

## *La régulation hydrique du lac Titicaca et l'hydrologie de ses tributaires<sup>(1)</sup>*

Jean-Pierre CARMOUZE\* et Eleonor AGUIZE JAEN\*\*

### RÉSUMÉ

*Les principales caractéristiques hydrologiques des tributaires du lac Titicaca sont présentées ainsi que celles de son affluent le Desaguadero. Elles ont toutes un régime apparenté au régime tropical caractérisé par une époque de hautes eaux en février-mars et une époque d'étiage de juillet à octobre. Elles apportent au lac en moyenne  $8,25 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/an. Les pluies qui tombent en grande partie de décembre à février représentent un volume à peine inférieur ( $7,9 \times 10^9$  m<sup>3</sup> en moyenne/an).*

*Ces apports sont éliminés à 90 % des pertes, tandis que le Desaguadero atteint à peine 1,5 % des pertes, ce qui conduit à considérer le lac Titicaca comme un système presque fermé. Le renouvellement des eaux est très faible dans le Grand Lac (de l'ordre de 1,6 %/an), mais il est relativement élevé dans le Petit Lac (24 %/an).*

Mots-clés : Lac Titicaca — Amérique du Sud — Hydrologie — Régulation hydrique.

### SUMMARY

#### THE HYDRIC REGULATION OF LAKE TITICACA AND THE HYDROLOGY OF ITS TRIBUTARIES

*The main hydrological characteristics of the affluents and the effluent of the Lake Titicaca are presented. The affluent regimes are tropical ones, characterised by an increase in February-March and a marked decrease from July to October. The mean annual flow is  $8.25 \times 10^9$  m<sup>3</sup>. The rainfall, which takes place from December to February, represents quite the same volume:  $7.9 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/year.*

*These inputs are eliminated by evaporation (90 %), infiltrations (9 %) and the effluent Desaguadero (1.5 %). So, the Lake Titicaca is quite a closed lake. The water turn-over is small in the "Great Lake" (1.6 %/year) but higher in the "Small Lake" (24 %/year).*

KEY WORDS : Lake Titicaca — South America — Hydrology — Hydrological regulation.

### RESUMEN

#### LA REGULACIÓN HÍDRICA DEL LAGO TITICACA Y LA HIDROLOGÍA DE SUS TRIBUTARIOS

*Las principales características hidrológicas de los contribuidores del lago Titicaca están detalladas, así como las de su afluente, el Desaguadero. Todas tienen un régimen parecido al régimen tropical caracterizado por una época de aguas altas en febrero-marzo y una época de estío de julio a octubre. Ellas aportan un promedio de  $8,25 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/*

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

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

\*\* SENAMHI, Puno, Pérou.

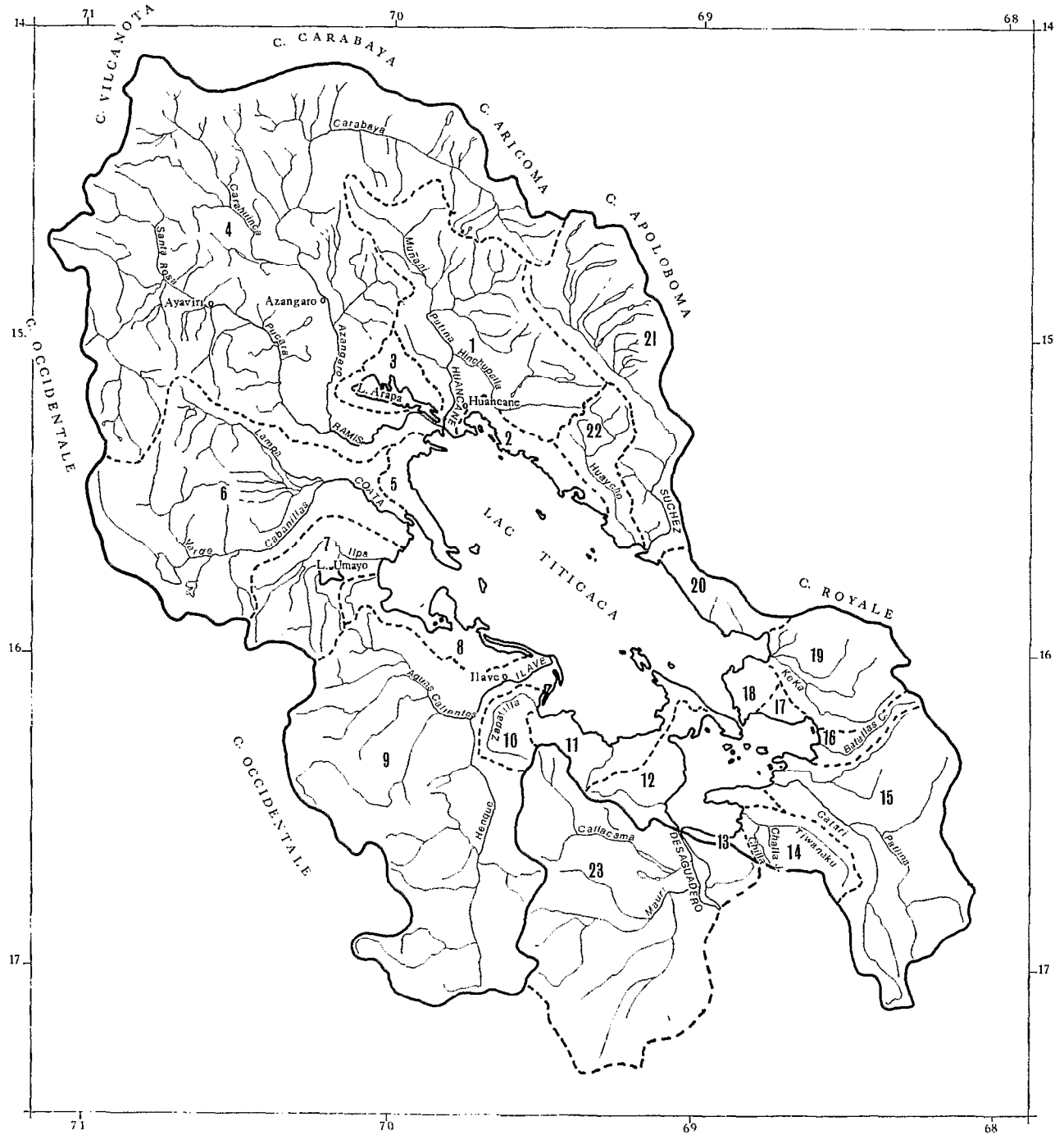


FIG. 1. — Le réseau hydrographique du lac Titicaca et ses sous-bassins versants

año. En gran parte las lluvias que caen de diciembre a febrero representan un volumen apenas inferior (un promedio de  $7,9 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/año).

Estos aportes son eliminados en un 90 % mediante evaporación; las infiltraciones aseguran 9 % de las pérdidas, lo que conduce a considerar el lago Titicaca como un sistema casi cerrado. La renovación de aguas en el Lago Grande es muy baja (del orden de 1.6 %/año), pero es relativamente elevada en el Lago Pequeño (24 %/año).

PALABRAS CLAVES : Lago Titicaca — América del Sur — Hidrología — Regulación hídrica.

La régulation hydrique du lac Titicaca est loin d'être une inconnue. En effet, diverses tentatives de bilan ont été effectuées qui en fournissent un premier schéma (MONHEIM, 1956; BAZOBERY Q., 1968; KESSLER, 1970; RICHESON *et al.*, 1977; CARMOUZE *et al.*, 1977).

Des données nouvelles viennent de paraître sur l'hydrologie des principaux tributaires du lac (CHURUTA S. et MAMANI M., 1977; TEJADA C., 1977; QUIZPE Z. et AMANQUI A., 1978) ainsi que sur la pluviosité du bassin du Titicaca (BOULANGÉ et AQUIZE JAEN, 1981).

Nous nous proposons de reprendre l'essentiel de ces données pour décrire les grands traits de l'hydrologie fluviale puis pour définir la régulation hydrique moyenne du lac pour la période 1956-1978 ainsi que les fluctuations saisonnières et annuelles du niveau de son plan d'eau dues à l'irrégularité des apports en eau.

nombreuses rivières secondaires (Rios Zapatilla, Yanarico, Ilpa, Tiwanaku, Catari, Batallas Chicas, Keka) (fig. 1). Il possède un seul effluent le Desaguadero.

Le Ramis, le Coata, l'Ilave et le Huancané font l'objet de relevés hydrologiques au niveau de leur cours inférieur depuis 1956 (cf. Annexe I). A partir de ces données, une caractérisation satisfaisante de leur régime va être faite pour la période 1956-1978, complétée par une analyse statistique de la distribution des volumes annuels écoulés. Les mesures hydrologiques disponibles concernant le Suhez ne portent que sur quatre années. La caractérisation de son régime sera donc très approchée. Quant aux rivières secondaires, elles n'ont pas été étudiées de façon suivie. L'absence de données sera palliée par l'estimation des volumes annuels écoulés à partir des données pluviométriques de leur bassin.

### 1.1. Le Rio Ramis

Le Rio Ramis est le fleuve le plus important du système fluvial du lac. Les volumes d'eau annuellement écoulés de 1956 à 1978, dans son cours inférieur sont représentés dans la figure 2a. La valeur moyenne annuelle a été de  $2,38 \times 10^9$  m<sup>3</sup>, ce qui équivaut à

TABLEAU 1

Quantiles, débits spécifiques, volumes écoulés et hydraulicités correspondants des principaux tributaires du Titicaca. R = Ramis; C : Coata; I = Ilave; H = Huancané

Quantiles	Périodes de retour (ans)	Modules (m <sup>3</sup> /s)				Débits spécifiques (l/s/km)				Volumes écoulés $\times 10^9$ m <sup>3</sup>				Hydraulicité			
		R	C	I	H	R	C	I	H	R	C	I	H	R	C	I	H
		Cinquantennal sec.....	50	37,9	7,51	11,25	7,0	2,54	1,47	1,41	1,72	1198	237	355	221	0,52	0,20
Vingtennal sec.....	20	43,7	10,9	13,9	8,4	2,93	2,14	1,74	2,08	1381	346	440	267	0,60	0,30	0,43	0,51
Decennal sec.....	10	49,3	14,8	16,8	9,9	3,31	2,91	2,10	2,43	1559	470	532	313	0,67	0,40	0,52	0,60
Quintennal sec.....	5	56,8	20,8	21,2	11,9	3,81	4,08	2,65	2,93	1795	660	669	376	0,78	0,56	0,66	0,72
Median.....	2	73,7	36,8	32,1	16,4	4,91	7,20	4,01	4,05	2312	1164	1014	520	1	1	1	1
Quintennal humide....	5	92,4	59,4	46,9	22,0	6,20	11,63	5,87	5,42	2920	1879	1483	696	1,26	1,61	1,46	1,34
Decennal humide.....	10	103,6	74,2	56,4	25,3	6,96	14,52	7,05	6,24	3275	2346	1781	802	1,41	2,01	1,76	1,54
Vingtennal humide....	20	113,6	88,0	65,1	28,4	7,48	17,22	8,14	8,98	3520	2782	2058	897	1,55	2,39	2,03	1,72
Cinquantennal humide.	50	125,5	105,4	76,0	32,0	8,43	20,61	9,50	7,88	3966	3330	2401	1012	1,71	2,86	2,36	1,95

un module de 75,4 m<sup>3</sup>/s. Le module maximal a été de 106,8 m<sup>3</sup>/s en 1960, le module minimal de 41,1 m<sup>3</sup>/s en 1957; les hydraulicités correspondantes ont été de 1,41 et 0,54. La distribution des volumes annuels écoulés, d'après une étude statistique suit la loi de Pearson III (1).

Les valeurs des différents quantiles sont présentées dans le tableau I en même temps que les débits spécifiques, volumes écoulés et hydraulicités.

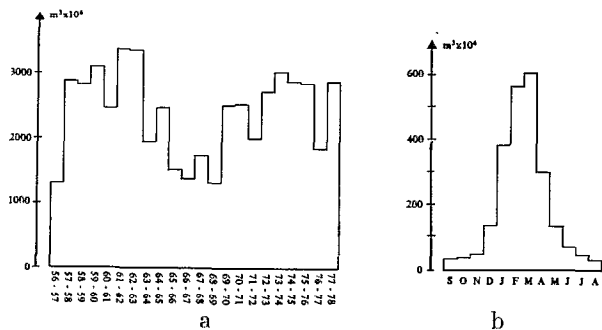


FIG. 2. — Le Ramis. (a) Apports annuels de 1956 à 1978. (b) Apports moyens mensuels

Le régime saisonnier du Ramis s'apparente à celui d'un régime tropical. Il est marqué par quatre périodes (fig. 2 b) :

— une période de début de crue de novembre à janvier (volume écoulé = 24 % du volume annuel écoulé);

— une période de hautes eaux de février à mars (volume écoulé = 49 % du volume annuel écoulé);

— une période de fin de crue d'avril à juin (volume écoulé = 21 % du volume annuel écoulé);

— une période d'étiage de juillet à octobre (volume écoulé = 6 % du volume annuel écoulé).

## 1.2. Le Coata

Les volumes d'eau écoulés année par année de 1956 à 1978 sont représentés dans la figure 3 a. La valeur moyenne annuelle a été de  $1,31 \times 10^9$  m<sup>3</sup>, ce qui correspond à un module de 41,5 m<sup>3</sup>/s. Le module maximal enregistré a été de 73,6 m<sup>3</sup>/s en 1963, le module minimal de 52,0 m<sup>3</sup>/s en 1957; les hydraulicités ont varié de 1,77 à 0,125.

L'étude statistique des volumes annuels écoulés,

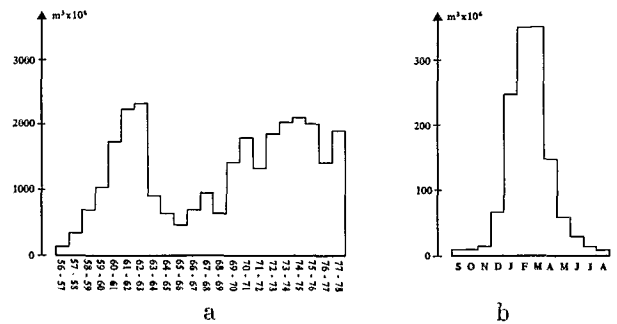


FIG. 3. — Le Coata. (a) Apports annuels de 1956 à 1978. (b) Apports moyens mensuels

montre que leur distribution suit la loi de Pearson III (2). Les valeurs des différents quantiles, les débits spécifiques, volumes écoulés et hydraulicités correspondants sont regroupés dans le tableau I.

Le régime saisonnier du Coata est celui d'un régime tropical de transition caractérisé par quatre périodes (fig. 3 b) :

— une période de début de crue de novembre à janvier (volume écoulé = 24,9 % du volume annuel écoulé);

— une période de hautes eaux de février à mars (volume écoulé = 53,5 % du volume annuel écoulé);

— une période de fin de crue d'avril à juin (volume écoulé = 17,7 % du volume annuel écoulé);

— une période d'étiage de juillet à octobre (volume écoulé = 3,9 % du volume annuel écoulé).

## 1.3. L'Ilave

La valeur moyenne des volumes d'eau écoulés annuellement de 1957 à 1978 (fig. 4 a) a été de

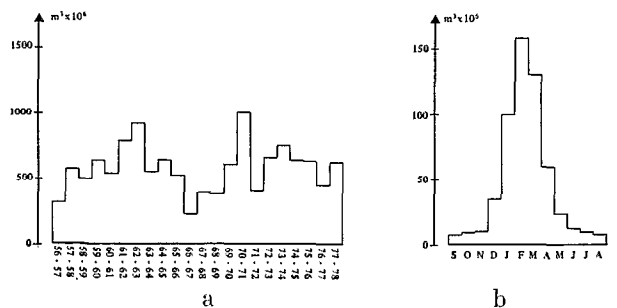


FIG. 4. — Le Ilave. (a) Apports annuels de 1957 à 1978. (b) Apports moyens mensuels

(1) Les caractéristiques de la distribution sont les suivantes : moyenne =  $2,376 \times 10^9$  m<sup>3</sup>; médiane =  $2,311 \times 10^9$  m<sup>3</sup>; mode =  $2,182 \times 10^9$  m<sup>3</sup>; variance = 459700; coefficient de variation = 0,285; coefficient d'assymétrie = 0,57; coefficient d'aplatissement = 0,489.

(2) Les caractéristiques de la distribution sont les suivantes : moyenne =  $1,311 \times 10^9$  m<sup>3</sup>; médiane =  $1,163 \times 10^9$  m<sup>3</sup>; mode =  $0,858 \times 10^9$  m<sup>3</sup>; variance = 595138; coefficient de variation = 0,588; coefficient d'assymétrie = 1,176; coefficient d'aplatissement = 2,075.

$1,10 \times 10^9 \text{ m}^3$ , soit un module correspondant de  $34,8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le module maximal a été enregistré en 1962 ( $78,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ) le module minimal en 1956 ( $10,6 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Ces années-là, les hydraulicités respectives ont été égales à 2,25 et 0,30.

La distribution des volumes écoulés annuellement obéit à la loi de Pearson III (1). Les valeurs des différents quantiles sont présentées dans le tableau I en même temps que les débits spécifiques, volumes écoulés et hydraulicités correspondants.

Le régime saisonnier moyen d'Ilave est caractéristique d'un régime tropical de transition (fig. 4 b). Il comprend :

— une période de début de crue de novembre à janvier (volume écoulé = 25,3 % en moyenne du volume annuel écoulé);

— une période de hautes eaux de février à mars (volume écoulé = 54,9 % du volume annuel écoulé, en moyenne);

— une période de fin de crue d'avril à juin (volume écoulé = 13,1 % en moyenne du volume écoulé);

— une période d'étiage de juillet à octobre (volume écoulé = 6,7 % en moyenne du volume annuel écoulé).

#### 1.4. Le Huancané

La valeur moyenne des volumes d'eau écoulés chaque année de 1957 à 1978 (fig. 5 a) a été de  $0,54 \times 10^9 \text{ m}^3$  soit un module de  $17,1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le module maximal a été enregistré en 1971 ( $31,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) le module minimal en 1967 ( $6,75 \text{ m}^3/\text{s}$ ); les hydrau-

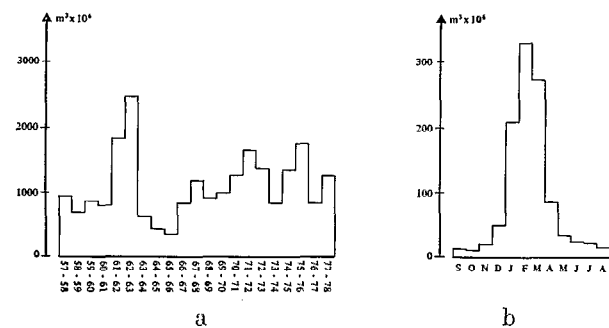


FIG. 5. — Le Huancané. (a) Apports annuels de 1956 à 1978. (b) Apports moyens mensuels

licités correspondantes ont été égales à 1,83 et 0,38.

La distribution des volumes écoulés, comme dans le cas des fleuves précédents suit la loi de Pearson III (2). Les valeurs des différents quantiles sont présentées dans le tableau I, de même que les débits spécifiques, volumes écoulés et hydraulicités correspondants.

Le régime saisonnier est celui d'un régime tropical de transition défini par (fig. 5 b) :

— une période de début de crue de novembre à janvier (volume écoulé = 25,5 % en moyenne du volume annuel écoulé);

— une période de hautes eaux de février à mars (volume écoulé = 51,8 % en moyenne du volume annuel écoulé);

— une période de fin de crue d'avril à juin (volume écoulé = 16,9 % en moyenne du volume annuel écoulé);

— une période d'étiage de juillet à octobre (volume écoulé = 5,8 % en moyenne du volume annuel écoulé).

#### 1.5. Le Suchez

Quatre années de données hydrologiques seulement permettent de caractériser le régime du cours inférieur du Suchez : 1965, 1970, 1971 et 1971 (tabl. II).

La valeur moyenne annuelle du volume écoulé au cours de cette période a été de  $0,236 \times 10^9 \text{ m}^3$ , ce qui correspond à un module de  $7,46 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Son régime saisonnier se rapproche d'un régime tropical de transition. Il en est toutefois moins proche si on le compare à celui des fleuves précédemment considérés : la phase de décrue est plus progressive et celle d'étiage relativement moins marquée. Cela s'explique par l'influence des glaciers dans le bassin versant supérieur. On retrouve toujours :

— une période de début de crue de novembre à janvier (volume écoulé = 27,2 % du volume annuel écoulé);

— une période de hautes eaux de février à mars (volume écoulé = 38,4 % du volume annuel écoulé);

— une période de fin de crue d'avril à juin (volume écoulé = 23,7 % du volume écoulé);

— une période d'étiage de juillet à octobre (volume écoulé = 10,7 % du volume annuel écoulé).

(1) Les caractéristiques de la distribution sont les suivantes : moyenne =  $1,100 \times 10^9 \text{ m}^3$ ; médiane =  $1,014 \times 10^9 \text{ m}^3$ ; mode =  $0,836 \times 10^9 \text{ m}^3$ ; variance = 257924; coefficient de variation = 0,461; coefficient d'assymétrie = 1,043; coefficient d'aplatissement = 1,632.

(2) Les caractéristiques de la distribution sont les suivantes : moyenne =  $0,543 \times 10^9 \text{ m}^3$ ; médiane =  $0,519 \times 10^9 \text{ m}^3$ ; mode =  $0,473 \times 10^9 \text{ m}^3$ ; variance = 37771,5; coefficient de variation = 0,358; coefficient d'assymétrie = 0,716; coefficient d'aplatissement = 0,769.

TABLEAU II

Le Rio Suchez : Volumes moyens mensuels et annuels écoulés en  $m^3 \times 10^6$  (données provenant du Service National de Météorologie et d'Hydrologie de Bolivie)

	1965	1970	1971	1972	Moyennes mensuelles
Septembre.....	2.84	10.271	5.957	4.236	5.82
Octobre.....	2.258	10.143	4.940	4.233	5.393
Novembre.....	12.366	12.137	5.826	11.404	10.43
Décembre.....	51.212	13.947	6.988	28.444	25.14
Janvier.....	50.064	21.308	17.900	25.216	28.62
Février.....	85.954	27.895	51.982	35.671	50.37
Mars.....	56.978	35.330	31.170	37.498	40.24
Avril.....	19.876	34.846	22.723	27.599	26.26
Mai.....	18.233	26.111	16.250	12.210	18.20
Juin.....	4.776	23.272	12.868	5.768	11.67
Juillet.....	2.921	12.917	9.815	4.621	7.56
Août.....	1.688	11.987	7.851	4.010	6.38
Volume annuel écoulé.....	309.16	240.17	194.25	200.91	236.08

### 1.6. Les rivières secondaires

Il existe de nombreuses rivières secondaires pour lesquelles nous ne disposons d'aucune donnée hydrologique. Leur contribution individuelle à l'alimentation du lac reste généralement faible, mais leur contribution d'ensemble ne peut être négligée lorsqu'on aborde l'étude de la régulation hydrique du Titicaca.

Aussi, faute de mieux faire, avons-nous affecté les divers sous-bassins, pour lesquels nous ne disposons pas de données hydrologiques, d'une pluviométrie moyenne annuelle, H, et d'un coefficient de ruissellement  $f_r$ , de sorte à calculer le volume annuel écoulé,  $V_R$ .

$$V_R = S \times H \times f_r \quad S = \text{Surface du sous-bassin.}$$

La pluviométrie est calculée d'après les données de

TABLEAU III

Superficie, S, hauteurs moyennes des pluies, H, volume moyen des pluies, V, coefficient de drainage,  $f_r$  et volumes moyens d'eau écoulé dans les rivières secondaires au cours de l'année dont les bassins sont définis par des numéros dans la figure 1

	n°	S km <sup>2</sup>	H mm	V m <sup>3</sup> × 10 <sup>6</sup>	$f_r$ %	$V_R$ m <sup>3</sup> × 10 <sup>6</sup>
Rio. Zapatilla.....	20	470	588	276,7	25	69,1
Lit. Juli-Tiquina.....	11	829	800	663,5	50	331,7
Lit. Tiquina Achacachi.....	18	268	700	187,7	35	65,6
Rio Keka.....	19	1500	—	—	—	120
Lit. Achacachi-Escoma.....	20	600	500	300	35	105
Rio Huaycho.....	22	857	810	694,6	25	173,6
Lit. Moho Huancane.....	2	459	765	351,4	50	175,7
Lit. Arapa.....	3	632	620	391,8	30	117
Lit. Capachica-Ramis.....	5	384	730	280,6	40	112
Rio Ilpa.....	7	1589	550	873,8	25	218,4
Lit. Puno-Lit. Ilave.....	8	744	676	505,3	35	173,3
Lit. Tiquina-Desaguadero.....	12	680	760	516,8	50	258,4
Lit. Desaguadero-Guaqui.....	13	65,6	628	41,2	50	20,6
Lit. Taraco-rio Tiwanaku.....	14	953	615	585,9	30	185,2
Rio. Catari, Pallina.....	15	3421	634	2169	25	542,2
Rio Batallas Chicas.....	16	365	700	255,5	25	63,9
Lit. Watajata-Tiquina.....	17	179	800	143,5	50	71,75

1964 à 1977 (BOULANGÉ et AQUIZE, 1981). Les divers coefficients de ruissellement sont estimés en fonction de ceux des sous-bassins pour lesquels ils sont connus.

Les résultats pour l'ensemble des sous-bassins, localisés dans la figure 1, sont consignés dans le tableau III.

Notons que le Rio Catari, grossi du Rio Pallina, apporte au lac près de 20 % des apports de l'ensemble des rivières secondaires.

### 1.7. Le Desaguadero

Le Desaguadero est l'unique effluent du lac

Titicaca. Ses eaux se dirigent en direction du lac Poopó. Certaines années, en janvier-février, le courant du Desaguadero s'inverse; ce dernier joue alors le rôle temporaire d'affluent.

L'inversion du courant a lieu lorsque les pluies sont abondantes sur le bassin des Rios Callacama et Mauri (fig. 1) et lorsque le niveau du lac est bas; les eaux convergent vers une plaine d'inondation qui est alors en charge par rapport au lac.

Les volumes d'eau annuels « nets » qui sortent du lac Titicaca sont consignés dans le tableau IV. Au cours des années 1970 à 1972 les entrées d'eau au lac l'ont emporté sur les sorties.

TABLEAU IV

Volumes annuels « nets » écoulés par le Desaguadero. Les valeurs positives indiquent des volumes d'eau sortant du lac, les valeurs négatives des volumes d'eau entrant dans le lac

Années	1964-65	1965-66	1966-67	1967-68	1968-69	1969-70	1970-71
Volumes en $\times 10^9$ m <sup>3</sup> .....	1,12	0,655	0,241	0,296	0,256	0,056	— 0,123
Années	1971-72	1972-73	1973-74	1974-75	1975-76	1976-77	1977-78
Volumes en $\times 10^9$ m <sup>3</sup> .....	— 0,105	— 0,072	0,107	0,059	0,237	0,184	0,129

## 2. LA RÉGULATION HYDRIQUE DU LAC

### 2.1. La régulation hydrique moyenne du lac

Le lac Titicaca est formé de deux cuvettes : le Grand Lac et le Petit Lac qui occupent respectivement 7131 et 1426 km<sup>2</sup> (1) pour des profondeurs moyennes de 133 et 9 m. Les eaux du Grand Lac pénètrent dans le Petit Lac par le détroit de Tiquina (cf. BOULANGÉ et AQUIZE, 1981). Les régulations hydriques de ces deux milieux sont fort différentes, aussi les aborderons-nous après avoir établi celle du lac pris dans son ensemble.

Des données suffisamment complètes sur les pertes et les apports fluviaux ainsi que sur les apports météoriques sont enregistrés depuis 1964, ce qui nous permet de retenir la période 1964-1978 pour établir un bilan hydrique moyen à l'échelle de l'année.

Il s'agit de définir les termes des bilans suivants :

— pour le lac pris dans son ensemble :  $(v)_F + (v)_M = (v)_I + (v)_E + (v)_D + \Delta(v)_L$ ;

— pour le Grand Lac, GL :  $(v)_F^{GL} + (v)_M^{GL} = (v)_I^{GL} + (v)_E^{GL} + (v)_T + \Delta(v)_L^{GL}$ ;

— pour le Petit Lac, PL :  $(v)_F^{PL} + (v)_M^{PL} + (v)_T = (v)_I^{PL} + (v)_E^{PL} + (v)_D + \Delta(v)_L^{PL}$ .

$(v)_F$ ,  $(v)_F^{GL}$  et  $(v)_F^{PL}$  représentent dans l'ordre les apports fluviaux au lac au GL et au PL;  $(v)_M$ ,  $(v)_M^{GL}$  et  $(v)_M^{PL}$  les apports météoriques au lac, au GL et au PL;  $(v)_I$ ,  $(v)_I^{GL}$  et  $(v)_I^{PL}$  les pertes par infiltration dans le lac, le GL et le PL;  $(v)_E$ ,  $(v)_E^{GL}$  et  $(v)_E^{PL}$  les pertes par évaporation dans le lac, le GL et le PL;  $(v)_T$  le volume écoulé au détroit de Tiquina;  $(v)_D$  la perte par le Desaguadero  $\Delta(v)_L$ ,  $\Delta(v)_L^{GL}$  et  $\Delta(v)_L^{PL}$  la variation du volume du lac du GL et du PL.

#### 2.1.1. LES APPORTS FLUVIAUX

Sur la période envisagée, les volumes annuels moyens provenant des rios Ramis, Coata, Ilave, Huancané et Suhez (2) sont dans l'ordre de  $2,381 \times 10^9$ ,  $1,378 \times 10^9$ ,  $1,065 \times 10^9$ ,  $0,549 \times 10^9$  et  $0,236 \times 10^9$  m<sup>3</sup>. L'apport des rios secondaires est de  $2,805 \times 10^9$  m<sup>3</sup>; le GL en reçoit  $1,663 \times 10^9$  m<sup>3</sup>, le PL,  $1,140 \times 10^9$  m<sup>3</sup> (3). Les contributions des rios Ramis, Coata, Ilave, Huancané et Suhez sont dans l'ordre égales à 28,3, 16,4, 12,6, 6,5 et 2,8 %, celles des rivières secondaires au tiers restant.

(1) Les surfaces en eau sont respectivement égales à 7081 et 1375 km<sup>2</sup>.

(2) Pour Suhez il s'agit d'une valeur approchée puisque la moyenne ne repose que sur les années 1965, 1970, 1971 et 1972.

(3) Les apports fluviaux considérés dans les bilans hydriques du lac établis jusqu'à ce jour sont généralement plus faibles car la part relative aux rivières secondaires est sous-estimée.

En somme :  $(v)_F = 8,413 \times 10^9 \text{ m}^3$ ;  $(v)_F^{GL} = 7,271 \times 10^9 \text{ m}^3$ ;  $(v)_F^{PL} = 1,142 \times 10^9 \text{ m}^3$ .

### 2.1.2. LES APPORTS MÉTÉORIQUES

Les apports météoriques ont été évalués année par année, à la fois sur le GL et le PL de 1964 à 1978 (BOULANGÉ et AQUIZE, 1981), ce qui donne :

$$(v)_M = 7,87 \times 10^9 \text{ m}^3, (v)_M^{GL} = 6,73 \times 10^9 \text{ m}^3, \\ (v)_M^{PL} = 1,13 \times 10^9 \text{ m}^3$$

Les hauteurs d'eaux qui tombent dans le GL et dans le PL sont respectivement égales à 1110 mm/an et 826 mm/an. La pluviosité est fort différente d'une cuvette à l'autre. Le relief montagneux en est probablement la principale cause.

### 2.1.3. AUGMENTATION DU VOLUME DU LAC DE 1964 A 1978

Le niveau du plan d'eau de 1964 à 1978 s'est élevé de 0,30 m. Il s'en est suivi une augmentation du volume égale au produit de cette dénivellée par la surface en eau. Cette augmentation qui traduit un excédent des apports sur les pertes au cours de 14 années doit être exprimée en valeur moyenne annuelle.

On obtient :

$$\Delta (v)_L = 0,18 \times 10^9 \text{ m}^3; \Delta (v)_L^{GL} = 0,15 \times 10^9 \text{ m}^3; \\ \Delta (v)_L^{PL} = 0,03 \times 10^9 \text{ m}^3$$

### 2.1.4. LES PERTES PAR LE DESAGUADERO

Pour la période retenue, les pertes par le Desaguadero en moyenne annuelle,  $(v)_D$ , sont égales à  $0,217 \times 10^9 \text{ m}^3$ . Il s'agit bien de pertes « nettes » car, comme nous l'avons noté (§ 1.7) au cours de certaines années, le Desaguadero joue le rôle d'affluent du lac (1).

### 2.1.5. VOLUME D'EAU ANNUEL QUI S'ÉCOULE AU DÉTROIT DE TIQUINA

Il est possible d'établir le volume d'eau qui s'écoule du GL au PL par le détroit de Tiquina en établissant

les bilans hydriques du GL et du PL. Pour cela, on admet que les pertes par infiltration et par évaporation sont à peu près uniformément réparties sur l'ensemble du lac. Ces pertes sont déduites de l'équation du bilan général (aux résurgences près) :

$$(v)_I + (v)_E = (v)_R + (v)_M - (v)_D - \Delta (v)_L^E \\ = 15,88 \times 10^9 \text{ m}^3$$

Ces pertes représentent une lame d'eau de 1,88 m/an,

d'où pour GL :  $(v)_I^{GL} + (v)_E^{GL} = 13,31 \times 10^9 \text{ m}^3$ ;

pour PL :  $(v)_I^{PL} + (v)_E^{PL} = 2,57 \times 10^9 \text{ m}^3$ .

$(v)_T$  devient la seule inconnue dans les bilans du GL et du PL. A partir du premier, on obtient  $(v)_T = 0,548 \times 10^9 \text{ m}^3$ , à partir du second  $(v)_T = 0,482 \times 10^9 \text{ m}^3$ . Compte tenu de l'imprécision affectant les différents termes des deux bilans, la concordance est satisfaisante (2). Nous retiendrons la valeur moyenne  $(v)_T = 0,515 \times 10^9 \text{ m}^3$ .

### 2.1.6. ESTIMATION DES PERTES SÉPARÉES PAR INFILTRATION ET ÉVAPORATION

Les infiltrations peuvent être calculées d'après le bilan moyen de ce qui ne sédimente pas dans le milieu par un quelconque processus biogéochimique.

(a) au niveau du lac pris dans son ensemble

$$(Cl)_F = (Cl)_D + (Cl)_I + \Delta (Cl)^L$$

$(Cl)_F$  = apports fluviaux en Cl =  $12,69 \times 10^9 \text{ m}^3$  moles;  $(Cl)_D$  = pertes par le Desaguadero en Cl = en Cl =  $1,725 \times 10^9$  moles;  $\Delta (Cl)^L$  = variation de la réserve en Cl dans le lac =  $1,28 \times 10^9$  moles (cf. CARMOUZE *et al.*, 1981). D'où  $(Cl)_I = 9,68 \times 10^9$  moles. En admettant que la concentration moyenne en Cl des eaux qui s'infiltrent  $[Cl]_I$ , est proche de celle du lac,  $[Cl]_L$  (3), soit 7,11 moles/l, on en déduit le volume d'eau  $(v)_I$  qui s'infiltré :  $(v)_I = (Cl)_I / [Cl]_L = 1,362 \times 10^9 \text{ m}^3$ .

Par suite,  $(v)_E = 14,51 \times 10^9 \text{ m}^3$ , ce qui correspond à une hauteur d'eau qui s'évapore égale à 1,718 m/an (4).

(b) au niveau du Grand Lac

$$(Cl)^{GL} = (Cl)^T + (Cl)^{GL} + \Delta (Cl)^{GL}$$

(1) Jusqu'à ce jour les débits du Desaguadero ont été calculés sans tenir compte du sens des courants. Aussi, dans les bilans hydriques antérieurs les pertes en eau par le Desaguadero ont généralement été surestimées.

(2) Cette concordance tend à créditer les évaluations des différents termes du bilan. Il serait illusoire de leur attribuer un intervalle de confiance étant donné les incertitudes qui pèsent sur la qualité de certaines mesures.

(3) Le GL et le PL sont deux milieux remarquablement homogène quant à la composition chimique de leurs eaux.

(4) Notons que KESSLER (1970) puis RICHESON *et al.* (1977) ont estimé le taux annuel d'évaporation à partir de deux méthodes, l'une reposant sur le bilan thermique, l'autre sur le bilan hydrique du lac. Ces méthodes prises dans cet ordre, KESSLER obtient 1,714 et 1,480 m m/an, RICHESON 1,900 et 1,334 m m/an.



$(Cl)_F^{GL} =$  apports fluviaux en Cl au GL =  $11,22 \times 10^9$  moles;  $(Cl)_T =$  pertes en Cl pour le GL au passage de Tiquina =  $3,68 \times 10^9$  moles;  $\Delta(Cl)^{GL} =$  variation de la réserve en Cl dans GL =  $1,06 \times 10^9$  moles (cf. CARMOUZE *et al.*, 1981); d'où  $(Cl)_I^{GL} = 6,48 \times 10^9$  moles. On admet que la concentration des eaux qui s'infiltrent  $[Cl]_I^{GL}$  est égale à celle du GL,  $[Cl]^{GL}$ , soit 7,10 m moles/l. D'où le volume d'eau qui s'infiltré :  $(v)_I^{GL} = (Cl)_I^{GL}/[Cl]^{GL} = 0,915 \times 10^9$  m<sup>3</sup>.

Par suite,  $(v)_B^{GL} = 12,40 \times 10^9$  m<sup>3</sup>, ce qui équivaut à une hauteur d'eau d'évaporation de 1,74 m/an.

(c) au niveau du Petit Lac

$$(Cl)_T + (Cl)_F^{PL} = (Cl)_D + (Cl)_I^{PL} + \Delta(Cl)^{PL}$$

$(Cl)_F^{PL} =$  apports fluviaux en Cl au PL =  $1,46 \times 10^9$  moles;  $(Cl)_D =$  pertes en Cl le Desaguadero =  $1,725 \times 10^9$  moles;  $\Delta(Cl)^{PL} =$  variation de la réserve en Cl dans PL =  $0,22 \times 10^9$  moles (cf. CARMOUZE *et al.*, 1981); d'où  $(Cl)_I^{PL} = 3,18 \times 10^9$  moles. On suppose que la concentration des eaux qui s'infiltrent  $[Cl]_I^{PL}$  est égale à celle du PL,  $[Cl]^{PL}$ , soit 7,60m moles/l. On en déduit le volume d'eau qui s'infiltré :  $(v)_I^{PL} = (Cl)_I^{PL}/[Cl]^{PL} = 0,42 \times 10^9$  m<sup>3</sup> (1).

Il s'ensuit :  $(v)_B^{PL} = 2,15 \times 10^9$  m<sup>3</sup>; cela représente une hauteur d'eau qui s'évapore égale à 1,57 m/an (2).

2.1.7. LE RENOUELEMENT DES EAUX DANS LE LAC

L'importance des échanges d'eau au niveau du lac par rapport à son volume peut être exprimée par deux paramètres :

— le taux moyen annuel de renouvellement des eaux lacustres;  $R_{eau}$  :

$$R_{eau} = \frac{\text{apports moyens annuels (ou pertes) en eau du lac}}{\text{volume moyen du lac}}$$

— le temps de résidence moyen des eaux dans le lac,  $T_{eau}$  :

$$T_{eau} = \frac{1}{R_{eau}}$$

Les pertes ou apports moyens annuels en eaux au lac sont de l'ordre de  $16,20 \times 10^9$  m<sup>3</sup> (3) le volume du lac est de  $896 \times 10^9$  m<sup>3</sup>,

d'où  $R_{eau} = 1,80 \%$ ;  $T_{eau} = 55,5$  ans.

Pour le GL, les pertes ou apports moyens annuels en eau sont de l'ordre de  $13,90 \times 10^9$  m<sup>3</sup>; le volume de GL est de  $883,5 \times 10^9$  m<sup>3</sup>, d'où :

$$R_{eau}^{GL} = 1,55 \%; T_{eau}^{GL} = 63,5 \text{ ans}$$

Pour le PL, les pertes ou apports moyens annuels en eau sont de l'ordre de  $2,80 \times 10^9$  m<sup>3</sup>; le volume de PL est de  $12,35 \times 10^9$  m<sup>3</sup>, d'où :

$$R_{eau}^{PL} = 22,5 \%; T_{eau}^{PL} = 4,4 \text{ ans}$$

2.1.8. ÉQUILIBRE HYDRIQUE MOYEN DU LAC, DU GRAND LAC ET DU PETIT LAC

L'écoulement moyen annuel des eaux à travets le lac pris dans son ensemble pour la période 1964-1978 est illustré par la figure 6.

Il présente trois principales particularités :

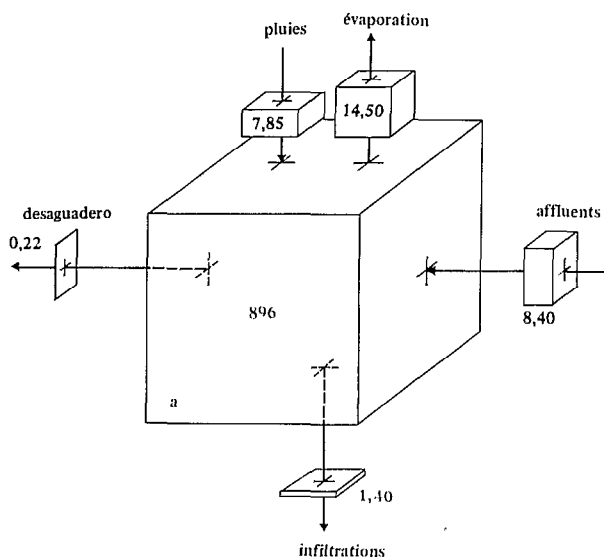


FIG. 6. — La régulation hydrique du lac Titicaca pris dans son ensemble (les volumes sont exprimés en 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>)

(1) Notons que le volume des infiltrations dans GL et PL représente  $1,38 \times 10^9$  m<sup>3</sup>, soit une valeur très proche de celle trouvée pour le lac pris dans son ensemble. Cela signifie que l'hypothèse selon laquelle les pertes des eaux par évaporation et infiltration sont uniformes dans l'ensemble du lac est acceptable.

(2) D'après les hauteurs d'eau évaluées l'évaporation serait 12,5 % plus forte dans PL. Cet écart paraît élevé. Il peut s'expliquer en partie par le fait que l'évaporation est plus forte dans GL que PL grâce au fait que les vents dominants chassent du GL en direction du PL des masses d'air enrichies en vapeur d'eau au niveau du GL. Toutefois cet écart doit également s'expliquer par le fait que les apports par nappes sont probablement en valeur relative par rapport aux autres transferts d'eau mis en jeu (voire en valeur absolue) nettement plus importants dans PL que dans GL. Les resurgences attribuées au PL sont de l'ordre de  $0,15 \times 10^9$  m<sup>3</sup> (WALGENWITZ F., comm. pers.). En tenant compte de cette valeur la hauteur d'eau évaporée dans PL deviendrait égale à 1,64 m/an.

(3) Les pertes moyennes annuelles sont légèrement différentes des apports moyens annuels pour la période 1964-79. On prend ici des valeurs intermédiaires.

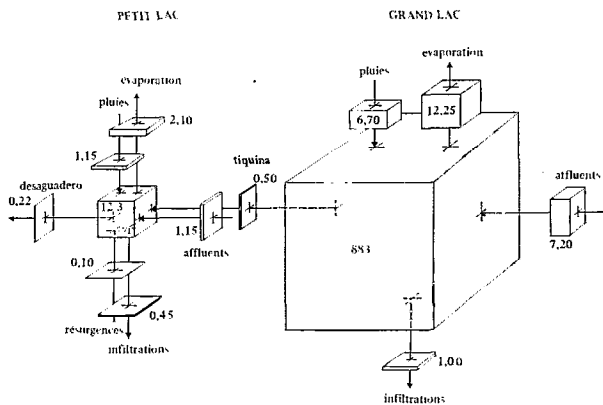


FIG. 7. — La régulation hydrique du Grand Lac et du Petit Lac (les volumes sont exprimés en  $10^9$  m<sup>3</sup>)

— le renouvellement annuel des eaux lacustres est très faible : 1,8 %;

— les apports météoriques sont du même ordre de grandeur que les apports fluviaux;

— les pertes par évaporation sont prédominantes. Il s'ensuit que le lac fonctionne presque en système fermé. Les pertes par le Desaguadero ne représentent que 1,34 % des pertes totales.

Toutefois cet écoulement est fort différent, selon que l'on considère le Grand Lac ou le Petit Lac (fig. 7) ;

— le renouvellement des eaux lacustres est nettement plus élevé dans le Petit Lac que dans le Grand Lac (22,6 % contre 1,55 %) : il s'agit donc d'un milieu beaucoup plus ouvert;

-- un tiers des apports fluviaux-lacustres au Petit Lac proviennent du Grand Lac;

— 13 % des apports totaux au Petit Lac seront évacués par le Desaguadero tandis que 4 % des apports totaux au Grand Lac s'écoulent à travers le détroit de Tiquina. Le Grand Lac se présente donc comme un système plus fermé que le Petit Lac.

## 2.2. Les variations saisonnières et annuelles du volume du lac

### 2.2.1. LES VARIATIONS SAISONNIÈRES DU VOLUME DU LAC

Le niveau du plan d'eau est marqué par des fluctuations saisonnières qui sont de l'ordre de 0,60 à 0,80 m (fig. 8; cf. annexe). Le maximum de crue du lac a lieu au mois d'avril, le plus fréquemment aux alentours du 15, le minimum a lieu en décembre, le plus souvent aussi vers le milieu du mois.

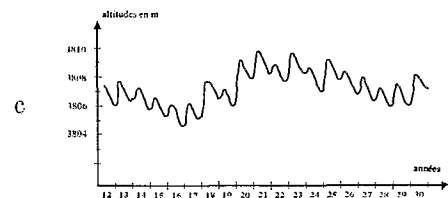
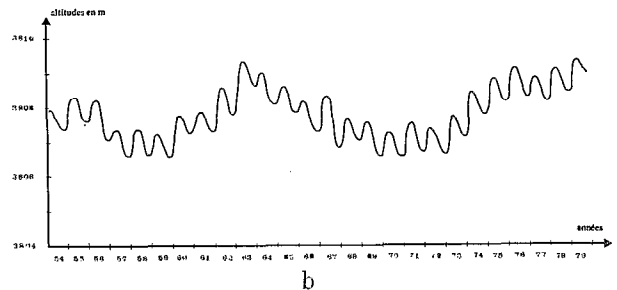
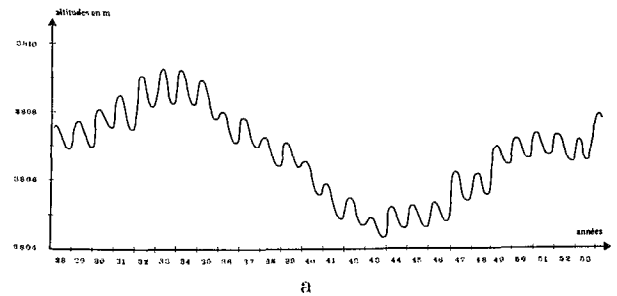


FIG. 8. — Niveaux du lac Titicaca à Puno (Pérou), (a) période 1912-1930, (b) période 1928-1953, (c) période 1954-1979

Ces fluctuations sont dues aux déséquilibres saisonniers des apports et des pertes en eau. Elles sont relativement importantes pour deux raisons :

— les apports en eau comme dans tout milieu tropical sont saisonniers. Les régimes des rivières sont apparentés à des régimes tropicaux. Par ailleurs l'essentiel des apports météoriques au lac a lieu au cours d'une seule saison des pluies, de décembre à mars (BOULANGÉ et AQUIZE, 1981);

— les pertes, au contraire, sont réparties de façon beaucoup plus uniforme au cours de l'année car elles sont à 90 % assurées par l'évaporation qui varie en de moindres proportions d'une saison à l'autre.

Le lac reçoit de décembre à mai 73,5 % des apports fluviaux annuels et 72 % des apports météoriques annuels, soit 72,8 % des apports annuels totaux (tableau V).

Les conséquences de cette alimentation par à-coups peuvent être prévues au moyen d'un calcul simple :

Du 15 décembre au 15 avril le lac reçoit en moyenne

TABLEAU V  
Précipitations et apports fluviaux moyens mensuels exprimés en  $m^3 \times 10^9$

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Pluies mensuelles sur le lac.....	0,37	0,385	0,566	1,164	1,723	1,613	1,157	0,425	0,204	0,047	0,071	0,142A
Apports mensuels des rivières secondaires.....	0,132	0,137	0,202	0,415	0,614	0,575	0,412	0,15	0,073	0,016	0,025	0,05
Apports mensuels des rivières principales.....	0,0725	0,0785	0,1015	0,8312	0,957	1,453	1,403	0,612	0,269	0,1429	0,1058	0,078
Apports mensuels totaux.....	0,574	0,60	0,87	1,89	3,30	3,64	2,97	1,187	0,546	0,159	0,202	0,27

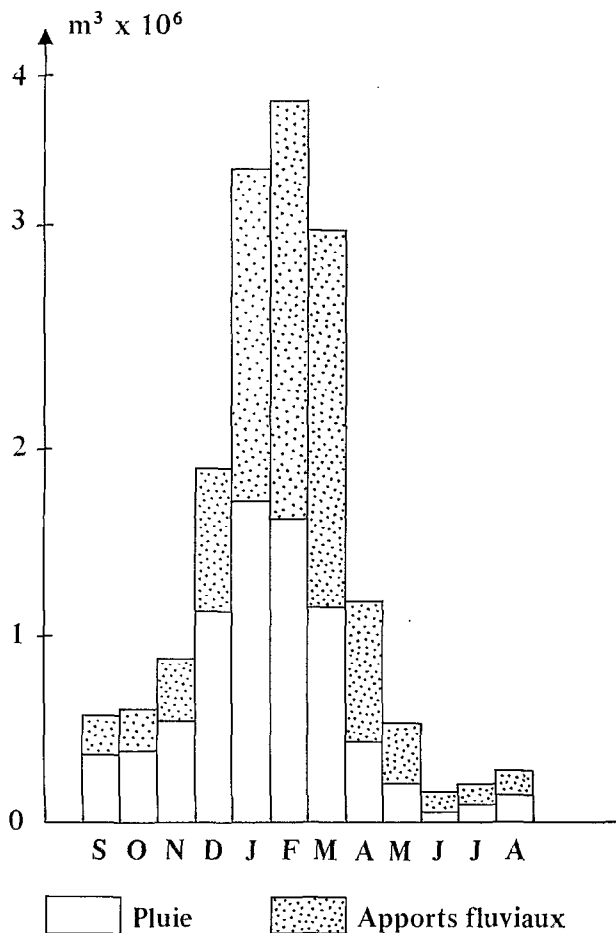


Fig. 9. — Apports moyens mensuels au Lac en eaux de pluies et de rivières

$11,4 \times 10^9 m^3$  d'eau. Si les apports étaient distribués uniformément sur l'ensemble de l'année, il ne recevrait au cours de cette période que  $5,4 \times 10^9 m^3$ . Il reçoit donc un excédent de  $6,05 \times 10^9 m^3$ . Or, au

cours de cette période le plan d'eau s'élève en moyenne de 70 cm, ce qui représente un accroissement de volume  $\Delta(v)_L = 5,9 \times 10^9 m^3$ .

Ainsi, on constate que la fluctuation saisonnière du niveau du plan d'eau s'explique en grande partie par l'irrégularité des apports puisque  $\Delta(v)_L$  est voisin de l'excédent saisonnier des apports. Ce calcul confirme indirectement que les pertes sont à peu près uniformément réparties au cours de l'année.

De toute façon ces fluctuations du volume sont très faibles comparées au volume moyen du lac. Elles représentent 0,6 % du volume du lac pris dans son ensemble.

Pour le Grand Lac, elles représentent  $4,95 \times 10^9 m^3$  soit 0,56 % de son volume; pour le Petit Lac  $0,956 \times 10^9 m^3$ , soit 7,7 % de son volume.

2.2.2. LES VARIATIONS INTERANNUELLES DU VOLUME DU LAC

Les variations interannuelles traduisent les déséquilibres entre les apports et les pertes à l'échelle annuelle. Les données dont nous disposons depuis 1912 concernent une période trop courte pour tenter de dégager une périodicité dans les crues et décrues annuelles du lac. Notons que depuis le début du siècle le lac a subi :

— deux décrues sévères en 1916-17 et 1943-44 et deux décrues de moindre importance en 1957-58 et 1969-71;

— cinq crues en 1921-23, en 1933-35, en 1955, en 1964 et en 1978-79.

La variation maximale interannuelle du niveau d'eau a été enregistrée au cours de la décrue de 1933-34 à 1943-44 : le plan d'eau a chuté de 5 m en 10 ans.

Ces variations proviennent de l'alternance de périodes humides et de périodes sèches. Par un calcul approché on peut en grande partie expliquer la

décru de 1964-65 à 1970-71 par le déficit des apports en eau relativement à leur régime moyen sur la même période. Un calcul analogue peut être fait sur la crue de 1971-72.

(a) *Décru de 1964-71*

Au cours des 7 années en question, les apports moyens annuels au lac ont été les suivants : fleuves principaux :  $4,45 \times 10^9$  m<sup>3</sup>; fleuves secondaires :  $2,37 \times 10^9$  m<sup>3</sup>; pluies :  $6,80 \times 10^9$  m<sup>3</sup>, ce qui correspond à un déficit par rapport aux apports moyens égal à  $18 \times 10^9$  m<sup>3</sup>.

Ce déficit est aggravé par le fait que l'écoulement par le Desaguadero a été supérieur de  $1 \times 10^9$  m<sup>3</sup> par rapport à l'écoulement moyen sur ces 7 ans. Ainsi par le seul jeu des déficits des apports fluviaux et météoriques, le volume du lac aurait dû diminuer de  $19 \times 10^9$  m<sup>3</sup>. En fait la baisse du niveau du plan d'eau qui est de 2,15 m correspond à une diminution de volume de  $18,15 \times 10^9$  m<sup>3</sup>. Aux erreurs près d'estimation sur les différents termes entrant dans le calcul, on constate une bonne concordance entre le déficit des apports et la baisse consécutive du lac.

(b) *Crue de 1972 à 1978*

Au cours de la période envisagée, les apports moyens annuels au lac ont été les suivants : fleuves principaux :  $6,30 \times 10^9$  m<sup>3</sup>; fleuves secondaires :  $3,20 \times 10^9$  m<sup>3</sup>; pluies :  $8,95 \times 10^9$  m<sup>3</sup>. L'excédent des apports par rapport à un régime moyen des apports est égal à  $15,75 \times 10^9$  m<sup>3</sup>.

Cet excédent a été accentué par le fait que l'écoulement par le Desaguadero a été inférieur à  $1 \times 10^9$  m<sup>3</sup> par rapport à l'écoulement moyen de cet affluent. Ainsi en fonction de ces considérations, le volume du lac aurait dû augmenter de  $16,75 \times 10^9$  m<sup>3</sup>. En réalité, l'élévation du plan d'eau a été de 2,0 m ce qui équivaut à une hausse de volume de  $17,3 \times 10^9$  m<sup>3</sup>. On constate à nouveau une bonne concordance entre l'excédent des apports et la crue du lac qui en résulte.

Les fluctuations inter-annuelles du plan d'eau ont une amplitude maximale de  $\pm 2,5$  m autour du niveau moyen, ce qui provoque des variations relativement importantes de la surface du lac. Mais nous ne pouvons actuellement les évaluer par manque de données précises. En revanche, les fluctuations de volumes restent faibles comparées au volume du lac : elles en représentent  $\pm 2,25$  %.

Toutefois, si le Grand Lac est bien un milieu stable en volume par rapport à ces fluctuations (elles ne dépassent pas  $\pm 2$  % de son volume moyen), il n'en est pas de même pour le Petit Lac pour lequel les mêmes modifications du plan d'eau entraînent des variations de volume égales à  $\pm 27,5$  % du

volume moyen : c'est un milieu beaucoup plus instable.

## CONCLUSION

Le régime hydrologique des tributaires du lac Titicaca est avant tout conditionné par la situation en zone tropicale du bassin versant et par son altitude élevée. On retrouve, en effet au niveau des rivières l'instabilité climatique caractéristique des milieux tropicaux. Celle-ci se traduit par des modules qui, pour une rivière donnée, peuvent varier du simple au triple d'une année à l'autre. Le régime saisonnier est apparenté au régime tropical avec une époque de hautes eaux en février-mars et une époque d'étiage bien marquée de juillet à octobre : en général, plus de la moitié du volume annuel de chaque rivière s'écoule en deux mois. Toutefois pour certaines d'entre elles (le Ramis, le Suchez), les glaciers jouent un rôle régulateur et atténuent ce caractère.

Au niveau de la régulation hydrique, à ce caractère tropical des apports fluviaux, s'ajoute celui des autres paramètres dépendant du climat. Le taux d'évaporation est élevé (1,72 m/an). Celle-ci est néanmoins atténuée en raison de l'altitude (les températures de l'air sont 15 °C plus basses en moyenne que celles d'un milieu situé à la même latitude au niveau de la mer; or le déficit hygrométrique diminue avec la température pour une même tension de vapeur d'eau). Les pluies qui représentent un volume sensiblement égal à celui des apports fluviaux, sont comme ces derniers, très variables d'une année à l'autre et tombent de décembre à mars. Elles renforcent le caractère d'irrégularité annuelle et saisonnière des apports fluviaux.

Ces variations sont très mal amorties dans le lac, car le Desaguadero joue un rôle très modeste : son écoulement représente 1,5 % des pertes totales en eau. Celles-ci sont assurées à 90 % par l'évaporation. Or le taux d'évaporation varie peu d'une année à l'autre ou d'une saison à l'autre pour permettre de réajuster les irrégularités des apports. Cela explique les fortes variations du plan d'eau qui sont de  $\pm 2,5$  m à l'échelle annuelle de  $\pm 35$  cm à l'échelle saisonnière. Toutefois ces fluctuations mettent en cause un volume d'eau qui reste faible au regard du volume du lac, du moins en ce qui concerne le Grand Lac : une dénivelée de  $\pm 2,5$  m représente 2,35 % de son volume moyen. Il s'agit donc d'un milieu très stable. Au contraire pour le Petit Lac, cette dénivelée entraîne une variation du volume égale à  $\pm 27,5$  % de son volume moyen, ce qui en fait un milieu peu stable.

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

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAZCERRY (Q.), 1968. — Balance hidrico del Lago Titicaca. Informe interno de la dirección de irrigación. Ministerio de Fomento. Lima.
- BOULANGE (B.) et AQUIZE (J.), 1981. — Morphologie hydrographie et climatologie du lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14 (4) : 66-77.
- CARMOUZE (J.-P.), ARCE (C.) et QUINTANILLA (J.), 1977. — La régulation hydrique des lacs Titicaca et Poopó. *Cahier O.R.S.T.O.M., sér. Hydrobiol.*, vol. XI, n° 4 : 269-283.
- CARMOUZE (J.-P.), ARCE (C.) et QUINTANILLA (J.), 1981. — La régulation hydrochimique du lac Titicaca et l'hydrochimie de ses tributaires. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14 (4) : 329-348.
- CHURATA SALLUCA (J.) et MAMANI HUANGA (L. A.), 1977. — Hidrología de la cuenca del rio Ramis. Tesis Ing. Agronom. UNTA, Puno (Pérou), 173 p.
- KESSLER (A.), 1970. — Über dem paliresgang der potentiellen Verdunstung in Titicacabecken. *Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B.* n° 18.239-252.
- MONHEIM (F.), 1956. — Beiträge zur klimatologie und hydrologie des Titicacabeckens Selbstvel. d. Geographi. Int. de Univ. Heidelberg, 152 p.
- QUISPE ZAPARA (L. L.) et AMANQUI AMANQUI (A. A.), 1978. — Caracterización hidrologica de la cuenca del rio Coata. Tesis Ing. Agronom. UNTA, Puno (Pérou), 143 p.
- RICHERSON (P. J.), WIDMER (C.) and KITTEL (T.), 1977. — The Limnology of Lake Titicaca (Peru-Bolivia). Institute of Ecology Publication n° 14. University of California. Davis.
- TEJADA CARI (A.), 1977. — Caracterización hidrologica de la cuenca del rio Ilave. Tesis Ing. Agronom. UNTA, Puno (Pérou), 104 p.

## ANNEXE. — Données brutes d'hydrologie

TABLEAU I

Volumes écoulés moyens mensuels et annuels du Rio Ramis en  $m^3 \times 10^6$  données du Service National d'Hydrologie et de Météorologie de Puño (Pérou)

	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	total annuel
56-57	15.81	58.12	32.66	25.71	92.4	386.59	270.79	211.51	105.53	57.54	39.37	32.40	1328.43
57-58	26.44	26.25	27.21	121.33	622.99	767.61	732.54	230.17	141.95	83.46	44.99	36.55	2861.49
58-59	31.62	31.87	49.76	109.55	164.99	356.35	798.43	475.37	222.31	155.78	132.58	91.76	2420.37
59-60	71.54	64.55	49.51	188.02	1007.08	839.46	300.78	284.34	176.24	70.50	55.17	38.62	3145.81
60-61	37.06	80.89	108.08	175.70	256.86	438.60	632.64	362.10	184.27	90.20	49.01	36.03	2451.44
61-62	35.76	35.62	76.46	313.64	551.48	560.04	996.63	411.87	178.38	101.05	64.82	42.25	3368.04
62-63	36.80	40.71	43.54	342.30	783.16	732.77	689.15	232.40	242.13	93.05	64.92	52.88	3353.81
63-64	48.21	58.12	53.21	203.02	213.74	299.01	487.20	305.34	140.88	53.91	45.80	40.18	1949.32
64-65	32.92	26.51	29.03	91.60	312.97	562.70	732.01	369.36	141.69	61.95	50.89	39.40	2450.63
65-66	31.88	28.66	41.73	151.60	227.13	376.91	371.49	117.79	64.28	45.62	33.48	24.62	1515.19
66-67	17.36	34.82	67.65	216.41	130.97	171.76	462.02	134.00	62.14	30.58	25.71	21.51	1374.93
67-68	20.74	34.82	31.36	145.70	218.29	547.71	404.97	152.41	72.58	49.25	35.35	22.03	1735.21
68-69	18.66	30.55	99.27	137.67	247.75	299.98	155.88	140.48	51.69	38.88	39.37	36.29	1296.47
69-70	35.77	35.35	16.85	51.96	251.77	661.0	676.83	502.59	145.97	53.39	30.26	19.96	2481.7
70-71	27.73	22.23	15.55	166.6	417.03	1045.09	726.11	159.15	85.44	51.58	37.76	28.51	2782.78
71-72	22.03	18.75	26.96	38.57	427.74	480.73	433.9	306.89	103.92	52.62	39.91	25.14	1977.18
72-73	20.22	24.10	26.44	98.56	400.42	608.67	732.27	462.15	169.81	73.35	50.62	37.32	2703.93
73-74	31.62	59.99	37.84	53.84	452.91	927.28	858.69	368.06	131.24	66.87	52.23	36.80	3077.37
74-75	38.10	44.46	37.84	85.71	267.04	768.58	740.31	479.52	194.99	94.35	71.24	45.10	2867.24
75-76	31.36	39.64	44.06	140.62	577.73	583.75	645.49	208.66	72.58	52.88	40.71	29.03	2466.51
76-77	34.42	30.64	23.02	49.87	172.99	246.20	826.87	306.76	69.74	34.60	25.63	15.55	1836.29
77-78	12.49	19.16	69.31	107.67	666.39	741.16	613.97	351.47	138.37	56.30	32.46	19.10	2827.85
78-79													
Moyenne mensuelle	30.84	38.44	45.82	137.07	384.7	563.72	604.04	298.74	131.64	66.71	48.20	35.04	

ANNEXE (suite)

TABLEAU II

Volumes écoulés moyens mensuels et annuels du Rio Coata en  $m^3 \times 10^6$  — données du Service National d'Hydrologie et de Météorologie de Puño (Pérou)

	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	total annuel
56-57	6.288	6.749	10.816	10.212	13.158	30.360	24.175	19.730	14.511	11.832	10.193	6.385	164.409
57-58	3.895	2.691	2.156	4.665	17.313	89.268	171.278	15.850	12.872	11.819	11.622	10.526	353.955
58-59	3.711	5.651	6.384	14.506	32.580	83.670	369.254	146.463	31.267	9.437	8.889	6.987	718.799
59-60	5.225	3.736	2.462	142.223	463.491	344.09	101.149	98.858	43.215	25.920	17.465	8.163	1046.666
60-61	11.174	8.276	73.516	84.524	207.707	378.309	589.947	232.489	97.614	40.471	22.608	17.728	1764.36
61-62	16.415	15.299	45.818	276.834	540.388	536.844	479.535	189.594	83.989	44.546	31.361	16.415	2277.03
62-63	20.129	16.083	10.458	130.515	405.413	605.24	633.379	261.163	119.204	53.874	39.230	30.429	2325.22
63-64	23.976	47.212	38.219	160.76	81.910	145.539	190.964	92.005	52.665	32.104	22.134	17.712	905.20
64-65	7.368	6.460	10.523	20.671	59.607	146.289	230.237	84.265	39.075	16.575	10.925	7.518	639.51
65-66	4.432	4.713	4.336	50.833	71.098	90.209	141.893	46.586	18.797	12.568	8.265	5.683	459.41
66-67	3.608	5.546	15.733	48.125	26.575	72.493	404.127	77.192	26.727	14.585	10.585	5.519	710.81
67-68	5.757	13.341	5.290	38.368	123.509	382.982	244.666	79.929	35.397	18.836	11.318	4.679	974.06
68-69	4.351	4.794	46.466	59.404	157.516	194.312	70.827	61.508	20.417	10.728	4.663	3.350	638.336
69-70	2.213	4.663	4.416	30.464	146.050	538.228	426.773	159.33	57.671	21.352	11.758	8.332	1411.248
70-71	5.204	4.333	3.846	50.455	173.257	929.318	442.152	100.103	43.716	20.930	10.930	7.571	1791.815
71-72	4.618	3.768	4.462	49.119	469.100	194.796	265.670	220.986	62.813	39.276	9.122	7.194	1330.89
72-73	4.022	3.147	11.762	101.966	354.411	516.808	477.842	212.02	93.379	36.567	24.113	7.978	1844.01
73-74	9.523	14.682	6.967	41.783	473.857	741.390	369.354	182.284	89.401	45.463	32.242	34.031	2041.23
74-75	32.179	16.381	13.934	13.866	331.749	742.788	585.466	~ 200	~ 90	~ 45	~ 35	~ 30	~2136.36
75-76	~20.7	~ 16.07	~ 15.55	140.053	535.733	393.528	502.708	217.852	73.133	51.334	25.064	15.140	2006.86
76-77	~20.7	43.805	11.604	7.775	118.122	168.956	679.379	242.644	67.412	26.389	13.839	6.004	1406.63
77-78	53.758	3.982	12.687	17.998	582.302	391.939	405.330	246.369	120.769	52.196	17.838	5.825	1910.95
78-79	4.043	3.240	3.781	65.679									
Moyenne mensuelle	11.929	11.070	15.703	67.860	244.765	350.788	354.83	144.871	58.820	29.172	17.689	11.96	

## ANNEXE (suite)

TABLEAU III

Volumes écoulés moyens mensuels et annuels du Rio Ilave en  $m^3 \times 10^6$  — données du Service National d'Hydrologie et de Météorologie de Puño (Pérou)

	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Total annuel
57-58	12.825	10.896	9.266	31.640	167.534	225.079	353.787	79.642	30.922	5.422	17.278	14.256	958.54
58-59	11.275	14.798	12.097	17.493	20.693	69.058	339.458	90.435	34.053	22.495	19.384	16.288	667.52
59-60	16.71	10.023	6.869	74.572	389.455	189.856	56.986	46.339	28.512	20.028	18.706	15.342	873.39
60-61	18.696	18.446	22.239	32.875	179.022	215.425	151.498	63.522	37.101	20.816	17.546	15.422	792.61
61-62	16.200	15.869	30.689	165.123	531.619	457.877	344.555	128.778	42.474	31.967	29.653	22.174	1816.97
62-63	22.978	17.849	11.853	62.176	389.482	955.419	630.201	192.386	80.256	48.862	37.246	29.02	2477.73
63-64	32.77	30.767	20.308	69.223	62.442	80.046	142.788	59.333	36.271	28.338	23.224	21.392	606.21
64-65	21.192	17.436	17.452	22.504	45.436	98.979	78.132	39.417	21.703	17.869	19.017	16.444	415.58
65-66	20.251	13.521	11.607	37.548	31.570	57.265	76.083	22.462	23.144	16.060	15.189	12.325	337.03
66-67	10.453	13.598	20.938	33.764	25.798	126.705	428.606	81.267	28.525	17.843	17.624	14.360	819.48
67-68	13.548	14.38	8.195	31.069	129.184	371.306	376.704	89.165	45.549	30.897	59.919	17.099	1187.02
68-69	15.355	17.618	99.227	77.250	205.605	244.593	98.305	49.059	23.259	19.549	20.463	18.971	889.25
69-70	15.067	12.27	14.627	34.709	132.364	298.512	302.407	89.597	40.634	21.516	18.371	16.278	996.35
70-71	12.392	11.895	8.097	51.811	108.068	603.019	309.259	70.165	27.906	21.428	19.244	15.485	1258.77
71-72	10.883	8.930	14.113	38.001	435.119	451.021	443.664	138.361	41.999	25.793	17.817	12.418	1638.12
72-73	12.931	12.554	12.856	56.571	227.431	434.072	413.647	109.96	44.577	21.721	19.927	17.120	1385.37
73-74	4.147	4.178	3.214	3.107	17.115	532.345	123.742	52.164	29.529	14.969	16.874	13.997	815.38
74-75	23.369	13.432	11.635	15.229	114.349	558.695	400.956	78.356	44.981	27.952	25.753	19.787	1334.49
75-76	18.587	18.489	15.50	99.987	666.19	446.679	270.534	100.795	50.442	30.028	25.370	23.058	1765.66
76-77	28.771	16.978	10.676	16.560	57.178	242.786	272.286	79.935	35.076	23.439	20.958	17.770	822.41
77-78	18.333	16.633	55.134	37.106	492.949	302.020	146.442	89.481	30.231	24.914	23.339	19.455	1256.03
78-79	17.654	19.094	27.286										
Moyenne mensuelle	17.017	14.984	20.176	48.110	210.886	331.465	274.286	83.363	37.007	23.200	22.995	17.545	



## ANNEXE (suite)

TABLEAU IV

Volumes écoulés moyens mensuels et annuels du Rio Huancane en  $m^3 \times 10^6$ , données du Service National d'Hydrologie et de Météorologie de Puño (Pérou)

	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	total annuel
55-56					28.366	59.708	5.895	13.384	8.064	5.166	4.641	3.457	
56-57	3.157	3.048	5.43	7.96	22.731	116.44	61.40	33.34	25.409	11.508	9.623	5.876	305.92
57-58	5.52	6.27	8.219	38.598	159.59	164.464	102.20	29.188	20.554	11.378	11.968	9.995	568.64
58-59	8.504	9.09	13.04	16.319	33.415	75.237	182.632	90.00	32.015	13.493	8.817	7.180	489.74
59-60	4.463	5.23	5.181	21.223	225.178	178.856	67.423	61.472	29.237	12.972	9.428	6.947	627.61
60-61	8.854	9.819	21.48	32.108	60.175	124.303	129.805	70.147	35.821	14.958	10.242	7.507	525.22
61-62	6.324	4.925	6.259	45.69	167.79	129.248	268.756	85.971	35.729	14.911	10.322	6.931	782.85
62-63	10.80	8.217	12.216	93.18	232.66	236.068	126.28	105.898	37.781	19.699	13.943	9.235	905.98
63-64	10.69	12.888	10.03	21.044	49.381	126.427	177.72	75.414	26.320	14.416	9.422	7.188	540.94
64-65	5.169	4.928	4.476	14.87	126.246	177.895	177.877	76.181	21.223	11.039	8.359	6.484	634.74
65-66	5.852	4.823	6.628	44.56	92.241	148.49	127.134	31.00	24.724	12.459	9.371	6.506	513.79
66-67	4.321	5.777	7.376	21.60	11.02	33.542	92.327	14.199	7.917	4.593	5.983	4.604	213.26
67-68	5.352	9.65	2.210	50.538	31.33	120.195	83.67	37.628	18.266	9.673	8.179	4.984	381.67
68-68	5.368	5.643	2.540	26.095	103.96	109.391	46.644	38.436	12.168	7.22	7.293	6.01	370.77
69-70	5.02	2.035	4.818	6.219	52.576	208.06	142.766	126.938	30.188	9.67	6.851	4.984	600.12
70-71	7.879	4.864	3.491	62.56	145.126	487.761	214.496	30.186	15.06	9.766	8.293	6.273	995.75
71-72	4.484	4.451	8.80	8.163	91.116	114.111	73.527	43.04	16.204	10.99	8.999	6.489	390.37
72-73	6.469	4.36	20.45	44.35	123.233	137.817	143.50	101.056	35.585	11.373	11.849	11.027	651.07
73-74	10.55	12.59	11.697	18.829	161.274	229.693	179.936	62.962	21.861	13.457	10.67	11.378	744.90
74-75	11.516	10.66	10.98	19.857	55.049	230.02	172.266	62.482	20.00	12.96	14.20	9.128	629.12
75-76	7.143	48.77	12.338	43.047	187.55	139.16	106.892	30.59	17.17	12.856	8.477	6.874	620.87
76-77	14.626	6.822	3.75	7.049	32.25	93.076	182.682	57.739	14.21	9.349	8.742	4.974	435.27
77-78	3.871	3.10	3.346	15.473	64.50	175.805	114.962	75.51	31.297	10.37	9.361	5.638	513.14
78-79	4.245	3.048	19.582	125.02									
Moyenne mensuelle	6.960	8.304	8.884	34.102	98.119	157.207	129.63	58.815	23.339	11.490	9.349	6.942	

## ANNEXE (suite)

TABLEAU V

Niveaux du lac Titicaca à Puño : valeurs annuelles maximales et minimales et dates d'enregistrement (Données du Service National d'Hydrologie et de Météorologie de Puño (Pérou))

Années	Niveaux maxim.	Niveaux minim.	Années	Niveaux maxim.	Niveaux minim.
1928	- 40.95 (21.4.28)	- 110.5 (9.12.28)	1954	- 1.905 (19.3.54)	- 60.32 (24.12.54)
29	- 36.99 (21.4.28)	- 105.1 (11.12.29)	55	+ 36.19 (25.4.55)	- 38.1 (14.12.55)
30	+ 3.81 (3.4.29)	- 48.26 (1.1.30)	56	+ 20.32 (20.2.56)	- 94.61 (18.12.56)
31	+ 45.08 (24.3.31)	- 51.43 (15.12.31)	57	- 64.13 (16.1.57)	- 140.97 (19.12.57)
32	+ 101.8 (10.4.32)	+ 15.55 (21.12.31)	58	- 62.86 (7.4.58)	- 140.97 (20.12.58)
33	+ 124.46 (21.4.33)	+ 21.59 (1.1.34)	59	- 77.47 (20.4.59)	- 147.32 (16.12.59)
34	+ 118.74 (2.9-4.36)	+ 20.32 (22.12.34)	60	- 23.49 (7.4.60)	- 75.56 (17.11.60)
35	+ 83.50 (4.4.35)	- 23.49 (16.20-12.35)	61	- 14.60 (25.5.61)	- 68.58 (11.12.61)
36	- 1.27 (9.3.36)	- 94.93 (18.12.36)	62	+ 57.15 (21.4.62)	- 24.13 (14.12.62)
37	- 15.87 (20.3.37)	- 105.41 (15.12.37)	63	+ 134.62 (27.4.63)	+ 59.59 (6.12.63)
38	- 78.74 (17.4.38)	- 163.83 (3.1.39)	64	+ 101.6 (1.5.64)	+ 10.16 (31.12.64)
39	- 90.80 (26.3.39)	- 162.24 (2.12.39)	65	+ 59.04 (11.4.65)	- 18.415 (4.12.65)
40	- 148.9 (29.1.40)	248.9 (30.11.40)	66	13.33 (2.4.66)	- 73.02 (8.12.66)
41	- 212.7 (24.2.41)	- 294.64 (30.11.41)	67	34.29 (8.4.67)	- 113.66 (15.12.67)
42	- 255.9 (18.4.42)	- 334.64 (14.12.42)	68	- 35.56 (20.4.68)	- 97.79 (31.12.68)
43	- 310.51 (27.4.43)	- 371.47 (9.12.43)	69	- 45.08 (19.4.69)	- 142.24 (31.12.69)
44	- 282.57 (16.4.44)	- 347.34 (18.12.44)	70	- 74.29 (11.4.70)	- 147.95 (14.12.70)
45	- 274.95 (17.4.45)	- 342.9 (16.12.45)	71	- 49.53 (4.4.71)	- 133.35 (30.12.71)
46	- 269.87 (7.4.46)	- 324.48 (16.12.46)	72	- 66.04 (11.4.72)	- 139.06 (4.12.72)
47	- 180.95 (27.4.47)	- 256.54 (31.12.47)	73	- 298.4 (24.4.73)	- 91.44 (31.12.73)
48	- 187.96 (13.5.48)	- 245.74 (4.12.7-8)	74	+ 45.72 (30.4.74)	- 24.23 (12.12.74)
49	- 106.68 (24.4.48)	- 160.02 (8.12.49)	75	+ 78.10 (4.4.75)	+ 10.16 (31.12.75)
50	- 76.2 (26.4.50)	- 147.32 (15.12.50)	76	+ 112.39 (3.4.76)	+ 26.03 (4.12.76)
51	- 67.31 (29.3.51)	- 135.89 (10.12.51)	77	+ 85.72 (8.4.77)	+ 13.33 (30.12.77)
52	- 71.12 (8.4.52)	- 150.49 (7.1.53)	78	+ 106.04 (24.4.78)	+ 45.72 (15.12.78)
53	- 80.01 (8.4.53)	- 146.68 (27.10.53)	79	+ 131.44 (15.4.79)	