/an pour le GL et  $0,44 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/an pour le PL; d'où les pertes en M  $\times 10^9$  dans le lac (i)<sup>L</sup>, le GL (i)<sup>GL</sup> et le PL (i)<sup>PL</sup>.

$$\begin{aligned} (\text{HCO}_3/\text{CO}_3)_I^L &= 2,19; & (\text{SO}_4)_I^L &= 2,60; & (\text{Cl})_I^L &= 7,11; & (\text{Na})_I^L &= 7,78; \\ (\text{K})_I^L &= 0,39; & (\text{Ca})_I^L &= 1,63; & (\text{Mg})_I^L &= 1,44; & (\text{SiO}_4\text{H}_4)_I^L &= 0,03. \\ (\text{HCO}_3/\text{CO}_3)_I^{\text{GL}} &= 2,01; & (\text{SO}_4)_I^{\text{GL}} &= 2,40; & (\text{Cl})_I^{\text{GL}} &= 6,48; & (\text{Na})_I^{\text{GL}} &= 7,08; \\ (\text{K})_I^{\text{GL}} &= 0,355; & (\text{Ca})_I^{\text{GL}} &= 1,50; & (\text{Mg})_I^{\text{GL}} &= 1,31; & (\text{SiO}_4\text{H}_4)_I^{\text{GL}} &= 0,027. \\ (\text{HCO}_3/\text{CO}_3)_I^{\text{PL}} &= 1,083; & (\text{SO}_4)_I^{\text{PL}} &= 1,18; & (\text{Cl})_I^{\text{PL}} &= 3,19; & (\text{Na})_I^{\text{PL}} &= 3,53; \\ (\text{K})_I^{\text{PL}} &= 0,18; & (\text{Ca})_I^{\text{PL}} &= 0,65; & (\text{Mg})_I^{\text{PL}} &= 0,64; & (\text{SiO}_4\text{H}_4)_I^{\text{PL}} &= 0,0013. \end{aligned}$$

Globalement, les infiltrations éliminent 40 % des apports en sels dissous par les fleuves. Elles assurent 56 % des pertes en Na et Cl, 43 % des pertes en K, 40 % des pertes en SO<sub>4</sub>, 34 % des pertes en Mg, 20 % des pertes en HCO<sub>3</sub>/CO<sub>3</sub> et Ca, et à peine 2 % des pertes en SiO<sub>4</sub>H<sub>4</sub>.

### 2.4. Les pertes par sédimentation biogéochimiques

Elles sont obtenues par différence à partir des équations des bilans :

$$\begin{aligned} \text{— pour le lac : } (i)_S^L &= (i)_F^L - (i)_D^L - (i)^L; \\ \text{— pour le GL : } (i)_{SA}^{\text{GL}} &= (i)_{FN}^{\text{GL}} - (i)_{IW}^{\text{GL}} - (i)_T^L - (i)^{\text{PL}}; \\ \text{— pour le PL : } (i)_{SG}^{\text{PL}} &= (i)_{FA}^{\text{PL}} - (i)_T^L - (i)_{IW}^{\text{PL}} - (i)_D^L - (i)^{\text{PL}}. \end{aligned}$$

Il faut auparavant calculer (i)<sub>T</sub>, (i)<sup>L</sup>, (i)<sup>GL</sup> et (i)<sup>PL</sup>. Les quantités de sels dissous qui transitent à Tiquina sont égales à (i)<sub>T</sub> = (v)<sub>T</sub>  $\times$  [i]<sup>GL</sup>; (v)<sub>T</sub> = volume d'eau écoulé à Tiquina =  $0,515 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/an (CARMOUZE et AQUIZE, 1981). Les résultats sont consignés dans le tableau II.

Les variations des réserves en i dans le lac, le GL et le PL sont dans l'ordre :  $\Delta(i)^L = \Delta(v)^L \times [i]^L$ ,  $\Delta(i)^{\text{GL}} = \Delta(v)^{\text{GL}} \times [i]^{\text{GL}}$  et  $\Delta(i)^{\text{PL}} = \Delta(v)^{\text{PL}} \times [i]^{\text{PL}}$ ;  $\Delta(v)_L$ ,  $\Delta(v)^{\text{GL}}$  et  $\Delta(v)^{\text{PL}}$  qui représentent dans l'ordre les variations de volume du lac, du GL et du PL sont égales à  $0,18 \times 10^9$ ,  $0,15 \times 10^9$  et  $0,03 \times 10^9$  m<sup>3</sup> (résultats dans le tableau II).

On peut alors calculer (i)<sup>L</sup>, (i)<sup>GL</sup> et (i)<sup>PL</sup>; les résultats sont les suivants, exprimés en M  $\times 10^9$ .

$$\begin{aligned} (\text{HCO}_3/\text{CO}_3)_S^L &= 7,22; & (\text{SO}_4)_S^L &= 1,78; & (\text{Cl})_S^L &= 0,0; & (\text{Na})_S^L &= 0,07; \\ (\text{K})_S^L &= 0,19; & (\text{Ca})_S^L &= 5,38; & (\text{Mg})_S^L &= 0,29; & (\text{SiO}_4\text{H}_4)_S^L &= 1,32. \\ (\text{HCO}_3/\text{CO}_3)_S^{\text{GL}} &= 6,02; & (\text{SO}_4)_S^{\text{GL}} &= 1,01; & (\text{Cl})_S^{\text{GL}} &= 0,0; & (\text{Na})_S^{\text{GL}} &= 0,03; \\ (\text{K})_S^{\text{GL}} &= 0,13; & (\text{Ca})_S^{\text{GL}} &= 4,29; & (\text{Mg})_S^{\text{GL}} &= 0,11; & (\text{SiO}_4\text{H}_4)_S^{\text{GL}} &= 1,15. \\ (\text{HCO}_3/\text{CO}_3)_S^{\text{PL}} &= 1,38; & (\text{SO}_4)_S^{\text{PL}} &= 0,785; & (\text{Cl})_S^{\text{PL}} &= 0,0; & (\text{Na})_S^{\text{PL}} &= 0,07; \\ (\text{K})_S^{\text{PL}} &= 0,06; & (\text{Ca})_S^{\text{PL}} &= 1,16; & (\text{Mg})_S^{\text{PL}} &= 0,20; & (\text{SiO}_4\text{H}_4)_S^{\text{PL}} &= 0,17. \end{aligned}$$

Par hypothèse on a admis que Cl ne sédimente pas. Les sédimentations enregistrées pour Na ne sont pas

significatives au regard des incertitudes qui sont introduites dans les termes du bilan. Les pertes par sédimentation en  $\text{HCO}_3/\text{CO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , K, Ca, Mg et  $\text{SiO}_4\text{H}_4$  représentent dans l'ordre 65,6 % 27,7 % 21,6 % 67,8 % 10,2 % et 96,3 % des apports fluviaux. Les sédimentations de  $\text{SiO}_4\text{H}_4$ ,  $\text{HCO}_3/\text{CO}_3$ , Ca, K et  $\text{SO}_4$  sont respectivement 7,7 5,3 4,6 2,9 et 2,25 fois plus importantes dans le GL que le PL, tandis que celle de Mg sont deux fois plus fortes dans le PL que le GL.

Globalement, les pertes par sédimentation représentent 28,5 % des apports fluviaux, entre 1964 et 1978 77,5 % se déroulent dans le GL, 22,5 % dans le PL.

L'alimentation partielle dans le lac de  $\text{SiO}_4\text{H}_4$  provient en grande partie de l'utilisation de cet élément par les diatomées, celles de  $\text{HCO}_3$  et Ca sont dues essentiellement à la précipitation de carbonate de Calcium (CARMOUZE et MIRANDA 1978; BOULANGÉ et VARGAS, 1981).  $\text{SO}_4$  est partiellement réduit dans les milieux réducteurs. K et Mg sont en partie fixés par les macrophytes. Notons à cet égard que la sédimentation de Mg est plus importante dans le PL que dans le GL où le développement des macrophytes est moindre.

2.5. Les stocks en sels dissous dans le lac. Leur taux de renouvellement et leur temps de résidence

Les stocks en sels dissous dans le lac sont continuellement renouvelés, leurs taux de renouvellement annuel sont égaux au quotient entre les quantités de sels dissous annuellement apportés,  $(i)_A$ , ou éliminés  $(i)_P$  (1) et les stocks correspondants,  $(i)$ . L'inverse de ce paramètre, T; indique le temps de séjour moyen des éléments dissous dans le milieu; c'est une autre manière de donner une idée de la circulation de la matière à travers le milieu.

Le calcul est simple

Pour le lac  $(i)^L = (v)^L \times [i]^L$ ;  $R_I^L = (i)_A^L / (i)^L = (i)_P^L / (i)^L$ ;  $T_I^L = 1 / R_I^L$   
 Pour le GL  $(i)^{GL} = (v)^{GL} \times [i]^{GL}$ ;  $R_I^{GL} = (i)_A^{GL} / (i)^{GL} = (i)_P^{GL} / (i)^{GL}$ ;  $T_I^{GL} = 1 / R_I^{GL}$   
 Pour le PL  $(i)^{PL} = (v)^{PL} \times [i]^{PL}$ ;  $R_I^{PL} = (i)_A^{PL} / (i)^{PL} = (i)_P^{PL} / (i)^{PL}$ ;  $T_I^{PL} = 1 / R_I^{PL}$

Les résultats sont regroupés dans le tableau III.

TABLEAU III

Stocks en éléments dissous (i), apports (ou pertes) moyens annuels  $(i)^A$ . Taux de renouvellement annuel des stocks  $R^i$  et temps de résidence des éléments  $T^i$  dans le lac pris dans son ensemble, le GM et le PL

	$(i)^L$ M × 10 <sup>9</sup>	$(i)_A^L$ M × 10 <sup>9</sup>	$R^L$ %	$T^L$ années	$(i)_A^{GL}$ M × 10 <sup>9</sup>	$(i)^{GL}$ M × 10 <sup>9</sup>	$R^{GL}$ %	$T^{GL}$ années	$(i)^{PL}$ M × 10 <sup>9</sup>	$(i)_A^{PL}$ M × 10 <sup>9</sup>	$R^{PL}$ %	$T^{PL}$ années
HCO <sub>3</sub> /CO <sub>3</sub> .....	1964	11,60	0,59	169	1940	9,66	0,49	200	24	1,57	6,5	19
So <sup>4</sup> .....	2365	6,65	0,28	355	2330	5,36	0,23	435	35	1,30	3,7	27
Cl.....	6370	13,30	0,21	479	6275	11,73	0,19	537	95	1,57	1,6	60
Na.....	6970	14,60	0,21	479	6865	12,78	0,19	537	105	1,84	1,7	57
K.....	355	0,93	0,26	382	348	0,77	0,22	452	5,5	0,15	2,7	37
Ca.....	1460	8,37	0,57	174	1441	7,00	0,48	206	19	1,37	7,2	14
Mg.....	1290	2,97	0,23	435	1271	2,49	0,20	510	19	0,49	2,6	39
SiO <sub>4</sub> H <sub>4</sub> .....	27	1,37	5,1	20	7,35	1,20	0,16	6	0,10	0,17	170	0,6

Les taux de renouvellement moyens annuels des sels dissous sont faibles dans le GL à l'exception de  $\text{SiO}_4\text{H}_4$ . Ils sont compris entre 0,5 et 0,2 % pour tous les éléments dissous, sauf pour  $\text{SiO}_4\text{H}_4$  pour lequel il est de 16 %. Ces taux sont environ 10-12 fois plus importants dans le PL. En d'autres termes le temps de résidence de la matière est 10-12 fois plus court dans le PL que dans le GL. Il est de 30 ans en moyenne dans le PL et de 350 ans dans le GL.

(1) Pour la période considérée  $(i)^A$  est légèrement supérieur à  $(i)^P$ . On prend pour le calcul une valeur intermédiaire.

## 2.6. Les fluctuations interannuelles de la composition chimique des eaux

Lorsque l'on compare les données de composition chimique des eaux du Titicaca recueillies depuis le début du siècle par les auteurs cités en introduction, on constate qu'elles ne sont pas significativement différentes, si l'on tient compte du fait que les méthodes de dosage employées diffèrent d'un auteur à l'autre. En d'autres termes, les crues et décrues du lac n'affecteraient guère la composition chimique des eaux. Cela peut être vérifié par un calcul approché.

Comparons successivement le lac en situation de décrue (1971) et en situation de crue (1978) par rapport à la situation moyenne (1967).

### (a) Phase de décrue

De 1967 à 1971, le lac est passé d'une situation moyenne à une situation de décrue, son volume est passé de  $896 \times 10^9 \text{ m}^3$  à  $887 \times 10^9 \text{ m}^3$ . Les stocks en sels dissous ont diminué approximativement d'une quantité égale au produit du déficit des apports fluviaux pour cette période, soit  $4,5 \times 10^9 \text{ m}^3$  par la composition chimique moyenne des eaux fluviales (1) d'où les stocks de sels dissous lors de la décrue,  $(i)_d$  en  $\text{M} \times 10^9$  :

$$\begin{array}{llll} (\text{HCO}_3/\text{CO}_3)_d = 1958; & (\text{SO}_4)_d = 2360; & (\text{Cl})_d = 6359; & (\text{Na})_d = 6958; \\ (\text{K})_d = 354; & (\text{Ca})_d = 1455; & (\text{Mg})_d = 1288; & (\text{SiO}_4\text{H}_4)_d = 26,27. \end{array}$$

et les concentrations correspondantes en mM/l :

$$\begin{array}{llll} [\text{HCO}_3/\text{CO}_3]_d = 2,21; & [\text{SO}_4]_d = 2,66; & [\text{Cl}]_d = 7,17; & [\text{Na}]_d = 7,84; \\ [\text{K}]_d = 0,40; & [\text{Ca}]_d = 1,64; & [\text{Mg}]_d = 1,45; & [\text{SiO}_4\text{H}_4]_d = 0,029. \end{array}$$

### (b) Phase de crue

De 1967 à 1978 le lac est passé de  $896 \times 10^9 \text{ m}^3$  à  $904 \times 10^9 \text{ m}^3$ . Les apports fluviaux ont présenté un excédent de  $4,0 \times 10^9 \text{ m}^3$ .

D'où les stocks de sels dissous du lac en crue,  $(i)_c$  :

$$\begin{array}{llll} (\text{HCO}_3/\text{CO}_3)_c = 1970; & (\text{SO}_4)_c = 2369; & (\text{Cl})_c = 6380; & (\text{Na})_c = 6980; \\ (\text{K})_c = 356; & (\text{Ca})_c = 1464; & (\text{Mg})_c = 1292; & (\text{SiO}_4\text{H}_4)_c = 27,65. \end{array}$$

et les concentrations correspondantes  $(i)_c$  :

$$\begin{array}{llll} [\text{HCO}_3/\text{CO}_3]_c = 2,18; & [\text{SO}_4]_c = 2,62; & [\text{Cl}]_c = 7,06; & [\text{Na}]_c = 7,72; \\ [\text{K}]_c = 0,393; & [\text{Ca}]_c = 1,62; & [\text{Mg}]_c = 1,43; & [\text{SiO}_4\text{H}_4]_c = 0,035. \end{array}$$

D'après ces résultats on constate que la composition chimique des eaux du moins dans le GL, varie très peu lors des crues et décrues du lac. Ces variations des concentrations ne dépassent pas 2 %. Toutefois dans le PL, si l'on en juge uniquement par les fluctuations du volume d'eau celles-ci doivent atteindre 10-15 %.

## 3. CONCLUSION

Les salures des eaux des tributaires du Titicaca sont généralement comprises entre 5 et 10 mM/l. Ce sont des valeurs relativement élevées si on les compare à la valeur moyenne attribuée à l'ensemble des eaux continentales qui est de 2 mM/l (МЕУВЕЕВ, 1979). Elles traduisent une forte érosion chimique.

La majorité des eaux proviennent de formations volcaniques et sédimentaires; leurs salures varient entre 5 et 20 mM/l présentant de fortes variations saisonnières : elles peuvent varier du simple au triple en passant des eaux de crues aux eaux d'étiage. Elles ne présentent généralement pas de faciès chimique dominant.  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  et  $\text{Cl}$  sont représentés en proportions sensiblement égales. Toutefois en époque d'étiage ou de début de crue les eaux peuvent prendre un faciès chloruro-sodique à la suite d'un net enrichissement des eaux de Na et Cl dans le cours inférieur des rivières.

(1) Les variations des pertes par le Desaguadero par rapport aux pertes moyennes peuvent être négligées en première approximation.

Les eaux qui proviennent directement de la Cordillère Orientale sont plus faiblement minéralisées (moins de 5 mM/l). Leur faciès bicarbonato-calco-sodique est caractéristique d'une érosion chimique de roches cristallines.

Le régime hydrologique du lac est tel que les eaux fluviales devraient en moyenne s'y concentrer selon un facteur 4,7. Cela est vrai pour Na et Cl, mais pour les autres éléments dissous ce facteur est plus faible en raison des sédimentations chimiques. Celles-ci touchent principalement la silice dissoute (utilisation par les diatomées), les bicarbonate et carbonate, le calcium (précipitation de  $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) et à un degré moindre, les sulfates (réduction en zones profondes et fermées), le potassium et le magnésium (utilisation par les macrophytes).

Globalement les pertes par sédimentation représentent 28,5 % des apports fluviaux, entre 1964 et 1978. 77,5 % se déroulent dans le GL, 22,5 % dans le PL. Les pertes par infiltration représentent 40 % des apports fluviaux : 68 % dans le GL, 32 % dans le PL. Le Desaguadero n'évacue que 11,4 % des apports fluviaux.

Le renouvellement annuel des réserves en sels dissous est très faible dans le GL : pour les éléments majeurs il varie entre 0,20 (Na et Cl) et 0,50 % (Ca et  $\text{HCO}_3/\text{CO}_3$ ). Il est beaucoup plus important dans le PL : il varie entre 1,6-1,7 (Na et Cl) et 6,5-7,2 % ( $\text{HCO}_3/\text{CO}_3$  et Ca).

Par voie de conséquence, le lac Titicaca est un milieu très stable. L'irrégularité des apports en eau et sels dissous ne modifie pas de façon notable la composition chimique de ses eaux, du moins dans le Grand Lac.

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

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BOULANGÉ (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.
- BOULANGÉ (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. — Circulación de materia (aguas sales disueltas) através del sistema fluvio-lacustre del Altiplano. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.*, vol. X, n° 1, 1978, 49-68.
- CARMOUZE (J.-P.) et MIRANDA (L.), 1978. — Estudio de los factores de control de los carbonatos disueltos en las aguas del lago Titicaca. Proceso de precipitación de calcita. *Revista Boliviana de Química*, La Paz, vol. 2, n° 1, 57-67.
- 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) : 311-328.
- GILSON (H. C.), 1939-40. — Reports of the Percy Sladen Trust Expedition. *Trans. Limn. Soc. Lond.*, 1 (ser. 3) : 1-357.
- GILSON (H. C.), 1964. — Lake Titicaca. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 15 : 112-127.
- MEYBECK (M.), 1979. — Concentrations des eaux fluviales en éléments majeurs et apports en solution aux océans. *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, Vol. 21, fasc. 3, 215-246.
- NEUVEU LEMAIRE (M.), 1906. — Les lacs des hauts-plateaux de l'Amérique du Sud. Imprimerie Nationale, Paris. 197 p.
- POSNANSKY (A.), 1911. — El clima del Altiplano y la extensión del lago Titicaca, con relación a Tihuanacu en Espocas Prehistoricas. Tipografía Comercial de Ismael Argote, La Paz, 29 p.
- RICHERSON (P. J.), WIDONER (C.) and KITTEL (T.), 1977. — The limnology of Lake Titicaca (Peru-Bolivia). Institute of Ecology, Publication n° 14, University of California, Davis.

## ANNEXES

Données brutes sur la composition chimique des eaux des affluents du Titicaca et des eaux du lac lui-même.

TABLEAU I  
Composition chimique des eaux des rivières exprimées en mM/l

	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	SiO <sub>4</sub> H <sub>4</sub>
Huancane 25.4.76	8.00	1.79	1.45	1.79	1.75	0.10	1.80	0.60	0.096
Huancane 15.11.76	8.20	2.20	2.21	9.40	9.35	0.20	2.30	0.745	0.085
Huancane 15.12.76	8.25	2.13	2.02	7.97	7.84	0.18	2.30	0.745	0.110
Huancane 15.1.77	7.53	1.60	0.82	0.99	1.05	0.07	1.25	0.375	0.085
Huancane 6.2.77	8.42	2.04	1.83	5.15	5.28	0.115	1.72	0.66	0.08
Huancane 10.3.77	7.30	1.62	0.913	2.00	1.90	0.10	1.45	0.365	0.08
Huancane 26.6.78	8.05	1.29	1.85	4.03	3.95	0.128	2.00	0.65	0.08
Huancane 26.11.78	7.90	1.40	2.10	2.20	2.13	0.10	1.75	0.45	0.10
Huancane 25.4.79	7.80	1.78	1.30	1.05	1.17	0.06	1.48	0.49	0.095
Ramis 25.4.76	8.40	1.63	1.04	1.00	1.48	0.08	1.25	0.44	0.095
Ramis 15.11.76	8.20	2.62	1.40	2.20	3.25	0.13	1.75	0.59	0.09
Ramis 15.12.76	8.18	2.35	1.56	1.55	2.37	0.12	1.75	0.59	0.0875
Ramis 15.1.77	7.84	1.60	0.625	0.58	0.75	0.07	0.98	0.37	0.085
Ramis 6.2.77	8.50	1.34	1.20	1.25	1.80	0.085	1.18	0.47	0.07
Ramis 15.2.77	7.96	2.19	1.14	1.22	2.00	0.10	1.40	0.41	0.15
Ramis 10.3.77	7.86	1.40	0.50	0.40	0.65	0.06	0.80	0.27	0.18
Ramis 26.13.78	7.30	1.78	0.70	2.05	2.50	0.07	1.10	0.33	0.10
Ramis 25.4.79	8.45	1.72	1.15	0.45	0.70	0.05	1.45	0.34	0.13
Coata 25.4.76	7.75	0.63	0.90	3.90	3.70	0.19	1.00	0.30	0.195
Coata 15.11.76	8.08	2.02	0.92	6.45	6.50	0.27	1.48	0.455	0.21
Coata 15.12.76	8.08	1.90	1.00	6.42	6.50	0.26	1.345	0.44	0.187

TABLEAU II  
Composition chimique des eaux des rivières exprimées en mM/l

	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	SiO <sub>4</sub> H <sub>4</sub>
Coata 15.1.77.....	8.60	0.74	0.20	1.36	1.35	0.09	0.445	0.105	0.14
Coata 6.2.77.....	7.55	1.16	0.53	1.55	1.63	0.19	0.86	0.205	0.185
Coata 10.3.77.....	7.85	0.73	0.22	1.35	1.40	0.08	0.426	0.09	0.17
Coata 26.6.78.....	7.80	1.80	0.90	5.0	4.80	0.25	1.45	0.42	0.19
Coata 26.11.78.....	7.54	0.20	0.40	2.5	2.30	0.15	0.75	0.20	0.20
Coata 25.4.79.....	7.65	1.44	0.875	3.75	3.60	0.17	1.20	0.40	0.285
Ilave 25.4.76.....	7.80	1.15	0.825	1.30	1.30	0.13	1.05	0.30	0.25
Ilave 15.11.76.....	8.26	1.96	0.59	2.40	2.30	0.16	1.25	0.40	0.30
Ilave 15.12.78.....	8.30	1.84	0.63	2.50	2.35	0.18	1.15	0.35	0.31
Ilave 15.1.77.....	7.85	1.50	0.45	1.70	1.65	0.15	0.20	0.32	0.29
Ilave 6.2.77.....	8.43	1.72	0.63	2.10	2.00	0.155	1.20	0.41	0.28
Ilave 11.3.77.....	7.15	0.98	0.65	0.65	0.60	0.05	0.825	0.225	0.25
Ilave 26.6.78.....	7.94	1.65	0.76	1.51	1.40	0.145	1.05	0.412	0.925
Ilave 26.11.78.....	7.62	1.18	0.46	1.50	1.50	0.08	0.75	0.25	0.165
Ilave 15.4.79.....	8.40	1.60	0.845	1.25	1.30	0.12	1.00	0.45	0.345
Suchez 25.4.76.....	7.85	0.65	0.25	0.025	0.22	0.04	0.35	0.17	0.05
Suchez 15.11.76.....	7.80	0.96	0.37	0.05	0.30	0.05	0.455	0.21	0.084
Suchez 15.12.76.....	7.85	0.70	0.29	0.025	0.19	0.03	0.325	0.165	0.047
Suchez 15.1.77.....	7.95	0.56	0.22	0.0	0.155	0.025	0.252	0.145	0.06
Suchez 6.2.77.....	7.92	0.685	0.24	0.06	0.19	0.03	0.30	0.165	0.20

TABLEAU III  
Composition chimique des eaux des rivières exprimées en mM/l

		pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	SiO <sub>4</sub> H <sub>4</sub>
Suchez	20.2.77.....	6.35	0.42	0,16	0.00	0.115	0.025	0.24	0.11	0.04
Suchez	10.3.77.....	7.55	0.57	0.19	0.00	0.13	0.025	0.27	0.13	0.045
Suchez	15.4.77.....	7.65	0.665	0.29	0.025	0.20	0.03	0.35	0.15	0.084
Suchez	14.6.77.....	7.78	1.10	0.53	0.07	0.395	0.05	0.658	0.216	0.05
Lago Umayo.....		8.95	1.78	1.25	10.20	10.75	0.465	1.38	1.15	0.06
Pallina	15.6.78.....	8.51	2.04	1.40	3.45	3.54	0.262	1.32	0.75	0.062
Pallina	26.6.79.....	8.20	1.85	2.80	7.60	8.15	0.39	1.60	1.35	0.09
Catari	15.4.76.....	8.35	2.23	2.44	4.40	5.50	0.32	2.02	0.73	0.245
Catari	15.6.78.....	8.18	3.22	3.30	4.55	5.56	0.30	3.00	1.16	0.145
Catari	15.4.79.....	8.29	1.80	1.65	1.60	1.77	0.10	1.90	0.55	0.13
Tiwanaku	15.4.76.....	8.50	2.17	1.00	0.40	0.58	0.08	1.50	0.42	0.22
Tiwanaku	15.6.78.....	8.18	3.28	1.60	0.485	1.04	0.09	1.88	0.435	0.145
Tiwanaku	15.4.79.....	8.30	1.85	0.50	0.25	0.52	0.075	1.08	0.24	0.14
Challa Yahuirá	15.4.79.....	8.08	1.65	0.28	0.49	1.12	0.149	0.48	0.27	0.11
Chilla	15.4.79.....	8.72	1.20	0.21	0.80	0.99	0.065	1.15	0.195	0.135
Batallas-Chicas.....		8.00	0.25	0.13	0.00	0.20	0.03	0.09	0.06	0.105
Keka.....		8.7	0.35	0.08	0.03	0.30	0.03	0.100	0.07	0.072
Huaycho	15.4.76.....	7.45	0.645	0.65	0.96	1.22	0.085	0.63	0.18	0.20
Huaycho	6.2.77.....	7.80	0.92	1.30	0.91	1.20	0.08	1.08	0.59	0.095
Zapatilla	21.12.76.....	8.53	1.50	1.45	1.22	1.20	0.18	1.42	0.62	0.225
Zapatilla	6.2.77.....	8.80	1.34	1.65	6.80	6.75	0.167	1.58	1.32	0.22

TABLEAU IV

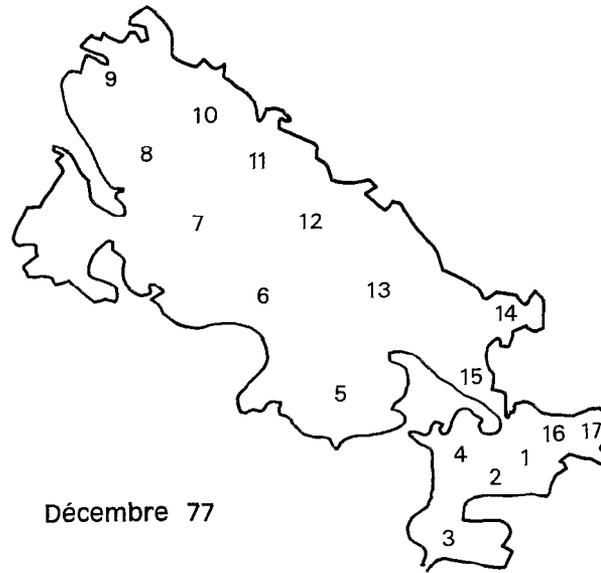
Composition chimique des eaux de rivière en relation avec les principales formations géologiques du bassin versant, exprimée en mm/l (cf. fig. 1)

		N°	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	SiO <sub>4</sub> H <sub>4</sub>
sédimentaire	Devonien.....	1	7.90	0.76	0.05	1.90	1.85	0.05	0.40	0.10	0.100
	Devonien.....	9	7.94	1.08	7.72	4.67	5.43	0.097	6.63	1.90	0.225
	Carbonifère inférieur..	11	7.84	1.04	1.55	0.065	0.22	0.041	1.48	0.37	0.115
	Carbonifère inférieur..	12	7.85	1.92	1.83	0.28	0.235	0.033	2.40	0.32	0.125
	Carbonifère inférieur..	13	8.06	2.18	0.40	0.00	0.170	0.04	1.20	0.18	0.130
	Crétacé inf. et moyen.	14	8.40	2.84	3.00	0.00	0.350	0.065	3.50	0.45	0.22
	Crétacé inf. et moyen.	15	8.34	2.74	1.30	0.00	0.18	0.064	2.13	0.35	0.235
	Crétacé supérieur.....	16	7.54	1.08	1.20	0.00	0.28	0.03	1.25	0.20	0.125
	Crétacé supérieur.....	17	7.28	1.16	0.95	0.24	0.40	0.047	1.15	0.25	0.08
	Crétacé supérieur.....	18	7.89	1.74	1.60	0.05	0.40	0.072	1.85	0.35	0.135
volcanique	Crétacé supérieur.....	10	7.60	0.85	0.39	0.00	0.03	0.028	0.58	0.14	0.20
	Crétacé supérieur.....	19	7.34	1.65	3.00	15.65	16.30	0.21	3.50	0.75	0.048
	Tertiaire inf. (Puno)..	2	8.18	2.10	1.91	3.41	3.45	0.035	2.80	0.14	0.185
	Tertiaire inf. (Puno)..	3	8.28	2.24	1.71	2.34	2.47	0.028	2.58	0.15	0.265
	Tertiaire moyen volca- nique.....	4	7.64	1.68	0.78	0.40	0.65	0.048	1.15	0.25	0.04
	Tertiaire moyen volca- nique.....	5	7.47	1.12	0.72	4.96	3.15	0.20	1.45	0.60	0.356
	Tertiaire moyen volca- nique.....	6	7.83	0.99	0.66	2.16	2.05	0.137	0.80	0.35	0.425
	Pleistocène volcanique.	7	7.66	0.90	0.88	0.68	0.926	0.092	0.77	0.45	0.365
Pleistocène volcanique.	8	7.10	0.23	0.40	0.00	0.13	0.065	0.28	0.15	0.50	

TABLEAU V

Composition chimique des eaux du Titicaca en décembre 1977. Les résultats sont exprimés en mm/l (Alc =  $\text{HCO}_3^- + 2\text{CO}_3^{2-}$  = l'alcalinité exprimée en mé/l)

	pH	Alc.	$\text{SO}_4^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{++}$	$\text{Mg}^{++}$	$\text{SiO}_2\text{H}_4$
1 2 m.....	8.85	1.95	2.68	7.80	9.00	0.43	1.38	1.49	0.022
2 2 m.....	8.60	1.95	2.88	8.20	8.66	0.465	1.43	1.64	0.023
3 6 m.....	8.60	1.97	2.88	8.05	8.66	0.46	1.60	1.75	0.019
4 7 m.....	8.42	2.05	2.90	7.90	8.83	0.45	1.70	1.62	0.019
5 0 m.....	8.51	2.30	2.68	7.30	8.21	0.43	1.66	1.46	0.002
5 40 m.....	8.50	2.25	2.58	7.14	7.98	0.39	1.72	1.47	0.002
5 90 m.....	7.95	2.20	2.58	7.18	7.90	0.39	1.74	1.43	0.027
6 0 m.....	8.58	2.18	2.58	7.12	7.94	0.41	1.74	1.44	0.0038
6 20 m.....	8.52	2.18	2.70	7.20	7.94	0.39	1.70	1.45	0.003
7 0 m.....	8.44	2.20	2.58	7.20	7.97	0.39	1.70	1.45	0.002
7 50 m.....	8.19	2.19	2.58	7.12	7.94	0.39	1.70	1.45	0.0025
7 100 m.....	8.12	2.19	2.58	7.12	7.94	0.41	1.68	1.48	0.0083
7 150 m.....	8.05	2.22	2.58	7.12	8.01	0.41	1.69	1.50	0.022
8 0 m.....	8.45	2.20	2.60	7.12	8.15	0.41	1.71	1.47	0.002
8 50 m.....	8.23	2.20	2.58	7.12	7.46	0.41	1.65	1.44	0.004
8 100 m.....	8.39	2.25	2.58	7.20	7.70	0.39	1.62	1.48	0.0045
8 150 m.....	7.88	2.30	2.68	6.98	7.94	0.39	1.67	1.47	0.012
8 200 m.....	7.08	2.19	2.68	6.98	7.53	0.39	1.69	1.49	0.031
9 5 m.....	8.49	2.14	2.68	7.22	7.70	0.41	1.65	1.47	0.0022
10 0 m.....	8.36	2.15	2.68	7.16	7.46	0.41	1.68	1.48	0.002
10 65 m.....	8.20	2.20	2.65	7.20	7.80	0.40	1.66	1.48	0.0055
10 115 m.....	8.18	2.20	2.65	7.20	7.98	0.40	1.65	1.45	0.0069
10 190 m.....	8.10	2.18	2.58	7.14	7.70	0.40	1.72	1.40	0.012
10 265 m.....	7.65	2.18	2.58	7.16	7.87	0.40	1.69	1.42	0.048
11 0 m.....	8.40	2.17	2.72	7.14	7.77	0.40	1.63	1.44	0.002
11 50 m.....	8.16	2.20	2.72	7.16	7.53	0.40	1.63	1.49	0.0053
11 120 m.....	8.06	2.19	2.58	7.10	7.49	0.39	1.70	1.40	0.0083
11 170 m.....	8.03	2.20	5.58	7.24	7.67	0.40	1.64	1.44	0.011
11 220 m.....	7.82	2.19	2.68	6.98	7.53	0.41	1.64	1.43	0.023
11 270 m.....	7.68	2.19	2.68	7.20	7.45	0.42	1.70	1.47	0.042
12 0 m.....	8.39	2.19	2.68	7.16	7.50	0.42	1.60	1.45	0.0025
12 45 m.....	8.21	2.17	2.68	7.04	7.60	0.40	1.61	1.44	0.035
12 120 m.....	7.95	2.19	2.68	7.14	7.80	0.40	1.65	1.48	0.013
12 195 m.....	7.75	2.18	2.70	7.22	7.87	0.39	1.62	1.45	0.041
13 0 m.....	8.42	2.18	2.72	7.16	7.87	0.40	1.69	1.54	0.0038
13 50 m.....	8.07	2.17	2.68	7.20	7.67	0.40	1.66	1.45	0.004
13 125 m.....	8.01	1.97	2.68	6.95	7.53	0.38	1.66	1.48	0.0097
13 200 m.....	7.70	2.17	2.58	7.20	7.59	0.38	1.63	1.45	0.037
14 1 m.....	8.51	2.19	2.72	7.12	7.53	0.38	1.63	1.44	0.001
15 0 m.....	8.38	2.19	2.75	7.25	8.18	0.39	1.62	1.47	0.0047
15 60 m.....	8.09	2.19	2.75	7.25	7.87	0.39	1.61	1.46	0.0069
15 100 m.....	8.15	2.20	2.68	7.24	8.05	0.39	1.67	1.48	0.0091
15 160 m.....	7.79	2.20	2.58	7.22	7.92	0.39	1.63	1.46	0.037
16 0m.....	8.56	2.10	2.78	7.45	8.10	0.41	1.60	1.61	0.0093
16 44 m.....	8.06	2.18	2.68	7.34	8.46	0.40	1.63	1.61	0.013
17 2.5 m.....	8.60	1.90	2.88	7.30	8.87	0.41	1.58	1.68	0.0093



Décembre 77

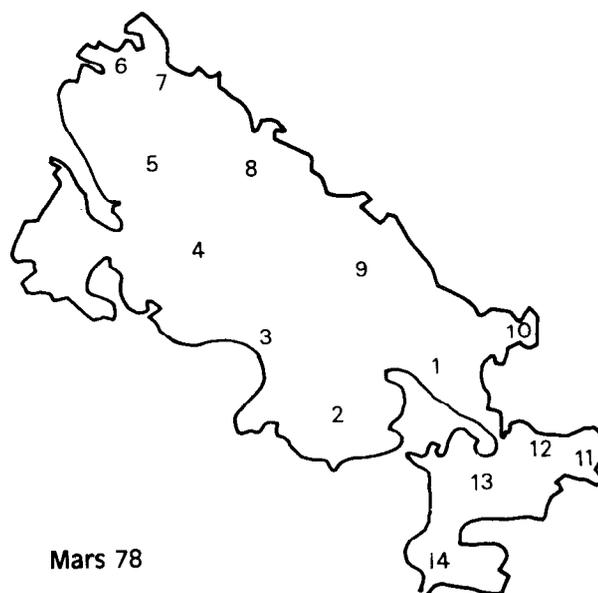
Localisation des prélèvements  
d'eau en décembre 1977

TABLEAU VI

Composition chimique des eaux du Titicaca en mars 1978. Les résultats sont exprimés en m/l ( $\text{Alc} = \text{HCO}_3^- + 2\text{CO}_3^{2-} =$  l'alcalinité exprimée en mé/l)

	pH	Alc.	$\text{SO}_4^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{++}$	$\text{Mg}^{++}$	$\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
1 om.....	8.54	2.15	2.70	7.08	7.90	0.40	1.65	1.49	0.008
1 40 m.....	8.39	2.20	2.69	7.08	8.00	0.39	1.70	1.50	0.005
1 90 m.....	8.29	2.18	2.69	7.08	7.97	0.41	1.70	1.48	0.0065
1 140 m.....	8.08	2.19	2.69	7.18	8.00	0.40	1.70	1.46	0.010
1 190 m.....	7.71	2.18	2.65	7.09	7.90	0.40	1.70	1.46	0.058
2 0 m.....	8.53	2.20	2.65	7.08	7.70	0.40	1.67	1.46	0.0045
2 40 m.....	8.56	2.18	2.55	7.08	7.90	0.40	1.67	1.46	0.0066
2 90 m.....	8.03	2.18	2.55	7.18	8.00	0.41	1.66	1.48	0.028
3 0 m.....	8.49	1.95	2.65	5.53	6.38	0.40	1.67	1.15	0.006
3 35 m.....	8.39	2.18	2.09	7.08	7.98	0.40	1.43	1.40	0.042
4 0 m.....	8.51	2.20	2.60	7.08	7.77	0.40	1.70	1.43	0.0064
4 35 m.....	8.53	2.18	2.69	7.08	7.70	0.41	1.60	1.42	0.0063
4 85 m.....	8.18	2.19	2.67	7.08	7.49	0.41	1.60	1.43	0.010
4 135 m.....	8.165	2.21	2.65	7.18	7.72	0.40	1.62	1.45	0.015
4 185 m.....	7.82	2.21	2.60	7.18	7.80	0.40	1.65	1.43	0.048
5 0 m.....	8.54	2.17	2.60	7.08	7.70	0.39	1.67	1.42	0.007
5 50 m.....	8.33	2.18	2.60	7.08	7.64	0.40	1.62	1.43	0.0065
5 100 m.....	8.15	2.19	2.68	7.08	7.87	0.40	1.70	1.44	0.0075
5 150 m.....	8.12	2.18	2.65	7.18	7.60	0.40	1.70	1.45	0.0076
5 200 m.....	7.97	2.20	2.64	7.18	7.75	0.39	1.69	1.46	0.0030
6 0 m.....	9.15	1.60	2.64	10.48	12.67	0.54	1.68	2.00	0.007
7 0 m.....	8.52	2.17	2.60	6.80	7.42	0.38	1.58	1.39	0.005
7 20 m.....	8.48	2.17	2.64	7.00	7.49	0.40	1.64	1.40	0.0045
7 70 m.....	8.18	2.17	2.64	7.08	7.53	0.40	1.68	1.39	0.010
7 120 m.....	8.13	2.16	2.64	7.18	7.77	0.40	1.65	1.45	0.008
7 170 m.....	7.97	2.26	2.64	7.18	7.93	0.40	1.65	1.45	0.013
7 220 m.....	7.73	2.20	2.64	7.18	7.64	0.40	1.66	1.46	0.029
8 0 m.....	8.54	2.19	2.64	7.18	7.53	0.39	1.66	1.39	0.0038

	pH	Alc.	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	SiO <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O
8 70 m.....	8.13	2.18	2.68	7.08	7.67	0.41	1.66	1.47	0.010
8 120 m.....	8.10	2.18	2.68	7.18	7.95	0.40	1.65	1.46	0.0065
8 170 m.....	8.04	2.17	2.68	7.18	7.95	0.40	1.67	1.44	0.012
8 220 m.....	7.92	2.18	2.68	7.18	8.04	0.41	1.65	1.47	0.013
8 270 m.....	7.75	2.18	2.68	7.18	7.87	0.40	1.65	1.51	0.017
9 0 m.....	8.52	2.17	2.64	7.08	8.00	0.41	1.60	1.46	0.0065
9 60 m.....	8.33	2.14	2.64	7.08	8.00	0.39	1.64	1.47	0.0053
9 110 m.....	8.16	2.18	2.62	7.18	7.90	0.40	1.64	1.47	0.011
9 160 m.....	8.08	2.20	2.60	7.18	7.49	0.40	1.68	1.47	0.013
9 210 m.....	7.82	2.22	2.62	7.18	7.63	0.40	1.68	1.50	0.018
10 2.5 m.....	8.75	1.60	2.58	6.76	7.77	0.38	1.33	1.44	0.0075
11 5 m.....	5.58	1.88	2.79	7.47	8.33	0.42	1.50	1.52	0.006
12 0 m.....	8.75	1.87	2.94	7.66	8.30	0.44	1.50	1.67	0.015
12 20 m.....	8.74	1.87	2.94	7.66	8.45	0.44	1.49	1.62	0.018
13 2.5 m.....	8.84	1.75	2.22	7.76	8.35	0.43	1.49	1.65	0.018
14 2.5 m.....	8.51	1.95	2.85	7.37	8.38	0.43	1.55	1.59	0.0045



Mars 78

Localisation des prélèvements  
d'eau en mars 1978