

LA RÉGULATION HYDRIQUE DES LACS TITICACA ET POOPÓ

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

*Mission O.R.S.T.O.M., Cajon Postal 8714, La Paz, Bolivia.

**Instituto de Investigaciones Químicas de la Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia.

RÉSUMÉ

La régulation hydrique moyenne annuelle du lac Titicaca, portant sur la période 1956-1973, a été établie. Elle présente trois principales particularités :

- le renouvellement moyen annuel des eaux lacustres est très faible (1,6 %),
- les apports météoriques sont légèrement supérieurs aux apports fluviaux,
- les pertes par évaporation sont prédominantes (90 % des pertes totales). Les pertes par l'effluent Desaguadero en revanche n'atteignent pas 5 %, aussi le Titicaca peut-il être presque assimilable à un lac fermé (dépourvu d'émissaire de surface).

Une tentative a été faite pour établir également la régulation hydrique du lac Poopó :

- le renouvellement annuel des eaux y est très élevé (près de 150 fois plus élevé que celui des eaux du Titicaca, soit 142 %),
- les apports sont principalement assurés par les affluents (82 % du total) : les pertes par évaporation sont prédominantes (98 % du total). Les faibles apports météoriques, le faible volume des infiltrations, l'absence d'émissaires de surface font du Poopó un bassin de forte concentration de la salure des eaux d'origine fluviales.

RESUMEN

La regulación hidrica promedio anual del lago Titicaca, relative al periodo 1956-1973, ha sido establecida. Esta presenta tres particularidades principales :

- la renovación promedio anual de las aguas lacustres es muy debil (1,6 %),
- las fluvias son legeramente superiores a los aportes de los afluentes,
- las pérdidas por evaporación son predominantes (90 % de las pérdidas totales). Las pérdidas por el efluente Desaguadero en cambio, no alcanza el 5 %; por eso el Titicaca es parecido a un lago cerrado (sin salida de superficie).

Se ha hecho una tentativa para establecer igualmente la regulación hidrica del lago Poopó :

- la renovación promedio anual des las aguas es muy elevado (casi 150 veces mas elevada que la de las aguas del Titicaca, o sea 142 %),
- los aportes vienen principalmente de los afluentes (82 % del total) : las pérdidas por evaporación son predominantes (98 % del total). Por el hecho que los volumen de las lluvias y de las infiltraciones y la ausencia de salida superficial de las aguas, el Poopó es medio de fuerte concentración de la salinidad des las aguas de los afluentes.

ABSTRACT

HYDRIC REGULATION OF THE LAKES TITICACA AND POOPÓ

The mean annual hydric regulation of the lake Titicaca, for the period 1956-1973, has been established. Three principal features may be make out.

— the mean annual turn over of the water lake is very low (1,6 %),
 — the rainfall is slightly more important than the affluent input:
 — the losses by evaporation are predominant (90 % of total losses). Instead the Desaguadero effluent output represents less than 5 %. So the lake Titicaca is quite a closed system (without effluent).

A tentative hydric regulation of the lake Poopó has been realised as well :

- the mean annual lake water turn-over is very high (near 150 limes higher than the Titicaca's, say 142 %),
 — the input proceeds mainly from the affluents (82 % of the total), the output by evaporation is predominant (98 % of the total). The low rainfall and evaporation volumes and the absence of effluent make the lake Poopó a system in which the affluent water salinity becomes very high.

Les lacs Titicaca et Poopó font partie du système fluviolacustre de l'Altiplano Boliviano-Péruvien. Il s'agit d'un bassin endoreïque de 190.000 km², localisé entre 14°25' et 22°50' de latitude sud et 71° et 67° de longitude est. Ce bassin a la forme allongée d'un ruban de 200 km de largeur moyenne, s'étirant sur près de 1.000 km ; son relief est caractérisé par une vaste plaine centrale légèrement déprimée au niveau du 20^e parallèle. Cette plaine, perchée entre 3.500 et 4.000 m d'altitude, est bordée à l'est et à l'ouest par les imposantes cordillères orientales et occidentales dont les sommets avoisinent 6.000-6.500 m ; elle est relevée au nord par les Andes de Carabaya et au sud par la Cordillère de Lipez (fig. 1). La pluviosité actuelle diminue progressivement du nord au sud : de 1.800 mm/an elle passe à 300 mm/an au niveau du 19^e parallèle. Il résulte de ce double gradient topographique et climatique un écoulement général des eaux du nord vers le centre du bassin. Ces eaux convergent d'abord vers la plus profonde dépression du système : le Titicaca ; leur écoulement se poursuit ensuite en direction d'une zone de l'Altiplano légèrement affaissée : le lac Poopó qui en est le point terminal.

Nous nous proposons d'examiner ici les transferts d'eau qui contrôlent cet écoulement au niveau des lacs Titicaca et Poopó, soit la régulation hydrique de ces deux milieux lacustres.

La régulation hydrique du Titicaca est loin d'être une inconnue. En effet, diverses tentatives de bilans ont été effectuées, qui en fournissent un premier schéma : MONHEIM (1956), BAZOBERRY Q. (1968), KESSLER (1970), RICHEYSON *et al* (1977). Toutefois ces bilans diffèrent sensiblement les uns des autres et cela pour deux raisons principales.

— Les périodes envisagées ne sont pas les mêmes. Or, l'écoulement est irrégulier, soumis à des fluctuations saisonnières et annuelles. C'est donc la période qui détermine en premier les termes de l'écoulement.

— Si certains termes ont été mesurés (apports et pertes fluviales, pluies) d'autres ont été évalués par différence, telle l'évaporation à partir du bilan

hydrique ou du bilan thermique (KESSLER, 1970 ; RICHEYSON *et al.*, 1977).

Nous allons tenter de réduire ces deux sources d'approximation

— en choisissant la période la plus longue possible pour définir un écoulement moyen annuel. Ce choix présente, en effet, un double avantage : plus la période envisagée est grande, plus les caractéristiques de l'écoulement défini sont extrapolables dans le temps et plus l'assimilation du régime de cet écoulement à celui d'un régime permanent est justifiable ; ce dernier avantage permet de poser que, pour une période donnée, les pertes contrebalancent les apports — du moins quand les niveaux du lac de début et de fin de période sont voisins —, et par là de lever une des indéterminations du bilan.

— en apportant des précisions complémentaires sur les infiltrations, fondées sur le fait que l'évolution dans un lac de la concentration des eaux d'apports en un élément — ne subissant pas de sédimentation chimique dans le milieu — est directement fonction des différents transferts d'eau dont le lac en question est l'objet (CARMOUZE, 1976 ; CARMOUZE et PEDRO, 1977).

La régulation hydrique du Poopó contrairement à celle du Titicaca, n'a fait l'objet d'aucune étude systématique. Les données hydrologiques et climatiques sont rares. Toutefois, par une série d'approximations nous allons tenter d'évaluer l'ordre de grandeur des principaux transferts d'eaux et d'établir un premier schéma de régulation.

1. LA RÉGULATION HYDRIQUE DU TITICACA

L'écoulement des eaux à travers le Titicaca est réglé d'un côté par des apports fluviaux météoriques et des résurgences et d'un autre côté par des pertes par un affluent, par évaporation et par infiltration.

Les données hydrologiques disponibles couvrent la période 1956-1973. C'est donc cette période qui va être retenue pour quantifier en valeur moyenne

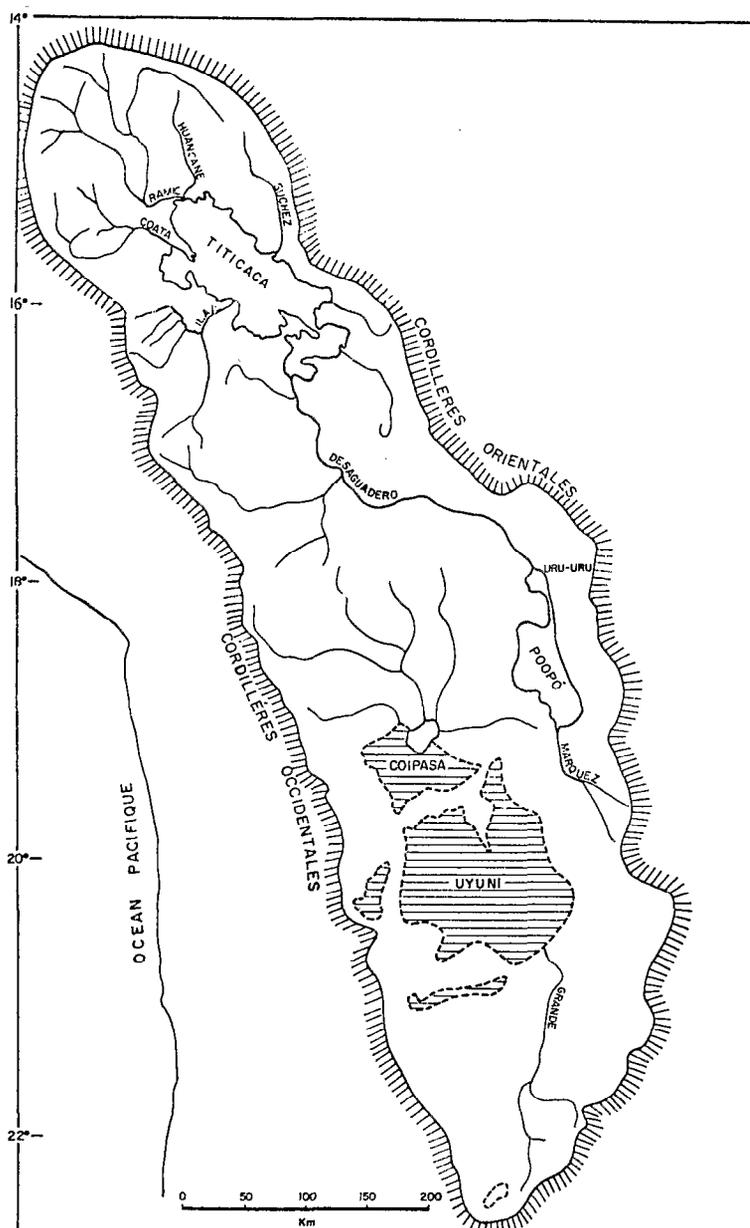


Fig. 1. — Le système fluvio-lacustre de l'Altiplano.

annuelle les différents transferts d'eaux. Une fois caractérisé, l'écoulement d'eau à travers le lac sera comparé au volume lui-même de façon à en estimer le renouvellement.

Le Titicaca est constitué de deux milieux fort distincts : le grand lac et le petit lac (el Lago Mayor, el Lago Pequeño) (fig. 2). Nous allons au préalable établir les régulations de ces deux milieux. Non seulement elles présentent un intérêt en soi,

mais encore elles vont permettre de faire une meilleure évaluation du degré d'approximation auquel sont liés certains termes de la régulation du lac pris dans son ensemble.

1.1. Les apports d'eau par les affluents

La cuvette du Titicaca, qui s'étend suivant un axe nord-ouest, sud-ouest de 14° à 17° de latitude

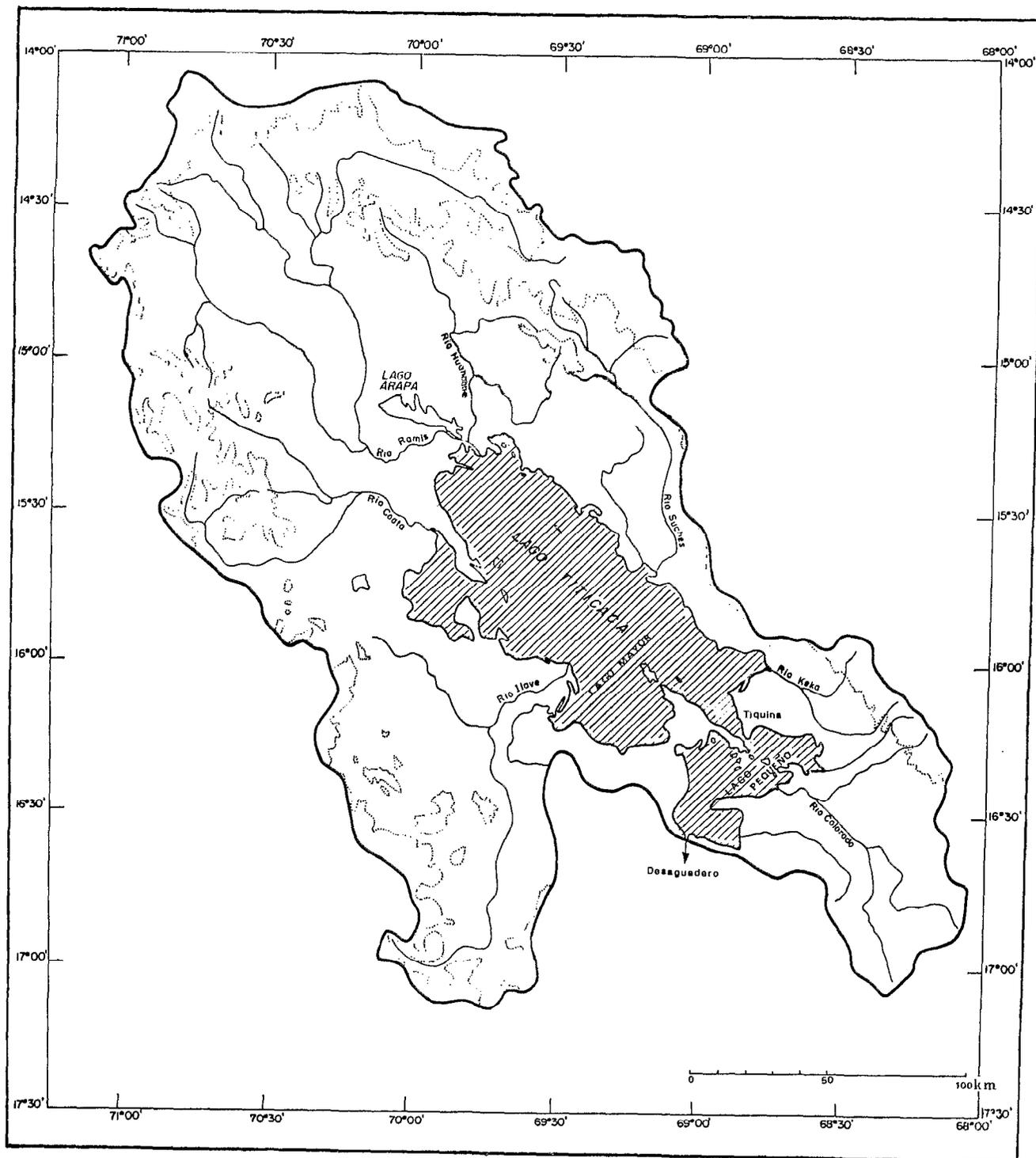


Fig. 2. — Le bassin versant du lac Titicaca.

sud et de 68°5 à 71°5 de longitude ouest, occupe 58.000 km² environ. Localisé dans la partie sud-ouest de la cuvette, le lac est essentiellement alimenté par les régions septentrionales et occidentales. Le réseau hydrographique comprend cinq rivières principales : Ramis, Coata, Ilave, Huancane et Suhez. MONHEIM (1956) en fournit une description détaillée (fig. 2).

Ces rivières ont fait l'objet de relevés hydrologiques depuis 1956. Les résultats des dix premières années ont été publiés (KESSLER et MONHEIM, 1968 ; BAZOBERRY, 1968). Les résultats récents compris entre 1966 et 1973 nous ont été aimablement fournis par les Services Météorologiques Nationaux du Pérou et de Bolivie (*). Il en a été déduit pour chacune des rivières et de leurs annexes les apports moyens annuels (Tabl. I).

TABLEAU I

Apports moyens annuels en eau des principaux affluents du Titicaca et de leurs annexes durant la période 1956-1973

Ramis.....	2,25 × 10 ⁹ m ³ /an
Annexes du Ramis.....	0,03 —
Ilave.....	0,90 —
Annexes du Ilave.....	0,34 —
Coata.....	1,01 —
Annexes du Coata.....	0,33 —
Huancane.....	0,50 —
Annexes du Huancane.....	0,29 —
Suhez + Keka et annexes.....	0,78 —
Rivières secondaires de Bolivie alimentant le petit lac.....	0,32 —
Apports fluviaux totaux.....	6,75 —

L'essentiel des apports provient du nord et du nord-ouest de la cuvette. Le Ramis, le Huancane, le Coata et leurs annexes fournissent 65,3 % des apports totaux. Le grand lac reçoit 6,43 × 10⁹ m³/an, le petit lac 0,32 × 10⁹ m³/an.

1.2. Les apports météoriques

Les données les plus complètes dont nous disposons proviennent d'une carte de pluviosité du lac établie par KESSLER et MONHEIM (1968) pour la période 1957-1961. Elle a été extrapolée à la période 1956-1973. L'erreur commise ne doit pas être très impor-

tante. En effet, dans la mesure où il doit exister une relation entre les apports météoriques et les apports fluviaux, on remarque que les apports fluviaux moyens annuels de 1957-1961 sont proches de ceux de 1956-1973. Ainsi d'après cette carte (fig. 3), la hauteur d'eau qui tombe en moyenne dans le lac est de l'ordre de 895 mm/an, cela représente un volume voisin de 7,50 × 10⁹ m³/an, étant donné que la surface du lac en eau est estimée à 8.375 km² (cf. Tabl. II). La pluviosité sur le grand lac est supérieure à celle du petit lac : 925 mm/an contre 750 mm/an. Compte tenu de leur surface, ils reçoivent dans l'ordre 6,51 × 10⁹ m³ et 0,99 × 10⁹ m³ d'eaux de pluie en moyenne annuelle.

1.3. Les pertes par l'effluent Desaguadero

Le Titicaca possède dans sa partie méridionale un exutoire de surface : le Desaguadero. A partir des données de KESSLER (1966), KESSLER et MONHEIM (1968) et BAZOBERRY Q., (1968) relatives à la période 1956-1966 et celles fournies par le Service Météorologique et Hydrologique du Pérou (SENAMHI) pour la période 1967-1973, la perte moyenne a été estimée à 0,665 × 10⁹ m³/an. Cet effluent joue un rôle très modeste : son débit représente moins de 10 % de celui des affluents.

1.4. Les pertes par infiltration

L'estimation des pertes par infiltration est fondée sur le bilan de l'ion Cl⁻ dans le Titicaca. Nous devons admettre pour effectuer le calcul que :

— Cl⁻ ne provient que des affluents et n'est éliminé que par le Desaguadero et par infiltration (**).

— Les pertes en Cl⁻ contrebalancent les apports en Cl⁻ au cours de la période envisagée.

— La concentration en Cl⁻ des eaux qui s'infiltrent est égale à la concentration moyenne en Cl⁻ des eaux lacustres dans les zones d'infiltrations.

Cette dernière proposition implique la connaissance des régions d'infiltration, ce qui n'est pas le cas. Il est toutefois possible d'estimer les valeurs extrêmes que l'infiltration est susceptible de prendre. En effet, les concentrations en Cl⁻ des eaux du Grand lac et du Petit lac, à l'intérieur de chacun de ces deux milieux, sont relativement constantes, mais différentes d'un milieu à l'autre. Les valeurs extrêmes

(*) Nous remercions tout particulièrement E. AQUIZE, chef de la SENAMHI (Pérou) pour l'esprit de coopération dont il a fait preuve à notre égard.

(**) Par cette hypothèse les apports par résurgences sont négligés. Dans le Grand Lac nous ne disposons pas de moyens de vérification, par contre dans le Petit Lac les quantités de Cl⁻ apportées par les résurgences doit être très faible car les eaux de surface adjacentes ne sont pas chlorurées.

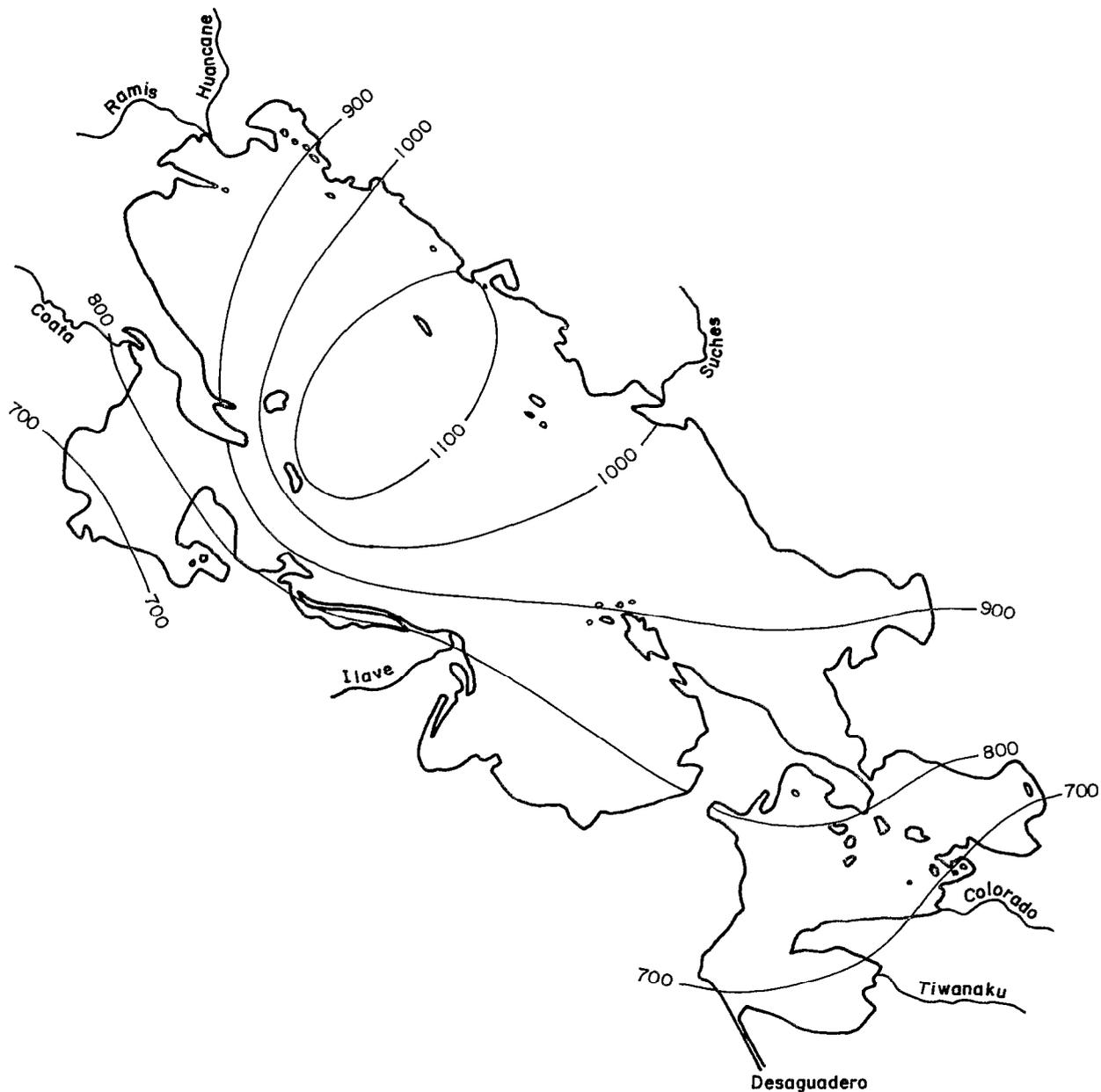


Fig. 3. — Isohyètes du Titicaca en mm.

correspondant aux cas où toutes les infiltrations ont lieu soit dans le Grand Lac (v_{inGL}), soit dans le Petit Lac (v_{inPL}).

D'une façon générale, à la suite de ces hypothèses, on peut écrire : pertes par infiltration de $Cl^- =$

apports fluviaux de Cl^- — pertes fluviales de Cl^- ;
ou encore en faisant intervenir les grandeurs suivantes, exprimées en valeur moyenne annuelle :

$$[Cl^-]_{inGL} = \text{conc. en } Cl^- \text{ des eaux s'infiltrant dans le GL} = 7,175 \text{ M/m}^3 (*)$$

(* Les valeurs de Cl^- proviennent d'une étude générale sur l'hydrochimie des lacs Titicaca et Poopó développée au Laboratoire de l'Institut de Chimie de l'UMSA, de La Paz.

ALTITUDES en mètres

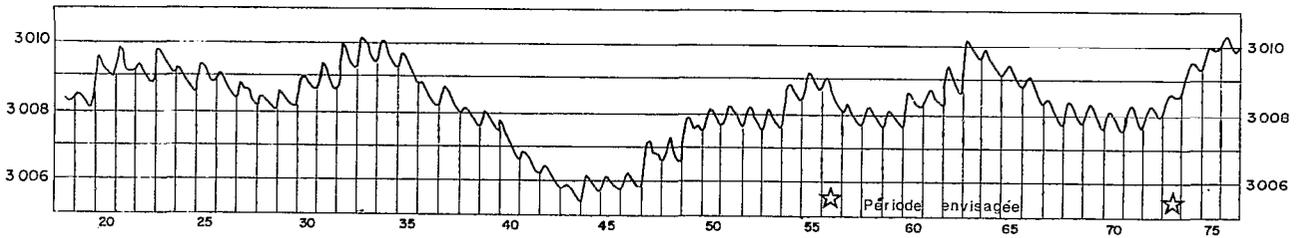


Fig. 4. — Niveaux mensuels du lac Titicaca (1918-1976).

- $[\overline{\text{Cl}^-}]_{\text{inPL}}$ = conc. en Cl^- des eaux s'infiltrant dans le PL = $7,63 \text{ M/m}^3$
- $[\overline{\text{Cl}^-}]_{\text{af}}$ = conc. en Cl^- des eaux des affluents = $1,46 \text{ M/m}^3$
- $[\overline{\text{Cl}^-}]_{\text{ef}}$ = conc. en Cl^- des eaux du Desaguadero = $7,95 \text{ M/m}^3$
- $(\overline{v})_{\text{af}}$ = volume des eaux des affluents = $6,75 \times 10^9 \text{ m}^3$
- $(\overline{v})_{\text{ef}}$ = volume des eaux du Desaguadero = $0,665 \times 10^9 \text{ m}^3$

on obtient :

$$[\overline{\text{Cl}^-}]_{\text{inGL}} \times (\overline{v})_{\text{inGL}} + [\overline{\text{Cl}^-}]_{\text{inPL}} \times (\overline{v})_{\text{inPL}} = [\overline{\text{Cl}^-}]_{\text{af}} \times (\overline{v})_{\text{af}} - [\overline{\text{Cl}^-}]_{\text{ef}} \times (\overline{v})_{\text{ef}}$$

soit :

$$(\overline{v})_{\text{in}} = (\overline{v})_{\text{inGL}} + (\overline{v})_{\text{inPL}} = \frac{10,03 + (\overline{v})_{\text{inGL}}}{16,77}$$

$$= \frac{10,03 - (\overline{v})_{\text{inPL}}}{15,77} \quad (1)$$

— cas où les infiltrations ont lieu dans le grand lac GL :

$$(v)_{\text{in}} = (v)_{\text{inGL}} = \frac{[\overline{\text{Cl}^-}]_{\text{af}} \times (\overline{v})_{\text{af}} - [\overline{\text{Cl}^-}]_{\text{ef}} \times (\overline{v})_{\text{ef}}}{[\overline{\text{Cl}^-}]_{\text{inGL}}}$$

$$\simeq 0,635 \times 10^9 \text{ m}^3$$

— cas où les infiltrations ont lieu dans le petit lac PL :

$$(v)_{\text{in}} = (v)_{\text{inPL}} = \frac{[\overline{\text{Cl}^-}]_{\text{af}} \times (\overline{v})_{\text{af}} - [\overline{\text{Cl}^-}]_{\text{ef}} \times (\overline{v})_{\text{ef}}}{[\overline{\text{Cl}^-}]_{\text{inPL}}}$$

$$\simeq 0,60 \times 10^9 \text{ m}^3$$

Les infiltrations dans l'ensemble du lac sont donc, en moyenne annuelle, comprises entre $0,635$ et $0,60 \times 10^9 \text{ m}^3$. (L'incertitude due au manque d'information sur la distribution des infiltrations est de 6 %; elles représentent moins de 5 % des pertes totales).

1.5. Les pertes par évaporations

Sur la période envisagée (17 ans), il est raisonnable d'admettre que en moyenne annuelle, les apports par les affluents $(\overline{v})_{\text{af}}$ et les pluies $(\overline{v})_{\text{pl}}$ sont contre-balançés par les pertes par infiltration $(\overline{v})_{\text{in}}$ par l'effluent $(\overline{v})_{\text{ef}}$ et par l'évaporation $(\overline{v})_{\text{ev}}$, ceci d'autant que les niveaux du lac du début et de la fin de la période sont voisins (*) (fig. 4).

$$(\overline{v})_{\text{ev}} = (\overline{v})_{\text{af}} + (\overline{v})_{\text{pl}} - (\overline{v})_{\text{in}} - (\overline{v})_{\text{ef}}$$

$$(\overline{v})_{\text{af}} = 6,75 \times 10^9 \text{ m}^3; (\overline{v})_{\text{pl}} = 7,5 \times 10^9 \text{ m}^3;$$

$$(\overline{v})_{\text{ef}} = 0,665 \times 10^9 \text{ m}^3; (v)_{\text{in}} = (0,635 \text{ à } 0,60) \times 10^9 \text{ m}^3$$

d'où :

$$(v)_{\text{ev}} = (12,98 \text{ à } 12,95) \times 10^9 \text{ m}^3$$

La surface en eau du lac étant de $8,372 \text{ km}^2$ (Tabl. II), le volume qui s'évapore correspond à une hauteur moyenne d'eau de $1,55 \text{ mm/an}$. En admettant que l'évaporation reste constante dans l'ensemble du lac, on peut calculer les volumes qui s'évaporent dans le Grand Lac $(\overline{v})_{\text{evGL}}$, et dans le Petit Lac $(\overline{v})_{\text{evPL}}$.

$$(v)_{\text{evGL}} = 7,028 \times 10^6 \text{ m}^2 \times 1,55 \text{ m} = 10,90 \times 10^9 \text{ m}^3$$

(*) Les résurgences sont négligées, l'évaporation est donc surestimée. Cette surestimation est très faible. En effet, les résurgences dans le Petit Lac sont de l'ordre de $0,05 \times 10^9 \text{ m}^3$ ce qui représente 1,5 % des apports d'eau dans ce milieu; on peut raisonnablement penser que dans le Grand Lac le pourcentage de leur contribution est voisin (WALGENWITZ, F., communication personnelle).

TABLEAU II

Caractéristiques morphométriques du lac Titicaca (à la cote moyenne 3008).

Dimensions linéaires			
Longueur maximale.....	175 km	Profondeur moyenne du grand lac.....	134 m
Largeur maximale.....	67 km	Profondeur moyenne du petit lac.....	10,8 m
Longueur moyenne du grand lac.....	45 km	Profondeur moyenne de la baie de Puno...	14 m
Longueur des côtes.....	1125 km	Profondeur maximale du lac.....	281 m

Surfaces et volumes			
Surface totale du lac.....	8440 m ²	Volume total du lac.....	893 × 10 ⁹ m ³ (100 %)
Surface totale en eau.....	8372 (100 %)	Volume du grand lac.....	84 × 10 ⁹ m ³ (97,5)
Surface en eau du grand lac.....	6476 (77,4)	Volume du petit lac.....	14,25 × 10 ⁹ m ³ (1,6)
Surface en eau du petit lac.....	1323 (15,8)	Volume de la baie de Puno...	7,75 × 10 ⁹ m ³ (0,85)
Surface en eau de la baie de Puno...	552 (6,6)		

Morphométrie du bassin principal					
Isobathes (m)	Surfaces occupées		Différences de surfaces entre isobathes successifs (km ²)	Volume des couches	
	(km ²)	(%)		(× 10 ⁹ m ³)	(%)
0	6496	100			
50	4807	74	1689	232,5	32,4
100	3990	61,4	817	219,9	25,2
150	3135	48,2	855	178,1	20,4
200	1768	27,2	1367	122,5	14,1
250	595	9,2	1173	59,1	6,8
281				8,9	1,0

$$V_{\text{evpl}} = 1.323 \times 10^9 \text{ m}^3 \times 1,55 \text{ m} = 2,05 \times 10^9 \text{ m}^3$$

Notons que KESSLER (1970) puis RICHÉSON *et al.* (1977) ont estimé l'évaporation à partir de deux méthodes, la première reposant sur le bilan thermique la seconde sur le bilan hydrique. Ces méthodes prises dans cet ordre, KESSLER obtient 1.714 et 1.480 mm/an; RICHÉSON, 1.900 et 1.334 mm/an. Notre valeur est sensiblement égale à la moyenne de ces quatre nombres.

1.6. L'écoulement des eaux dans le détroit de Tiquina

Le bilan des apports et pertes d'eaux relatif au Grand Lac met en évidence un excédant d'apport dans ce milieu, celui relatif au Petit Lac montre le contraire. L'équilibre hydrique qui tend à se maintenir dans chacune de ces deux régions est donc assuré par un écoulement des eaux du Grand Lac vers le Petit Lac au niveau du détroit de Tiquina.

$$(\bar{v})_{afGL} + (\bar{v})_{piGL} = (\bar{v})_{Tiq} + (\bar{v})_{evGL} \pm (\bar{v})_{inGL} \quad (2)$$

$$(\bar{v})_{afPL} + (\bar{v})_{piPL} + (\bar{v})_{Tiq} = (\bar{v})_{evPL} + (\bar{v})_{efPL} + (\bar{v})_{inPL} \quad (3)$$

$$(\bar{v})_{afGL} = \text{apports fluviatiles au GL} = 6,43 \times 10^9 \text{ m}^3$$

$$(\bar{v})_{piGL} = \text{apports météoriques au GL} = 6,51 \times 10^9 \text{ m}^3$$

$$(\bar{v})_{inGL} = \text{infiltrations dans le GL} = 0 \text{ à } 0,635 \times 10^9 \text{ m}^3$$

$$(\bar{v})_{evGL} = \text{évaporation dans le GL} = 10,9 \times 10^9 \text{ m}^3$$

$$(\bar{v})_{afPL} = \text{apports fluviatiles au PL} = 0,32 \times 10^9 \text{ m}^3$$

$$(\bar{v})_{piPL} = \text{apports météoriques au PL} = 0,99 \times 10^9 \text{ m}^3$$

$$(\bar{v})_{inPL} = \text{infiltrations dans le PL} = 0 \text{ à } 0,60 \times 10^9 \text{ m}^3$$

$$(\bar{v})_{evPL} = \text{évaporation dans le PL} = 2,05 \times 10^9 \text{ m}^3$$

$$(\bar{v})_{efPL} = \text{pertes par le Desaguadero} = 0,665 \times 10^9 \text{ m}^3$$

Le débit annuel du détroit de Tiquina $(\bar{v})_{Tiq}$, peut alors être réduit de l'une ou l'autre des deux équations précédentes (2) et (3).

$$\text{Dans le cas où } (\bar{v})_{inPL} = 0 \text{ et } (\bar{v})_{inGL} = 0,635 \times 10^9 \text{ m}^3 \quad (\bar{v})_{Tiq} = 1,40 \times 10^9 \text{ m}^3$$

$$\text{Dans le cas où } (\bar{v})_{inGL} = 0 \text{ et } (\bar{v})_{inPL} = 0,60 \times 10^9 \text{ m}^3 \quad (\bar{v})_{Tiq} = 2,00 \times 10^9 \text{ m}^3$$

L'incertitude sur le débit du détroit de Tiquina due à l'absence d'information sur la distribution spatiale des infiltrations dans le lac est de 35 %. La marge d'erreur est donc relativement importante. En fait, l'éventualité de l'un ou l'autre des deux cas envisagés est peu probable. En effet, on peut penser que le contexte hydrogéologique soit peu favorable à des infiltrations superficielles ; au contraire la présence de glaciis et la présomption de failles (*) dans la cuvette lacustre étayeraient l'hypothèse selon laquelle il y aurait des infiltrations en profondeur. Dans ces conditions, faute d'informations supplémentaires, nous allons admettre, dans le but d'établir les équilibres dynamiques moyens des eaux dans le Grand Lac et dans le Petit Lac, que le rapport des volumes d'eaux qui s'infiltrent dans ces deux milieux est voisin de celui correspondant à leurs surfaces respectives.

Par suite,

$$\frac{\text{Surface du GL}}{\text{Surface du PL}} = \frac{(\bar{v})_{inGL}}{(\bar{v})_{inPL}} = 5,35$$

puis à l'aide des équations (1), (2) et (3)

$$(\bar{v})_{inGL} = 0,535 \times 10^9 \text{ m}^3$$

$$(\bar{v})_{inPL} = 0,095 \times 10^9 \text{ m}^3$$

$$(\bar{v})_{Tiq} = 1,50 \times 10^9 \text{ m}^3$$

1.7. Le renouvellement des eaux dans le Titicaca

Les transferts d'eau étant définis, il s'agit maintenant pour connaître l'importance du renouvellement annuel des eaux lacustres de préciser la morphométrie du lac.

Le plan d'eau au cours de la période 1956-1973 a oscillé autour de la cote 3.808,4 d'après les données rapportées par MONHEIM (1956), KESSLER (1970) et BAZOBERRY (1968), ainsi que celles qui nous ont été fournies par la SENAMHI pour la période récente (fig. 4).

Le contour du lac utilisé est celui qui a été tracé récemment par BOULANGE et RODRIGO (communication personnelle) à partir notamment d'images par satellite. Il correspond à une cote du plan d'eau légèrement supérieure à celle qui est envisagée. La bathymétrie elle-même repose sur les données de NEVEU-LEMAIRE (1906) complétées par GILSON (1964) et celles que nous avons obtenues, soit au total 250 mesures à peu près uniformément réparties sur l'ensemble du lac (fig. 5).

Le Tableau II regroupe les principales caractéristiques morphométriques du lac. Nous allons successivement calculer le renouvellement des eaux dans le lac pris dans son ensemble \bar{v}_{eau} , dans le Grand Lac \bar{v}_{eauGL} , et dans le Petit Lac \bar{v}_{eauPL} . D'une façon générale :

$$\bar{v}_{eau} =$$

$$\frac{\text{Apports moyens annuels (ou pertes) en eau du milieu envisagé}}{\text{volume moyen du milieu envisagé}}$$

D'où : — dans le lac pris dans son ensemble

$$\bar{v}_{eau} = \frac{14,25 \times 10^9}{893 \times 10^9} = 1,6 \%$$

$$\text{— dans le Grand Lac} \quad \bar{v}_{eauGL} = \frac{12,94}{878,7 \times 10^9} = 1,45 \%$$

$$\text{— dans le Petit Lac} \quad \bar{v}_{eauPL} = \frac{2,81 \times 10^9}{14,25 \times 10^9} = 19,7 \%$$

Une autre manière de rendre compte de l'importance des échanges d'eaux, en moyenne annuelle, relativement au volume du lac est de préciser le temps nécessaire au remplissage du lac par le jeu des seuls apports, ou encore à sa vidange par le jeu

(*) B. BOULANGE (communication personnelle).

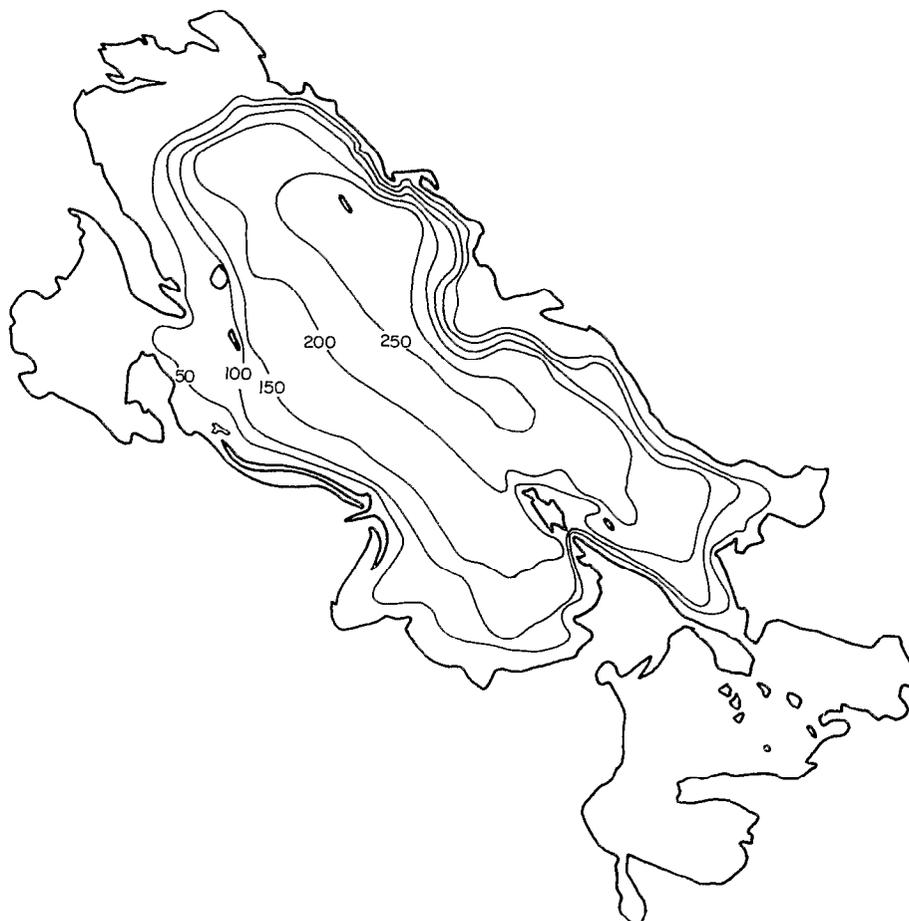


Fig. 5. — Bathymétrie du lac Titicaca (courbe isobathe —50 m —).

des seules pertes. Cette durée, T_{eau} , peut être assimilée au temps de résidence moyen des eaux dans le milieu lacustre.

$$T_{\text{eau}} = \frac{\text{volume moyen du milieu envisagé}}{\text{Apports moyens annuels (ou pertes) au milieu envisagé}} = \frac{1}{\bar{v}_{\text{eau}}}$$

D'où :

— dans le lac pris dans son ensemble	$T_{\text{eau}} = 62,6$ ans
— dans le Grand Lac	$T_{\text{eauGL}} = 67,9$ ans
— dans le Petit Lac	$T_{\text{eauPL}} = 5,1$ ans

KESSLER et MONHEIM (1968) et RICHESON *et al.*

(1977) donnent un temps de résidence des eaux dans le lac égal à 70 ans.

1.8. L'équilibre hydrique moyen annuel du Titicaca (*)

L'écoulement moyen annuel des eaux à travers le Titicaca pour la période 1956-1973 est illustré par la figure 6.

Il présente trois principales particularités :

- le renouvellement annuel des eaux lacustres est très faible : 1,6 %
- les apports météoriques sont légèrement supérieurs aux apports fluviaux
- les pertes par évaporations sont prédominantes

(*) Rappelons que dans le schéma proposé il n'est pas tenu compte de résurgences et qu'il est admis que les infiltrations sont uniformément réparties dans l'ensemble des fonds lacustres.

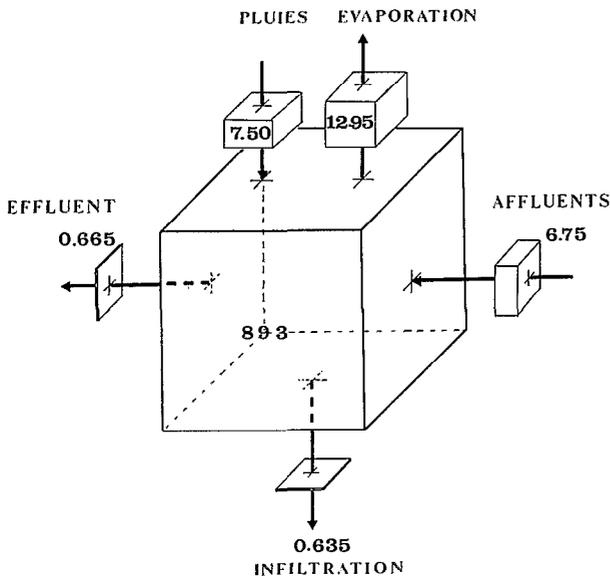


Fig. 6. — Équilibre hydrique moyen annuel des eaux dans le Titicaca. Les résultats sont exprimés en milliards de m³.

Toutefois cet écoulement est fort différent, selon qu'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 (19,7 % contre 1,45 %) : il s'agit donc d'un milieu beaucoup plus ouvert.

— 82,5 % des apports fluvio-lacustres au Petit Lac proviennent du Grand Lac.

— 36,5 % des apports totaux au Petit Lac sont évacués par le Desaguadero, tandis que 11,6 % des apports totaux au Grand Lac s'écoulent à travers le détroit de Tiquina.

2. LA RÉGULATION HYDRIQUE DU POOPÓ (Tentative)

Le lac Poopó est un système fermé en ce sens qu'il ne possède pas d'émissaire de surface. Aussi, les pertes d'eau, qui contrebalancent les apports par les affluents (le Desaguadero principalement) et par les pluies, ne sont-elles assurées que par l'évaporation et les infiltrations (fig. 8).

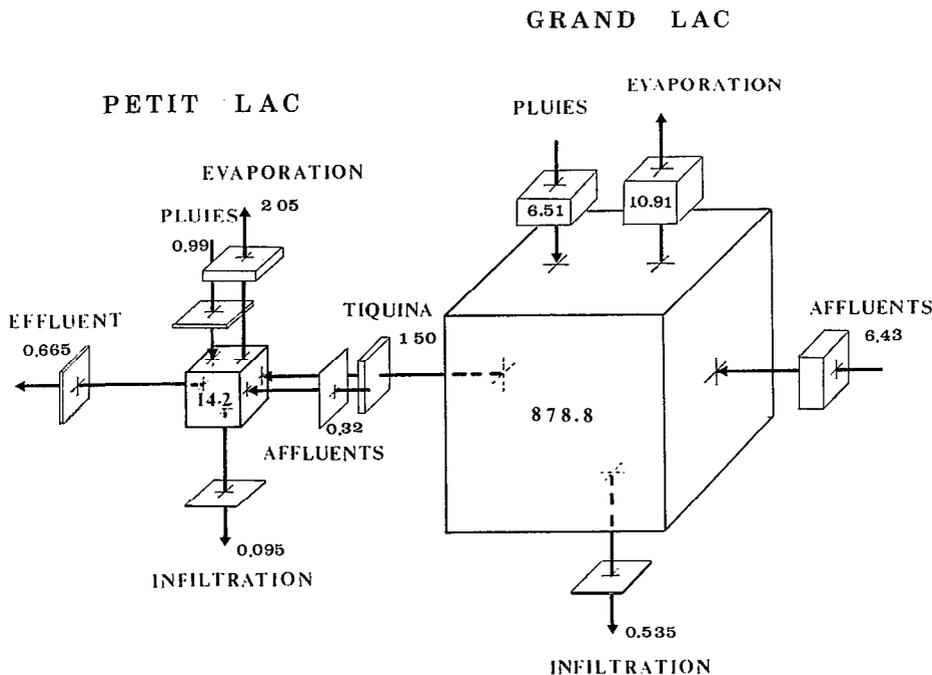


Fig. 7. — Équilibre hydrique moyen annuel des eaux dans le Grand Lac et dans le Petit Lac (Titicaca). Les résultats sont exprimés en milliards de m³.

(90 % des pertes totales). Les pertes par le Desaguadero, en revanche, n'atteignent pas 5 % des pertes totales. Le lac Titicaca est presque assimilable à un lac fermé, c'est-à-dire dépourvu d'émissaire de surface.

Les données relatives au bilan hydrique du système sont extrêmement réduites. Toutefois, nous allons tenter de définir les ordres de grandeur des transferts d'eau opérant au niveau du Poopó.

côté les températures de l'air et de l'eau sont en moyenne plus basses sur le Poopó (2-3 °C), d'un autre côté l'insolation est plus grande ($\approx +10\%$) et l'humidité relative plus faible ($\approx -10\%$). Le premier facteur joue en faveur d'une diminution de l'évaporation, les deux derniers au contraire en faveur d'une augmentation (*).

En raison de cet antagonisme, et faute de mieux faire, nous allons admettre que l'évaporation du Poopó est du même ordre de grandeur que celle du Titicaca, soit 1,55 m/an. Étant donné que la surface moyenne du lac est de 2.000 km², le volume d'eau qui s'évapore est de $3,10 \times 10^9 \text{ m}^3$.

2.2. Les apports météoriques

Les données de pluviosité concernant la région du Poopó sont très peu nombreuses. D'après la carte d'isohyètes établie par BAZOBERRY Q. (1968), la pluviosité moyenne sur le lac peut être estimée à 300 mm/an; ce qui représente une quantité d'eau qui tombe sur le lac égale à $0,60 \times 10^9 \text{ m}^3$.

2.3. Les pertes par infiltration et les apports fluviaux (**)

Pour calculer les infiltrations nous allons suivre la méthode utilisée pour le Titicaca. Il faut en premier connaître l'apport annuel en Cl⁻, autrement dit le volume annuel des eaux fluviales qui entrent dans le lac et leur concentration en Cl⁻. Or, ce volume n'est pas connu. Aussi, allons-nous procéder par itération : nous allons admettre dans un premier temps que les apports fluviaux équilibrent seuls les pertes pour obtenir une première valeur des apports en Cl⁻ et par suite une estimation des infiltrations elles-mêmes. Dans un second temps nous allons recalculer une nouvelle valeur des apports en Cl⁻ qui va nous conduire à une estimation plus précise des infiltrations.

1^{er} temps

— apport fluvial en eau = pertes par évaporation — apports par les pluies

$$(\bar{v})_{\text{af1}} - (\bar{v})_{\text{ev}} - (\bar{v})_{\text{pl}} = 3,1 \times 10^9 \text{ m}^3 - 0,60 \times 10^9 \text{ m}^3 \\ = 2,5 \times 10^9 \text{ m}^3$$

— apport fluvial en Cl⁻ = apport fluvial en eau \times concentration en Cl⁻ de ces eaux.

$$(\bar{\text{Cl}}^-)_{\text{af1}} = (\bar{v})_{\text{af1}} \times [\bar{\text{Cl}}^-]_{\text{af}} = 2,5 \times 10^9 \times 9,61 \text{ M/m}^3 \\ = 24,02 \times 10^9 \text{ M}$$

— volume d'infiltration. (On admet que les eaux d'infiltration ont même composition chimique que les eaux lacustres).

$$(\bar{v})_{\text{in1}} = (\bar{\text{Cl}}^-)_{\text{af1}} / [\bar{\text{Cl}}^-]_{\text{in}} = 24,02 \times 10^9 \text{ M} / 395 \text{ M/m}^3 \\ = 0,061 \times 10^9 \text{ m}^3$$

2^e temps

— apport fluvial en eau = perte par évaporation + perte par infiltration — apport par les pluies :

$$(\bar{v})_{\text{af2}} = (\bar{v})_{\text{ev}} + (\bar{v})_{\text{in1}} - (\bar{v})_{\text{pl}} = 2,5 \times 10^9 \text{ m}^3$$

— apport fluvial en Cl⁻ :

$$(\bar{\text{Cl}}^-)_{\text{af2}} = (\bar{v})_{\text{af2}} \times [\text{Cl}^-]_{\text{af}} = 24,6 \times 10^9 \text{ m}^3$$

— volume d'infiltration

$$(\bar{v})_{\text{in}} = (\bar{\text{Cl}}^-)_{\text{af2}} / [\text{Cl}^-]_{\text{in}} = 0,062 \times 10^9 \text{ m}^3$$

En fait, la correction apportée tant pour l'apport fluvial en eau que pour la perte par infiltration est faible car cette dernière intervient peu dans le bilan hydrique.

En somme, les valeurs suivantes sont adoptées :

$$(\bar{v})_{\text{af}} = 2,56 \times 10^9 \text{ m}^3 \\ (\bar{v})_{\text{in}} = 0,062 \times 10^9 \text{ m}^3$$

2.4. Le renouvellement des eaux dans le Poopó

L'estimation des transferts d'eau étant faite, il s'agit de calculer maintenant le volume du lac. Le bassin lacustre est très plat; ses rives peuvent se déplacer sur de grandes distances en fonction de l'irrégularité des apports.

Il est possible d'après les cartes et images par satellite dont nous disposons et les mesures de profondeur effectuées (une cinquantaine), de distinguer (fig. 9) :

-- une zone centrale de 1.500 km² ayant des

(*) Les données climatologiques de Puno (RICHESON, 1977) ont été utilisées pour simuler l'évaporation dans le lac Poopó à partir de la formule de PELMAN.

— si l'insolation mensuelle du Titicaca est augmentée en moyenne de 30 h l'évaporation croît de 4 %;

— si la température moyenne des eaux du Titicaca est abaissée de 3° l'évaporation est diminuée de 10 %;

— si la pression partielle de vapeur d'eau du Titicaca est abaissée de 1 mbar, et l'humidité relative de 10 % l'évaporation augmente de 4 % (TURC, communication personnelle).

(**) Il n'est pas tenu compte des résurgences. Toutefois celles-ci ne doivent pas être négligeables. Il y a probablement une alimentation du Poopó par une nappe au niveau de côte nord-ouest (RISACHER, communication personnelle). Les apports fluviaux en seraient donc diminués d'autant. De même les infiltrations seraient plus fortes si ces eaux souterraines étaient chlorurées.

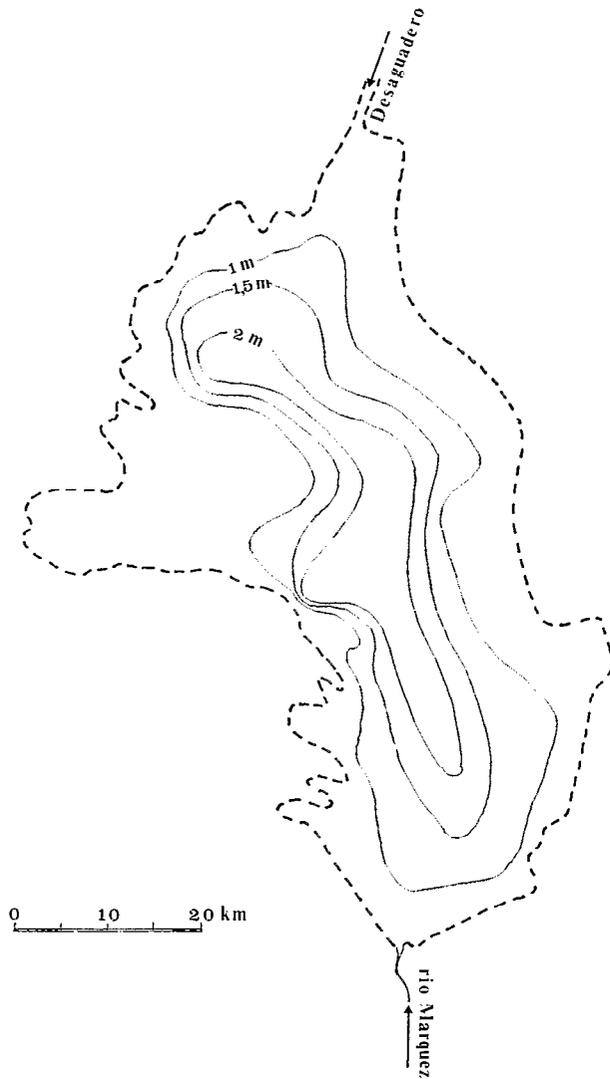


Fig. 9. — Bathymétrie du lac Poopó.

profondeurs comprises entre 0,50 et 2,5 mètres, 1,40 m en moyenne.

— une zone périphérique, à caractère temporaire, qui peut atteindre 1.000 km², ayant des profondeurs généralement inférieures à 0,5 mètres.

D'où le volume approximatif :

$$1.500 \text{ km}^2 \times 1,40 \text{ m} + 500 \text{ km}^2 \times 0,25 \text{ m} = 2,225 \times 10^9 \text{ m}^3$$

Le renouvellement moyen annuel des eaux lacustres τ_{eau} et le temps de résidence des eaux dans le T_{eau} ont alors les valeurs suivantes :

$$\tau_{\text{eau}} = \frac{3,16 \times 10^9}{2,225 \times 10^9} = 142 \text{ } \%; \quad T_{\text{eau}} = \frac{1}{\tau_{\text{eau}}} = 0,70 \text{ an} = 8,5 \text{ mois}$$

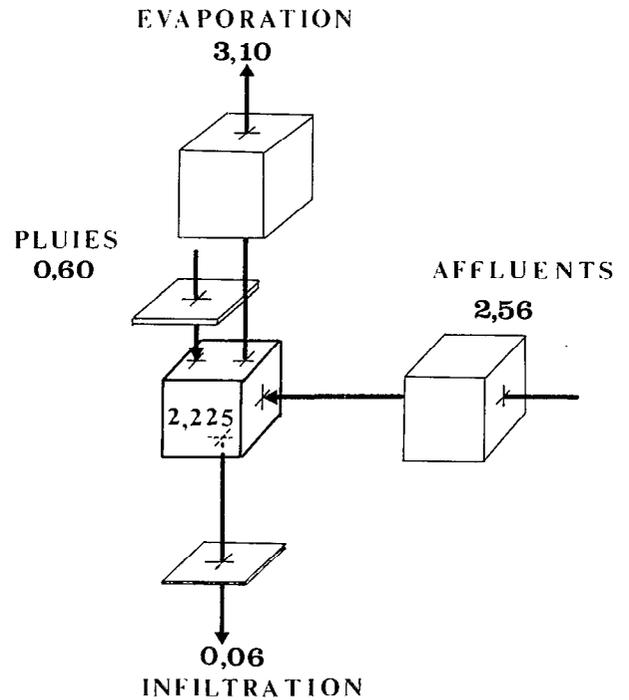


Fig. 10. — Équilibre hydrique moyen annuel des eaux dans le Poopó. Les résultats sont exprimés en milliards de m³.

2.5. L'équilibre hydrique moyen annuel

Cet équilibre, qui est résumé par la figure 10, se caractérise principalement par un renouvellement annuel des eaux très élevé (près de 100 fois plus élevé que celui des eaux du Titicaca), l'écoulement d'eau représente le passage d'un volume 1,5 fois supérieur au volume d'eau maintenu dans le lac.

Les apports sont principalement assurés par les affluents (82 % du total) ; les pertes par évaporation sont prédominantes (98 % du total). Les faibles apports météoriques, le faible volume des infiltrations, l'absence d'émissaire de surface font du Poopó un bassin de forte concentration de la salure des eaux d'origine fluviale.

3. CONCLUSION

La comparaison des régulations hydriques moyennes des deux lacs montre que celles-ci présentent de profondes dissemblances tant pour des raisons morphologiques que hydroclimatologiques.

— L'existence du Titicaca est consécutive à la formation d'une profonde et vaste faille dans l'Altiplano (profondeur maximale 280 m), celle du Poopó

à la présence d'une zone légèrement déprimée de 1-2 m. Ainsi le volume du Poopó représente 0,25 % de celui du Titicaca. Seul le Titicaca possède un effluent, toutefois ce dernier joue un rôle modeste dans la régulation hydrique : 4,5 % des pertes totales.

— Le Titicaca est situé dans une région franchement plus pluvieuse (850 mm/an contre 300 mm/an) ; les pluies y représentent 52,5 % des apports en eau tandis que dans le Poopó, elles n'en dépassent pas 19 %. Ces deux milieux présentent toutefois un point commun : les eaux sont en grande partie éliminées par évaporation (91 % dans le Titicaca, 98 % dans le Poopó). Dans ces conditions, les transferts d'eaux (la somme des pertes ou celle des apports) sont approximativement proportionnels aux surfaces de chacun des lacs. Par suite, le renouvellement des eaux est profondément différent d'un milieu à l'autre (1,6 % du volume du Titicaca est renouvelé chaque année, contre 146 % pour celui du Poopó).

— Comme dans le cas de tout lac marqué par la prédominance des pertes d'eau par évaporation, les irrégularités des apports fluviaux et des pluies sont mal amorties à l'échelle annuelle ; aussi les plans d'eaux des deux milieux sont sujets à de forts

dénivellements. Mais ces derniers ont des effets forts différents : la surface du lac Titicaca et *a fortiori* son volume sont peu modifiés, en revanche la physionomie du Poopó est profondément transformée : un abaissement de 40-50 cm du niveau moyen du lac provoque une réduction de la surface de moitié et du volume de un tiers.

Cet ensemble de dissemblances dans les régulations hydriques entraînent des dissemblances dans les régulations hydrochimiques des deux lacs, problème qui sera traité ultérieurement. Aussi peut on préciser que les deux milieux sont des bassins de concentration des eaux d'origine fluviale (évaporation > pluies). Par la seule combinaison des transferts d'eaux au niveau de chacun des deux lacs, le facteur de concentration de la salure dans le Titicaca est de 4,9, dans le Poopó de 30,5. Toutefois, nous verrons que ces valeurs sont en réalité plus faibles par suite de l'existence de sédimentations chimiques de certains éléments dissous au sein de ces deux milieux.

*Manuscrit reçu au Service des Publications de l'O.R.S.T.O.M.,
le 13 janvier 1978.*

BIBLIOGRAPHIE

- BAZOBERRY (Q.), 1968. — Dirección de irrigación. Ministerio de Fomento. Lima.
- CARMOUZE (J. P.), 1976. — La régulation hydrogéochimique du lac Tchéad. *Trav. et Doc. de l'O.R.S.T.O.M.*, n° 58, O.R.S.T.O.M., Paris.
- CARMOUZE (J. P.), PEDRO (G.), 1977. — Contribution des facteurs géographiques à la régulation hydrochimique des milieux lacustres. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrobiol.*, vol. XI, n° 3 : 231-237.
- GILSON (H. G.), 1964. — Lake Titicaca. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 15 : 112-127.
- KESSLER (A.), 1966. — Junde Laufänderungen des Desaguadero und die Entstehung des Uru-Uru Sees. *Erdkunde* Bd. 20 : 194-204.
- KESSLER (A.), 1970. — Über den Jahresgang der potentiellen Verdunstung in Titicaca-Becken. *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, sér. B. 18 : 239-252.
- KESSLER (A.), MONHEIM (F.), 1968. — Der Wassenhaushalt Titicacasees March Meneren Messergebnissen. *Erdkunde*, 22 : 275-283.
- MONHEIM (F.), 1956. — Beiträge zur Klimatologie und Hydrologie des Titicacabeckens. *Selbstvel. d. Geograph. Int. de Univ. Heidelberg*, 152 p.
- NEVEU-LEMAIRE (M.), 1906. — Les lacs des Hauts-Plateaux de l'Amérique du Sud. Imprimerie Nationale. Paris, 197 p.
- RICHERSON (P. J.), WIDMER (C.), KITTEL (T.), 1977. — The Limnology of Lake Titicaca (Peru-Bolivia). *Inst. Ecology, University of California, Davis, Publ.* n° 14, 78 p.