

Morphologie, hydrographie et climatologie du lac Titicaca et de son bassin versant⁽¹⁾

Bruno BOULANGÉ* et Eleonor AQUIZE JAEN**

RÉSUMÉ

Les caractéristiques morphométriques du lac Titicaca et de son bassin versant sont précisées. Avec une superficie de 8559 km², le lac se place au 21^e rang dans la classification mondiale. Son volume d'eau est de 896 × 10⁹ m³. Sa forme générale est ellipsoïdique, la dépression est conique.

Le climat du bassin est froid et semi-aride, mais le lac en raison de sa superficie joue un rôle régulateur. Son influence se note principalement sur les écarts de température (10 à 12° près du lac) et sur les précipitations plus élevées à la surface du lac que sur le reste du bassin.

MOTS-CLÉS : Lac Titicaca — Amérique du Sud — Morphologie — Hydrologie — Climatologie.

ABSTRACT

MORPHOLOGY, HYDROGRAPHY AND CLIMATOLOGY OF LAKE TITICACA AND ITS DRAINAGE BASIN

A precise description of the morphometric characteristics of Lake Titicaca and its drainage basin is given. The lake whose area amounts to 8559 km² holds the 21st place in the worldwide classification. Its water capacity amounts to 896 × 10⁹ m³ and its general configuration is ellipsoidal. The depression is cone-shaped.

The climate in the basin is cold and semi-arid; but the lake plays a regulating role as a result of its area. Its influence is observed mainly on the differences in temperature (from 10 to 12° close to the lake) and on the rainfalls which are heavier on the lake surface than in the rest of the basin.

KEY WORDS : Lake Titicaca — South America — Morphology — Hydrology — Climatology.

RESUMEN

MORFOLOGÍA, HIDROGRAFÍA Y CLIMATOLOGÍA DEL LAGO TITICACA Y DE SU CUENCA DE DRENAJE

Se especifican las características morfométricas del lago Titicaca y de su cuenca de drenaje. Se sitúa el lago en el vigésimo primero lugar de la clasificación mundial con una superficie de 8559 km². Su volumen de agua asciende a 896 × 10⁹ m³. Su aspecto general es elipsoidal y la depresión es cónica.

El clima de la cuenca es frío y semi árido, pero, dada su superficie, el lago obra como regulador. Se observa su influencia esencialmente en los cambios de temperatura (de 10 a 12° cerca del lago) y en las precipitaciones que son más importantes en la superficie del lago que en el resto de la cuenca.

PALABRAS CLAVES : Lago Titicaca — América del Sur — Morfología — Hidrología — Climatología.

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

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

** SENAMHI, Puno (Pérou).

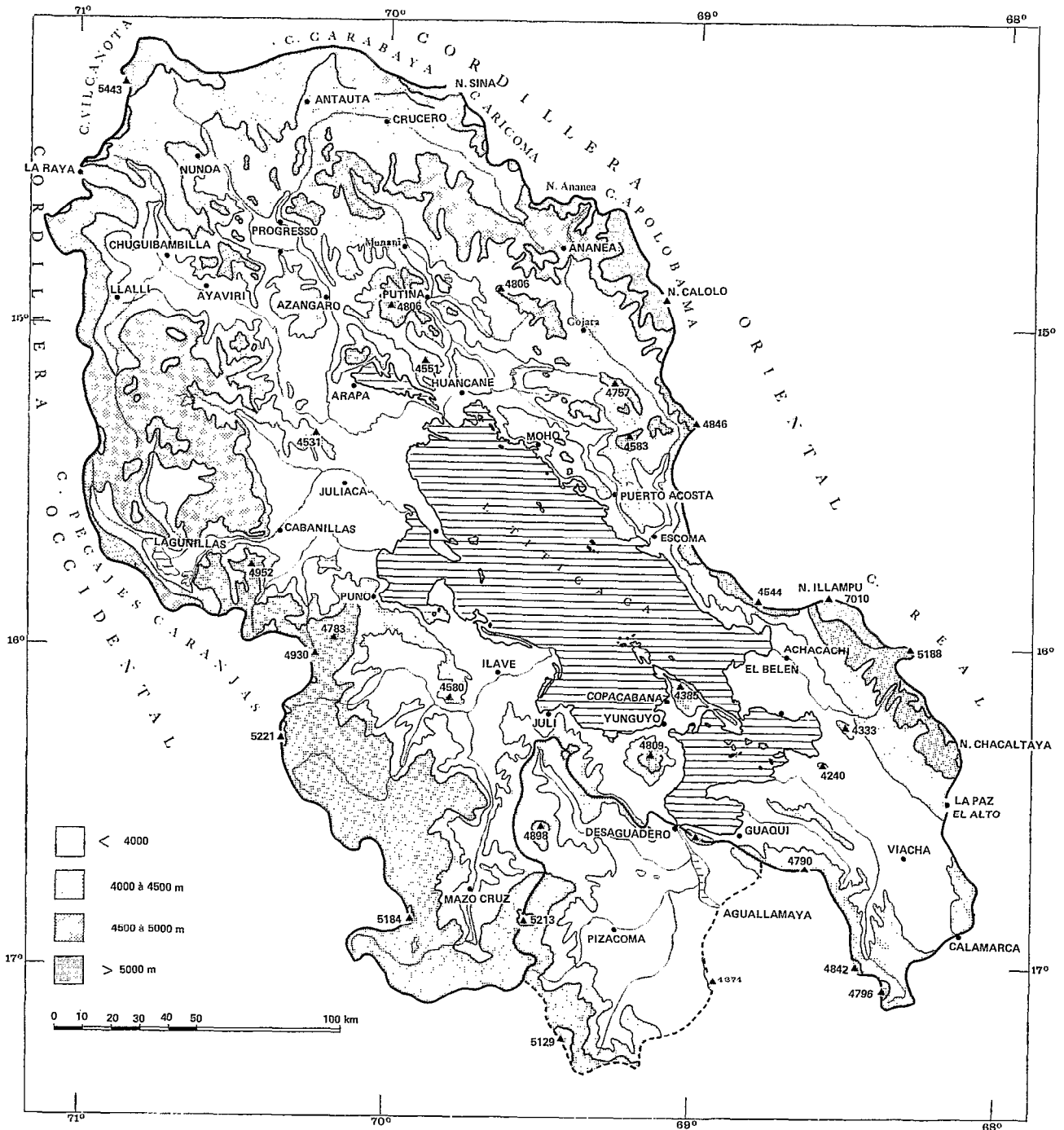


Fig. 1. — Carte géographique du bassin versant du lac Titicaca

Situé sur les hauts plateaux andins de Pérou et de Bolivie, le lac Titicaca est à cette altitude (3808 m) la plus grande surface navigable du globe. Il fait partie du milieu endoréique de l'« Altiplano » complété au sud par le lac Poopó et les salars d'Uyuni et de Coïpasa. Les premières données scientifiques y ont été recueillies au siècle dernier par d'ORBIGNY, mais il a fallu attendre le début de ce siècle et la Mission Créqui-Monfort pour avoir la première étude complète du lac (NEVEU-LEMAIRE, 1905). Par la suite, GILSON (1939-1964) dans le cadre de l'expédition Percy, MONHEIM (1956) ont précisé certaines caractéristiques climatologiques et hydrologiques du lac Titicaca; KESSLER (1963-1968-1970) a étudié principalement le climat de l'Altiplano.

Cette note, nullement exhaustive, complète et précise les travaux antérieurs, en raison des données supplémentaires recueillies ces dernières années dans le cadre des travaux réalisés conjointement par l'O.R.S.T.O.M. et l'U.M.S.A. (Universidad Mayor de San Andrés-La Paz). Elle présente les aspects morphologiques du bassin versant et de la cuvette lacustre, et quelques données de climatologie.

1. MORPHOLOGIE DU BASSIN VERSANT ET DE LA CUVETTE LACUSTRE

Le lac Titicaca et son bassin versant sont partagés entre la Bolivie et le Pérou. La plus grande partie du bassin versant est péruvienne. Elle comprend les principaux affluents : les Rios Ilave, Coata, Ramis et Huancané. La partie bolivienne comprend le Rio Suchez et la quasi-totalité des affluents du Petit Lac.

Le bassin s'étend suivant un axe de direction N.NW-S.SE. La cuvette lacustre a la même orientation (fig. 1). Le bassin occupe la partie nord de l'Altiplano. Les coordonnées des points extrêmes sont les suivantes :

14°09'06" et 17°08'29" de latitude sud;
68°03'34" et 71°01'42" de longitude ouest.

L'ensemble du bassin est en grande partie couvert par la carte au 1/1 000 000 de la Bolivie (1). La partie péruvienne a été complétée à l'aide des cartes au 1:100 000 de Ilave, Puno, Coata, Huancané (2). La partie bolivienne a été complétée à l'aide des cartes au 1:250 000 de La Paz, Puerto-Acosta, Copacabana, Desaguadero (1).

1.1. Morphologie du bassin

Le bassin est limité au nord à la Cordillère Vilcanota (5480 m), nœud de jonction des Cordillères occidentale et orientale.

La bordure orientale suit la ligne de crête des Cordillères Carabaya et Aricoma dont les sommets, d'altitude supérieure à 6000 m, sont continuellement enneigés (Nevada Sina, Nevada Ananea). Elle s'incline ensuite vers le sud et se poursuit par la Cordillère d'Apolobama (Nevada Calolo 5315 m) dont l'altitude générale s'abaisse jusqu'à 4800 m. Au-delà, la limite du bassin se rapproche très près du lac (à 10 km du bord), son altitude s'abaisse à 4500 m. Ce rétrécissement du bassin est lié à la forte érosion régressive remontant le versant amazonien par le Rio Béni et pénétrant la cordillère au pied du massif de l'Illampu (7010 m) entre la Cordillère d'Apolobama et la Cordillère Royale. C'est là un point faible du bassin versant.

La bordure orientale se poursuit le long de la ligne de crêtes de la Cordillère Royale ou Cordillère La Paz, du Nevada Illampu au Nevada Chacaltaya; elle s'incline vers le sud et longe sur quelques kilomètres la bordure de l'Altiplano (4000 m) au niveau de La Paz.

Près de Calamarca, sur la route La Paz-Oruro, la bordure du bassin oblique vers le centre de l'Altiplano, peu large à cet endroit, qu'elle traverse d'est en ouest en longeant une ligne de sommets dont les altitudes oscillent entre 4500 et 4800 m. Cette bordure méridionale, ouverte au niveau de l'exutoire du lac à Desaguadero, est commune aux deux bassins des lacs Titicaca et Poopó.

La bordure occidentale suit du nord-ouest au sud-est la cordillère occidentale. Elle commence à la Cordillère de Vilcanota et rejoint la bordure méridionale. Les sommets de cette bordure ne dépassent pas 5500 m. Les rivières descendant vers l'océan Pacifique ont franchi dans leur partie amont la ligne de crêtes de la Cordillère Pécajes Garánjas, repoussant ainsi la bordure du bassin vers le flanc interne.

Le bassin versant possède un seul exutoire, le Rio Desaguadero. Celui-ci, dès sa sortie du lac, forme de grands marais s'étendant jusqu'au gué d'Aguallamaya. Des mesures faites au niveau de l'eau entre Desaguadero et Aguallamaya ont donné les mêmes altitudes (3810 m), ce qui expliquerait les inversions de courants occasionnelles à la sortie du lac.

Le point culminant du bassin est le Nevada

(1) Éditées par l'Institut Géographique Militaire de Bolivie.

(2) Éditées par l'Institut Géographique Militaire du Pérou.

Illampu (7010 m). Les parties les plus élevées sont ensuite les Cordillères Royale, d'Apolobama, de Carabaya et de Vilcanota. Le point le plus bas du bassin (3526 m) se situe au centre du lac, près de l'île Soto. Ce point représente aussi l'altitude minimale absolue de tout l'Altiplano; il est 127 m plus bas que le salar d'Uyuni (3653 m).

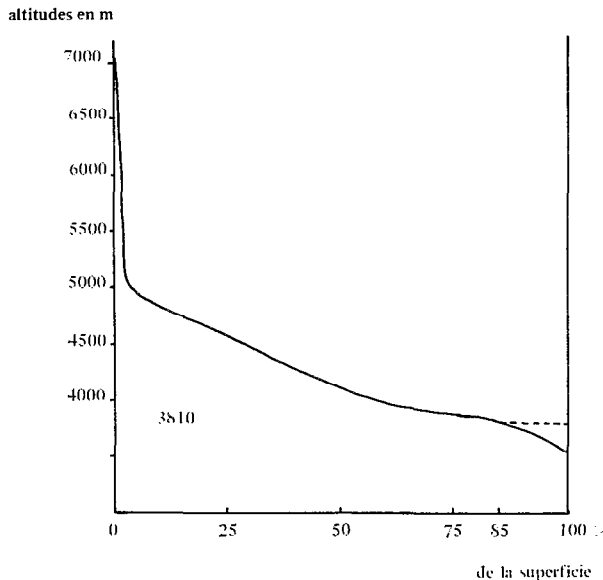


FIG. 2. — Courbe hypsométrique du bassin versant du lac Titicaca

L'hypsométrie générale du bassin, incluant la cuvette lacustre est représentée sur la figure 2; elle est établie en prenant pour plan de base l'altitude 3808 m qui correspond au 0 de l'échelle de Puno. Les résultats sont regroupés dans le tableau I :

TABLEAU I

Données hypsométriques du lac et de son bassin

	Altitude en mètres	% de la superficie du bassin, lac compris
Lac.....	3526-3808	15
Bassin.....	3808-4000	27
Versant.....	4000-4500	30
	4500-5000	25
	5000	3

Les principales caractéristiques du bassin sont :

— la surface : 57.340 km² (1) dont 8559 km² pour la cuvette lacustre. La partie amont du bassin du Rio Desaguadero représente 5220 km²;

— la longueur maximale prise sur le plus grand axe N.NW-S.SE est de 427 km; la largeur maximale est de 200 km;

— le périmètre est d'environ 1500 km.

1.2. Morphologie de la cuvette lacustre

1.2.1. SITUATION — LIMITES

La cuvette lacustre, partie du bassin versant limitée par la cote moyenne du plan d'eau, est comprise entre les coordonnées suivantes :

15°13'19" et 16°35'37" de latitude sud

68°33'36" et 70°02'13" de longitude ouest (fig. 3).

Son orientation est la même que celle du bassin (N.NW-S.SE).

Au nord et à l'ouest les limites sont peu précises, le niveau du lac se confondant avec celui des plaines d'inondation des principaux affluents : Rios Huancané, Ramis, Coata et Ilave. La limite orientale très nette suit une ligne de failles.

La cuvette lacustre se décompose en 2 grandes parties : le Grand Lac et le Petit Lac séparés par le détroit de Tiquina (largeur 800 m). Le Grand Lac comprend une partie centrale et quatre grandes baies : la baie de Puno, la baie de Copacabana, la baie d'Achacachi et la baie Ramis. Pour l'étude morphométrique, nous avons dissocié la baie de Puno du reste du Grand Lac. Le Petit Lac, appelé aussi lac Huñaimarca comprend trois parties : la partie nord face à Huatajata, la partie centrale séparée de la précédente par une ligne d'îles (I. Taquiri, I. Taco, I. Calahuta) et limitée au sud par la péninsule de Taraco, la partie sud ou baie de Guaqui dans laquelle se localise l'exutoire du bassin : le Rio Desaguadero.

1.2.2. INSULARITÉ

Les îles sont peu nombreuses et ne représentent que 1,3 % de la superficie totale. La proportion est plus forte dans le Petit Lac (4,2 %) que dans le Grand Lac (0,7 %). La plupart des îles sont orientées suivant l'axe principal de la cuvette.

1.2.3. LES COTES

Il est possible de distinguer 4 grands types de côtes :

- côtes à falaises — côtes basses inondables
- les plages à galets — les plages à sables.

(1) RUDOLPH (1940) 42.000 km². FORTI (1953) 57.500 km². MONHEIM (1956) 58.000 km².



FIG. 3. — Carte géographique du lac Titicaca

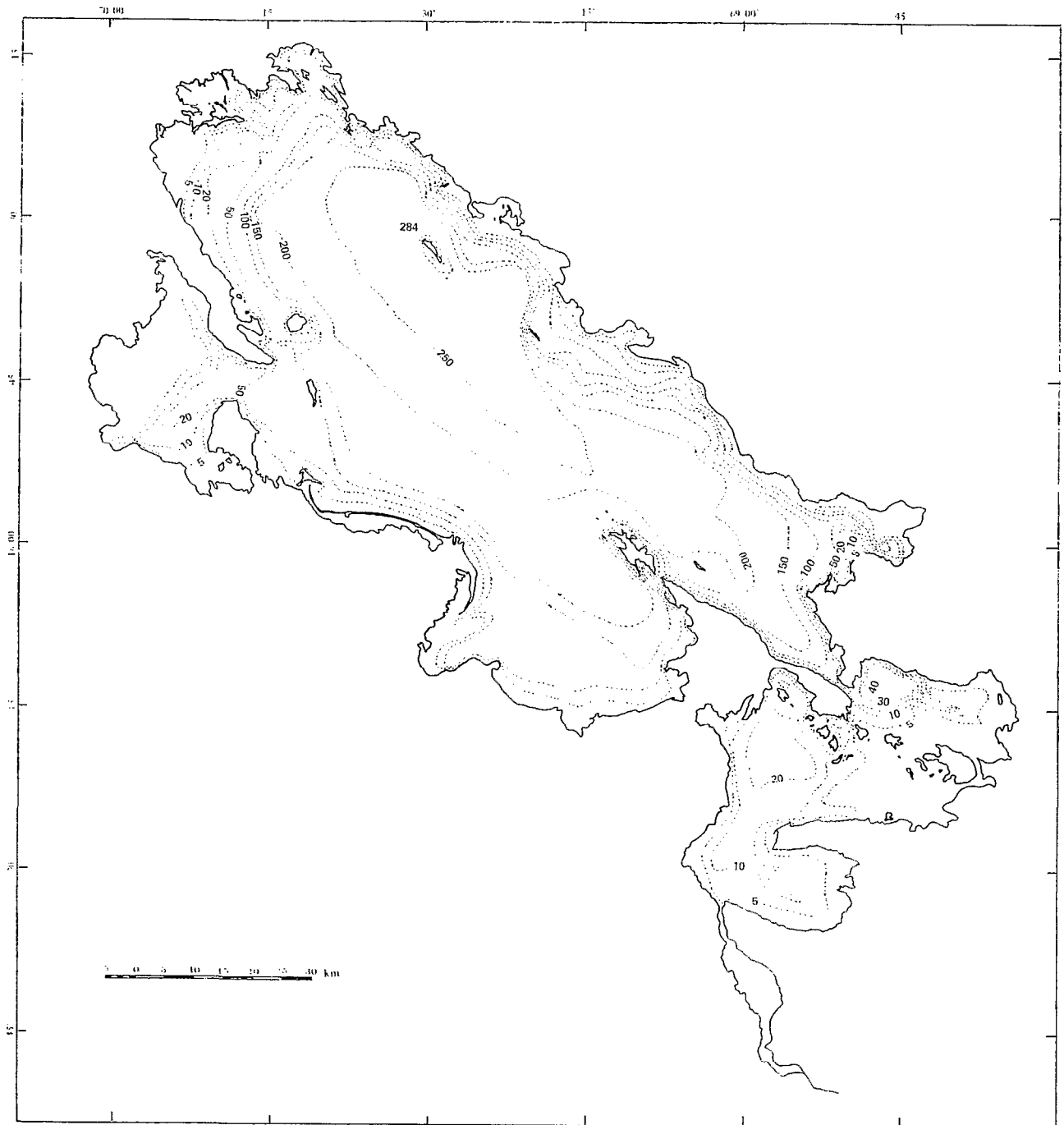


FIG. 4. — Carte bathymétrique du lac Titicaca

(a) *Les côtes à falaises*

La plupart des côtes, correspondant à des plans de failles, sont abruptes et forment des falaises dont l'assise s'enfonce rapidement dans le lac. C'est le cas de toute la côte orientale, de la presqu'île de Copacabana et des péninsules de Capachica et de Coapaya à l'entrée de la baie de Puno. Les îles ont aussi des côtes abruptes.

Le long de ces falaises les baies sont rares, de faible extension, peu profondes et peuplées de *tolora* (1) et d'algues (COLLOT 1980). Ces côtes n'offrent que peu d'abris pour la navigation.

(b) *Les côtes basses inondables*

Elles correspondent aux rivages bordant les plaines d'inondation des grandes rivières affluentes. Ce sont pour le Grand Lac au nord ouest les plaines des rios Huañané, Ramis, Coata, à l'ouest la plaine du Rio Ilave, à l'est la plaine du Rio Keka en bordure de la baie d'Achacachi. Du côté du Petit Lac, elles correspondent aux plaines des Rios Batallas et Tiwanaku.

Les rivages sont plats et la faible hauteur d'eau favorise dans ces zones un grand développement de macrophytes aquatiques et d'algues rendant la navigation très difficile.

(c) *Les plages à galets*

Les plages à galets sont peu nombreuses et n'apparaissent que là où les formations géologiques bordant le lac contiennent elles-mêmes des galets (Pliocène et Quaternaire). Ce sont dans le Petit Lac la bordure nord taillée dans les formations à galets du Pliocène entre Chua et Huatajata, les bordures d'une partie de la presqu'île de Copacabana et l'extrémité de la presqu'île de Taraco.

Dans le Grand Lac, l'unique zone de plage à galets reconnue est entre Juli et Copacabana.

(d) *Les plages à sable*

Pour le Petit Lac il n'y a guère que la côte située au pied du Cerro Capia et pour le Grand Lac, les côtes situées aux débouchés des Rios Suhez et Ilave.

Les sédiments sableux du Rio Ilave ont, sous l'influence dominante des vents et courants (N.NE-S.SW), formé deux cordons littoraux dans la baie de Copacabana. Une troisième cordon s'étire vers l'ouest et témoigne d'un déplacement probable de l'estuaire d'ouest en est.

Ces plages à sables comme celles à galets sont très ventées et ne peuvent présenter d'abris à la navigation que si elles sont protégées par les « totorales ».

1.2.4. RELIEF, BATHYMÉTRIE

La bathymétrie a été réalisée à l'aide d'un échosondeur RAYTHEON (Type DE 719) à profondeur d'investigation maximum de 120 m. Des données complémentaires ont été recueillies auprès des services d'Hydrographie Navale de Bolivie et du Pérou qui réalisent conjointement la carte du lac au 1/50 000. De plus chaque point de prélèvement d'eau ou de sédiments faisait toujours l'objet d'une mesure notamment aux grandes profondeurs.

La carte bathymétrique ainsi établie (fig. 4) montre que les profondeurs se répartissent suivant quatre classes :

- une zone de grande profondeur (> 200 m) : partie centrale du Grand Lac;
- une zone de profondeur moyenne (100 m) : la baie de Copacabana;
- des zones de faible profondeur (20 à 40 m) : une partie des baies de Puno et d'Achacachi dans le Grand Lac, les 2 parties profondes du Petit Lac;
- des zones de très faible profondeur (<5 m) : la plus grande partie du Petit Lac et des baies de Puno, d'Achacachi, Ramis dans le Grand Lac.

La zone profonde (>200 m) est directement en relation avec les failles affectant la cuvette dans le sens N.NW-S.SE. La baie de Copacabana est nettement isolée de cet ensemble.

Le seuil du détroit de Tiquina a une altitude de 3788 m (—20 m).

Le Petit Lac a deux zones profondes : l'une (— 40 m) dans la partie nord, l'autre (— 20 m) dans la partie centrale. Un réseau hydrographique sous-lacustre s'oriente vers chacune de ces fosses qui apparaissent ainsi comme deux unités lacustres anciennes indépendantes même du Grand Lac. Ce réseau hydrographique entaille les zones de profondeur inférieure à 5 m; celles-ci de pente faible et régulière apparaissent en tant que surfaces d'aplanissements (surfaces correspondant peut-être à la phase interlacustre Michin-Tauca) (LAVENU, 1981).

L'exutoire de Desaguadero n'est pas une entaille mais un seuil (— 5 m), c'est donc uniquement au-dessus de la côte (3803 m) que le lac et le cours supérieur du Desaguadero sont en relation. A la sortie du lac, le courant est faible, parfois même inverse (CARMOUZE et AQUIZE, 1981). Le véritable exutoire est plus au sud à Aguallamaya.

1.2.5. CARACTÉRISTIQUES MORPHOMÉTRIQUES

Les paramètres morphométriques sont calculés

(1) *Tolora*: Cypéracée caractéristique du lac.

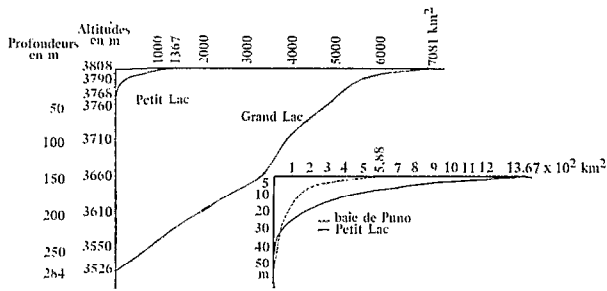


FIG. 5. — Relation surface-profondeur

— la baie de Puno et les zones de bordure au-dessus de — 20 m.

Le report sur graphique des données de volume en fonction de la profondeur (fig. 6) schématise l'aspect de la dépression. De plus, il rend compte du très faible volume d'eau du Petit Lac (1,4 % du volume total).

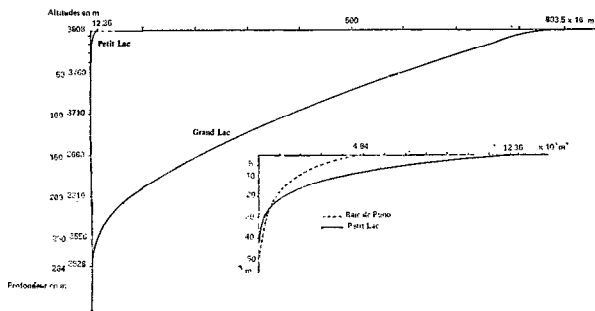


FIG. 6. — Relation volume-profondeur

Le lac Titicaca, par sa superficie (8559 km²) (1) se place au 21^e rang dans la classification mondiale des lacs. Les pentes, très accusées, soulignent son origine tectonique. La forme générale ($DC = 2.79$) est ellipsoïdique. La dépression (Z/Z_m), selon les rapports donnés par DUSSART (1966) est parabolique pour le Grand Lac (0,47) et conique très évasée pour le Petit Lac (0,21).

2. LE RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

Le réseau hydrographique est surtout développé dans les parties nord, nord-ouest et ouest du bassin (fig. 7). Les principaux tributaires sont au nombre de cinq : Ramis, Coata, Ilave, Huanané et Suhez.

Au contraire, au sud et au sud-ouest du bassin versant, les rivières qui aboutissent au lac sont de

taille modeste et, pour certaines d'entre elles, à écoulement intermittent : les Rios Keka, Catari, Tiwanaku...

2.2. Le Ramis et le lac Arapa

Le bassin du Ramis est l'unité géographique la plus importante du système fluvial. Il est situé 14°03' et 15°24' de latitude sud et 71°07' et 69°34' de longitude ouest. Il occupe 14.930 km², soit 30,8 % de l'ensemble du bassin versant, entre 3810 et 5800 m d'altitude.

Ce bassin comprend deux grands sous-bassins, celui d'Azangaro et celui d'Ayaviri qui s'étendent respectivement sur 8734 km² et 5640 km².

Les régions amonts du sous-bassin d'Azangaro sont limitées au nord-est par la cordillère d'Aricama et au nord par celle de Carabaya d'où descendent des cours d'eau qui se regroupent pour former le Rio Carabaya. Au nord-ouest le Rio Carahuinca rassemble les eaux qui s'écoulent de la cordillère Vilcanota. Ces deux rivières se rejoignent à 30 km en amont d'Azangaro.

Le sous-bassin d'Ayaviri s'appuie sur la cordillère occidentale. La rivière principale, le Rio Pucara draine l'ensemble des eaux dont la plus grande part est collectée en amont d'Ayaviri par le Rio Santa Rosa.

La branche la plus longue du système, Carabaya-Azangaro-Ramis, a une longueur de 283 km et une pente de 0,27 %. Son profil longitudinal est représenté dans la figure 8, ainsi que celui des deux autres principales branches Carahuinca et Santa Rosa.

Le bassin versant du lac d'Arapa peut être rattaché à celui du Ramis. Il occupe 642 km². Le lac lui-même a une superficie de 140 km².

2.3. Le Coata et l'Ilpa

Le bassin du Coata est situé entre 15°07' et 15°55' de latitude sud et 69°55' et 71°01' de longitude ouest et occupe 10,5 % du bassin versant du lac, soit 5128 km². Ses altitudes sont comprises entre 3810 m et 5400 m.

Il comprend deux sous-bassins, celui du Rio Cabanillas et celui du Rio Lampa qui occupent respectivement 2877 km² et 2249 km². Ils sont bordés à l'ouest par les glaciers de la cordillère occidentale qui culminent entre 5200 et 5400 m.

Le cours d'eau principal, Rios Verde, Cabanillas et Coata a une longueur de 180 km et une pente moyenne de 0,56 %.

La figure 9 représente le profil longitudinal du Coata et de ses principaux affluents.

(1) RECLUS (1893) 8300 km². NEVEU-LEMAIRE (1906) 5100 km². GILSON (1939) 7600 km². MONHEIM (1956) 8100 km².

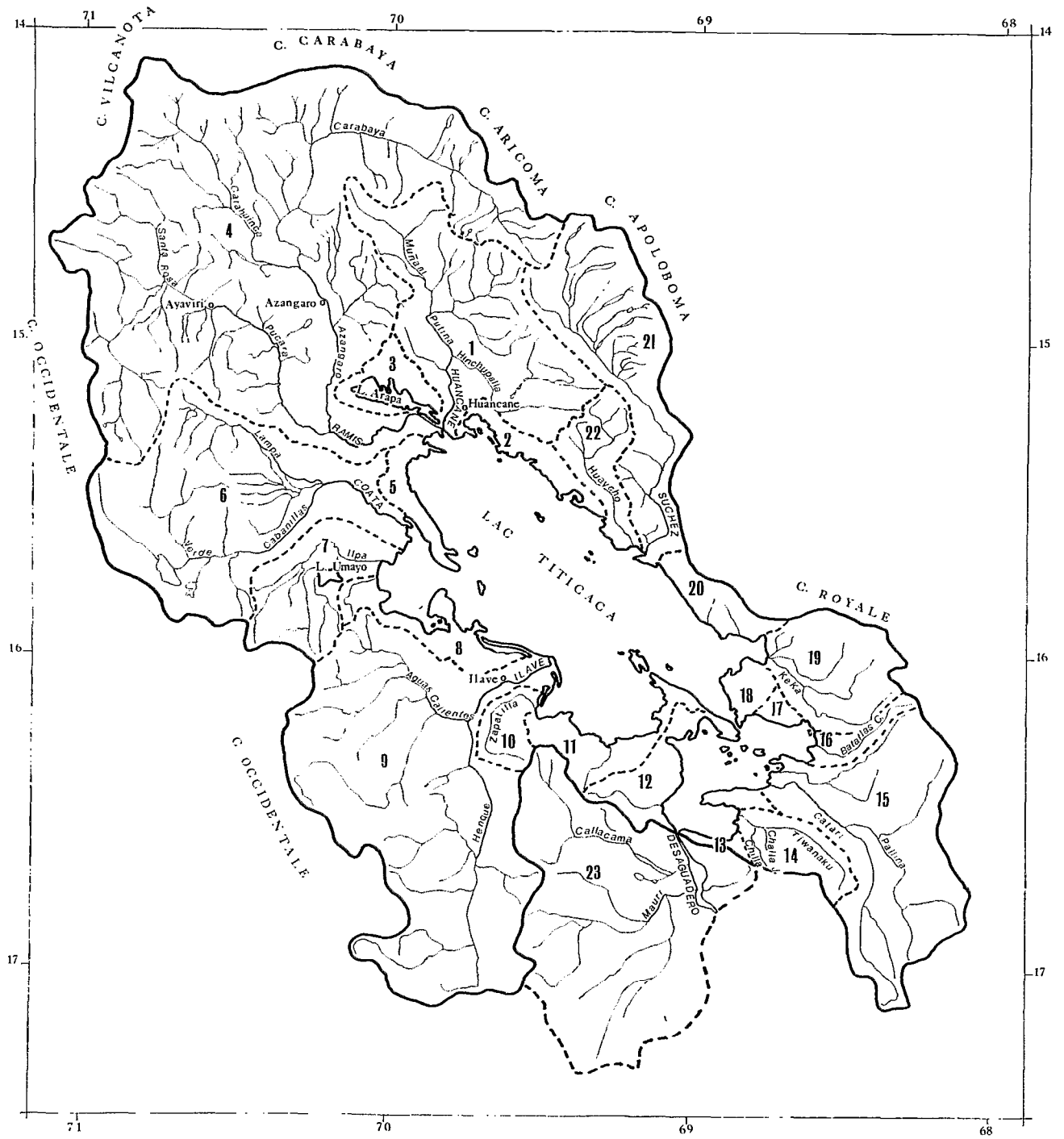


FIG. 7. — Réseau hydrographique

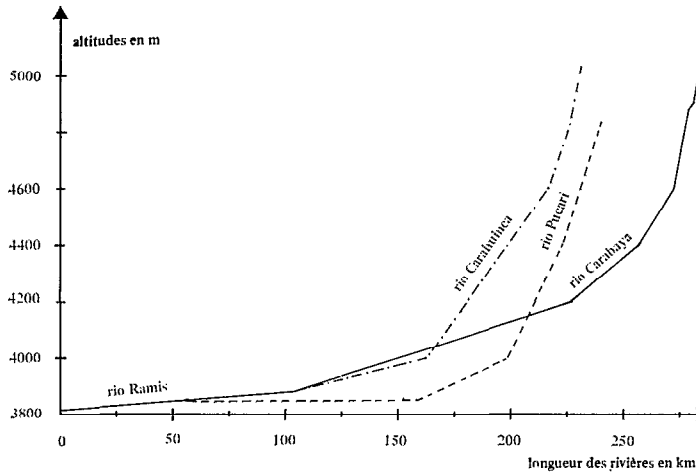


FIG. 8. — Profil longitudinal du Rio Ramis

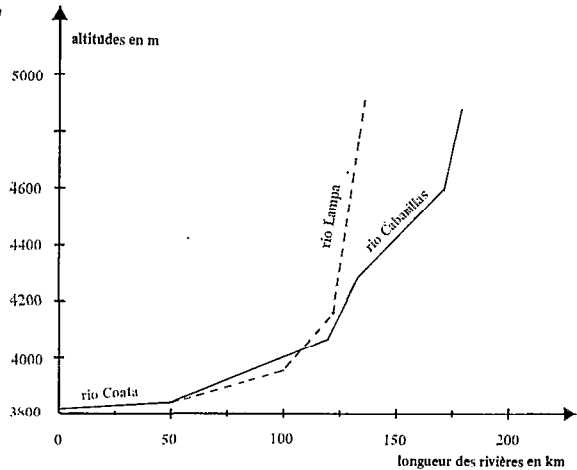


FIG. 9. — Profil longitudinal du Rio Coata

Le bassin du Rio Ilpa est situé entre 15°33' et 16°00' de latitude sud et 69°57' et 70°28' de longitude ouest. Il s'étend sur 1488 km². Le cours principal de la rivière a une longueur de 93 km et une pente de 0,89 %. A ce système est rattaché le lac Umayo qui a une superficie de 29 km².

2.4. L'Ilave et le Zapatilla

Le bassin du Rio d'Ilave est localisé entre 15°50' et 17°08' de latitude sud et 69°27' et 70°21' de longitude ouest. Sa superficie est de 8020 km², ce qui représente 16,5 % de la surface totale du bassin versant.

Il est composé de deux sous-bassins, celui du Rio Aguas Calientes et celui du Rio Henque qui s'étendent respectivement sur 3305 km² et 4076 km², limités à l'ouest par la cordillère occidentale qui ne dépasse pas 4800 m.

Le cours principal composé par les Rios Henque et

Ilave a une longueur de 138 km au niveau d'Ilave, qui se trouve à 24 km de l'embouchure, et une pente de 0,91 %.

La figure 10 illustre les profils longitudinaux des Rios Aguas, Calientes et Henque.

Le bassin du Rio Zapatilla, situé à l'ouest de celui d'Ilave n'occupe que 493 km². La longueur du rio est de 75 km.

2.5. Le Huancane

Le bassin du Rio Huancané est localisé entre 14°33' et 15°15' de latitude sud et 70°10' et 69°20' de longitude ouest. Il s'étend sur 4078 km², ce qui représente 8,4 % de la superficie totale du bassin.

Il comprend deux sous-bassins, celui du rio Inchupaya et celui du Rio Muñani qui occupent respectivement 1223 km² et 2355 km². Le premier culmine à 4800 m, le second à 4600 m.

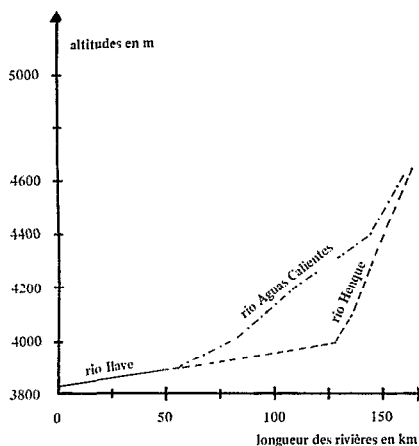


FIG. 10. — Profil longitudinal du Rio Ilave

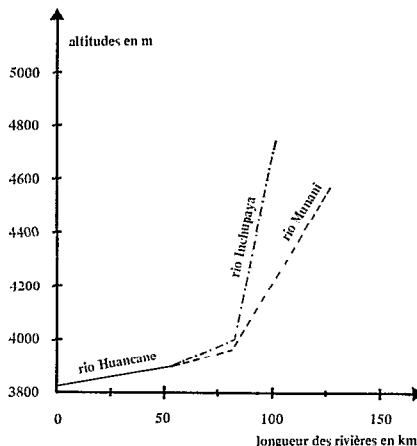


FIG. 11. — Profil longitudinal du Rio Huancane

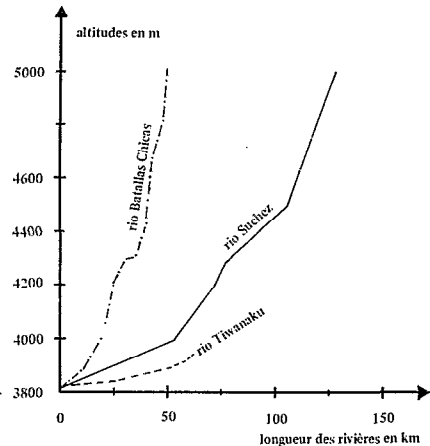


FIG. 12. — Profils longitudinaux des Rios Suchez, Tiwanaku et Batallas-Chicas

TABLEAU IV

Températures moyennes annuelles et oscillations en différentes stations du Bassin Versant

	T. moy.	T. moy. maxi.	T. moy. min.	Amplitude
AZANGARO.....	8.7	16.1	1.1	15.0
ALTO (el).....	7.5	13.9	0.9	13.0
BELEN (el).....	7.2	14.6	-0.6	15.2
CHUQUIBAMBILLA.....	6.6	16.3	-3.1	19.4
DESAGUADERO.....	7.9	14.9	0.9	14
LAGUNILLAS.....	6.3	14.2	-1.6	15.8
MAZO-CRUZ.....	4.3	15.7	-7.1	22.8
MOHO.....	8.9	14.8	2.9	11.9
PUNO.....	8.5	14.3	2.6	11.7
VIACHA.....	8	16.8	0.9	15.9

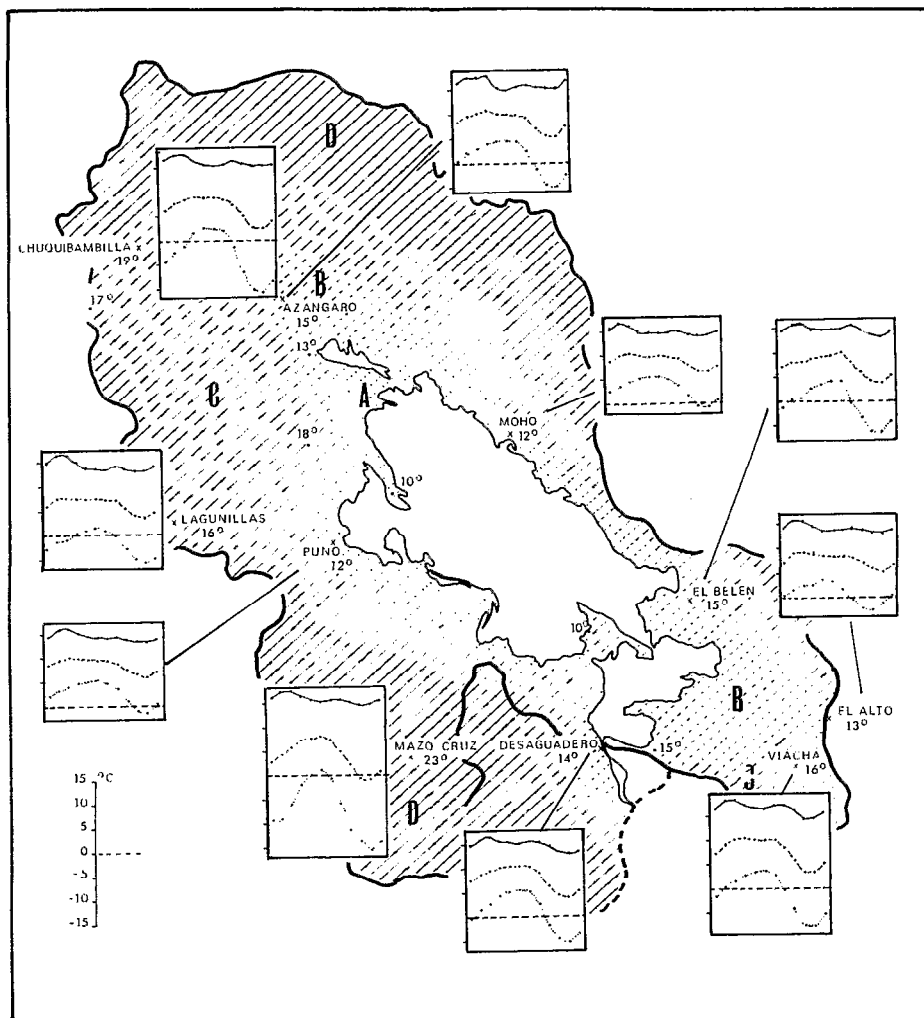


FIG. 13. — Amplitudes des températures et zones de répartition sur le bassin. Courbes des températures maximales, moyennes et minimales au cours de l'année de septembre à août

La branche principale, le Rio Muñani-Huancane, a une longueur de 125 km et une pente moyenne de 0,37 %.

La figure 11 représente les profils longitudinaux du Huancané et de ces deux principaux tributaires.

2.6. Le Suchez et le Huaycho

Le bassin versant du Suchez qui est localisé entre 14°39' et 15°4' de latitude sud et 69°00' et 69°35' de longitude ouest présente une surface étirée de 3114 km².

Les principaux cours d'eau descendent de la cordillère Apolobama qui culmine à 5915 m.

Le plus long d'entre eux a une longueur de 130 km et une pente relativement forte égale à 0,78 % (fig. 12).

Le Rio Huaycho a une taille plus modeste de 70 km de long, son bassin a une superficie de 870 km².

2.7. Les rios sud-est

Les Rios Keka et Batallas chicas descendent directement de la Cordillère Royale. Ils se caractérisent par de fortes pentes (fig. 12). En époque d'étiage, leur alimentation est assurée par les glaciers de la cordillère qui sont situés entre 5200 et 6000 m. Leurs bassins occupent respectivement 1545 et 358 km².

Les Rios Gatari et Tiwanaku sont principalement alimentés par des cours d'eau qui descendent d'une chaîne de montagne de 4600 à 4850 m d'altitude, située en bordure sud et sud-est de leurs bassins versants. Ces derniers occupent respectivement 3783 km² et 720 km². En époque d'étiage, certaines années, il y a assèchement total de ces rivières.

2.8. Le Mauri et le Callacame

Dans la mesure où ces deux rivières alimentent exceptionnellement le lac, elles appartiennent « en pointillé » au réseau hydrographique. Cela se produit au cours des années de bas niveaux du lac et à l'époque des fortes pluies tombant sur les bassins versants de ces rivières, c'est-à-dire, en janvier et février principalement.

L'ensemble des deux bassins s'étend sur 5220 km².

3. CLIMATOLOGIE

Une étude climatique de tout l'Altiplano serait vaste et complexe en raison du grand nombre de facteurs et de leur variabilité intervenant du nord au sud sur plus de 1000 km, et des interactions locales produisant des changements très brusques.

Peu à peu une telle étude pourra se réaliser grâce aux réseaux de stations des SERVICES NATIONAUX DE MÉTÉOROLOGIE ET D'HYDROLOGIE DE BOLIVIE ET DU PÉROU, qui, à défaut de tenir des données sur une large période, commencent à couvrir toute la zone. Ce chapitre n'a donc d'autre objet que de présenter les principaux éléments du climat actuel du bassin versant, notamment températures et précipitations.

Toutes les stations du bassin présentant des relevés pluviométriques complets sur une période de 14 ans, s'étendant en année hydrologique de septembre 1964 à août 1978, ont été prises en compte.

Par sa situation en zone tropicale, son altitude élevée (supérieure à 3800 m), par le mode de variations des températures et de distribution des précipitations, le bassin est soumis à un climat qui, selon la classification de THORNWAITE, rentre dans la catégorie des climats froids et semi-arides.

3.1. Température

3.1.1. LA TEMPÉRATURE MOYENNE

La température moyenne annuelle du bassin versant, pour les zones d'altitude inférieure à 4000 m, est approximativement de 7,9°C variant de 6,5°C dans les zones éloignées du lac (Chuquibambilla) à 9°C dans les zones proches du lac (Moho) (tableau IV). Cette température moyenne, si l'on tient compte de l'altitude et de la position du bassin, est élevée.

Selon de MARTONE (1950), au niveau de la mer dans cette zone, sous les latitudes comprises entre le 15° et le 17° parallèle, les températures se maintiennent entre 20° et 25°C. En appliquant le facteur de correction généralement admis (0°55 pour 100 m), à Puno la température moyenne devrait être proche de 0°C. Elle est à Puno de 8,5°C, à El Alto-La Paz de 8°C.

3.1.2. TEMPÉRATURES MAXIMALES ET MINIMALES

Les températures maximales les plus élevées sont enregistrées durant les mois d'été : 18° à 21° en janvier et février; les températures minimales les plus basses sont enregistrées durant les mois d'hiver : — 5°C aux abords immédiats du lac, inférieures à — 20°C à Mazo-Cruz en juin-juillet-août.

Par contre, si l'on se réfère à la moyenne mensuelle des températures maximales (fig. 13), celle-ci est plus élevée durant les mois de printemps (octobre et novembre) que durant les mois d'été, ce qui est dû à la durée d'ensoleillement réduite en été en raison de la nébulosité. Pour cette même raison, les courbes montrent un 2^e maximum durant les mois d'automne (avril et mai).

Les températures minimales, sévissant la nuit, ne

sont pas influencées par l'ensoleillement et les moyennes mensuelles sont en accord avec les saisons : très basses en hiver, plus élevées en été.

3.1.3. L'AMPLITUDE DES TEMPÉRATURES

L'amplitude annuelle des températures (tabl. IV) écart entre les températures moyennes annuelles maximales et minimales, permet de définir différentes zones climatiques ici au nombre de 4 (fig. 13) :

— *Zone A* : située aux abords immédiats du lac. L'amplitude moyenne s'y maintient vers 12° (Puno-Moho). Deux valeurs partielles indiquent 10° (Capachica-Copacabana).

Les températures maximales ne sont pas plus élevées et les températures minimales sont moins basses que celles enregistrées dans les zones d'altitude voisines mais plus éloignées du lac. Cela montre l'influence de l'action thermorégulatrice du lac.

— *Zone B* : étendue au nord-ouest et au sud-est du lac. L'amplitude y varie entre 13 °C et 15 °C (Azangaro, El Belén, El Alto, Desaguadero).

— *Zone C* : comprise entre les zones A et B et l'altitude 4000 m.

L'amplitude y atteint 16 °C à 19 °C (Chuquibambilla, Lagunillas, Viocha).

— *Zone D* : ce sont les régions les plus éloignées du lac et les plus élevées du bassin; l'amplitude y est supérieure à 20 °C (Mazo-Cruz).

3.1.4. LES GELÉES

Les gelées sont une conséquence directe de la

température de l'air. Il s'agit d'un phénomène normal durant toute l'année, en ce sens qu'elles peuvent survenir chaque mois, même durant les mois d'été. MORLON (1979), dans une étude couvrant la partie péruvienne de l'Altiplano, indique le nombre de décades libres de gelées pour des périodes de 5, 8 et 10 années. Il est ainsi possible de considérer des zones plus proches du lac (A et B) avec 60 à 180 jours sans gelées; des zones intermédiaires éloignées du lac mais d'altitude inférieure à 4000 m (C) avec 0 à 60 jours sans gelées; des zones éloignées du lac, d'altitude supérieure à 4000 m (D) avec gelées journalières.

3.2. Précipitations

C'est l'élément climatique pour lequel les données sont les plus complètes. Pour les stations prises en compte, les précipitations moyennes mensuelles sur 14 ans sont présentées dans les tableaux V et VI.

Les précipitations se répartissent au cours de l'année suivant 4 périodes :

- une période de fortes précipitations de décembre à mars (4 mois),
- une période de transition durant le mois d'avril,
- une période sèche de mai à août (4 mois),
- une période de transition de septembre à novembre (3 mois).

Mais la répartition est irrégulière suivant les endroits; ainsi dans la zone du lac (Moho-Puno-Taquile...) 72 % du volume total, correspond à la période de fortes précipitations, 22 % aux périodes de transition et 6 % à la période sèche; au pied de

TABLEAU V
Précipitations moyennes mensuelles stations du bassin versant

		S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
EL ALTO-LA PAZ.....	1947-78	36,1	34,2	48,0	101,8	138	112,9	65,1	29,2	15,7	3,6	8,4	17,5	611
ANANEA.....	1974-78	26,3	46,2	40,4	91,1	104,6	125,9	66,0	24,0	15,6	5,4	7,1	15,9	568
ANTAUTA.....	1974-78	47,2	69,0	86,0	108,9	107,2	135,4	105,5	43,4	24,0	11,0	14,5	24,8	777
AYAYIRI.....	1964-78	15,9	37,9	48,6	102,7	129,1	134,1	84,4	32,9	5,9	0,5	3,0	5,5	600
AZANGARO.....	1974-78	30,2	33,6	56,6	84,9	105,4	107,9	82,4	36,1	9,9	2,0	3,0	6,6	559
CARANILLAS.....	1964-78	27,7	44,3	49,4	108,2	139,5	137,6	111,3	31,8	9,2	0,5	1,2	5,3	666
CHUQUIBAMBILLA.....	1964-78	21,7	49,5	66,8	137,2	137,2	133,0	123,6	50,4	8,4	0,0	4,2	3,1	725
CRUCERO.....	1974-78	29,3	52,1	62,8	123,0	139,2	122,0	98,4	50,0	17,0	3,3	7,2	9,5	714
LAGUNILLAS.....	1962-78	28,0	26,2	46,5	99,0	153,5	145,4	111,3	35,7	13,0	0,9	2,3	11,0	673
LARAQUERI.....	1956-75	27,8	35,5	49,9	96,3	151,2	154,7	108,7	36,3	16,1	2,3	2,4	7,8	689
MAZO CRUZ.....	1974-78	12,8	11,9	36,6	85,3	166,0	114,3	76,0	18,5	5,9	0,9	0,6	3,6	533
NUÑO A.....	1974-78	31,7	54,4	62,3	111,2	149,7	136,0	96,4	32,1	10,7	2,3	7,3	15,6	710
PROGRESO.....	1964-78	28,3	37,9	60,1	85,9	117,8	109,3	95,2	39,5	9,7	0,9	3,4	5,9	594
PUCARA.....	1963-76	23,2	52,6	54,6	122,8	145,4	133,3	117,0	38,8	6,9	0,9	2,5	8,7	707
SANTA ROSA.....	1957-76	39,8	73,5	87,8	157,3	203,6	163,3	142,6	73,6	16,8	4,7	5,4	11,7	980
VIACHA.....	1957-76	39,8	29,8	52,8	101,1	134,8	123,8	72,1	40,9	19,8	3,3	5,7	20,3	645

TABLEAU VI

. Précipitations moyennes mensuelles. Stations utilisées pour le bilan des précipitations sur le lac Titicaca

		S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
ARAPA.....	1964-78	32,1	35,1	57,6	87,9	141,6	115,5	107,6	34,5	14,3	4,6	5,6	8,3	645
EL BELÉN.....	1964-78	20,3	38,5	31,0	68,2	85,8	81,5	43,8	19,4	16,5	3,1	6,8	8,1	426
CAPACHICA.....	1964-78	28,9	27,8	46,3	103,0	149,5	159,9	127,9	56,4	16,7	4,3	4,3	6,4	731
DESAGUADERO.....	1964-78	23,2	23,9	41,5	103,1	173,9	156,7	94,1	25,4	9,5	4,4	5,6	15,1	676
ESCOMA.....	1964-78	32,7	18,0	33,0	59,7	97,1	81,5	52,4	24,0	16,6	5,6	12,8	17,1	450
GUAQUI.....	1964-78	22,3	39,3	46,5	90,7	146,4	128,6	60,4	21,7	12,0	2,9	3,3	7,1	581
ILAVE.....	1964-78	35,3	25,3	38,9	88,4	145,1	128,8	98,3	34,0	15,9	5,1	3,4	23,6	644
JULI.....	1964-78	34,0	34,0	55,0	122,1	185,2	211,5	132,5	47,4	15,4	4,1	3,8	15,8	861
LLALI.....	1964-78	23,4	39,4	56,8	114,9	183,6	162,0	133,5	41,6	9,4	2,8	2,4	12,2	782
MOHO.....	1964-78	45,5	52,5	61,2	135,9	193,7	159,4	122,2	44,4	28,4	4,0	8,8	12,6	869
PIZAGOMA.....	1964-78	13,2	12,5	38,5	98,1	156,6	144,7	84,4	20,3	7,8	3,0	1,2	12,8	599
PUNO.....	1964-78	28,0	29,2	48,3	104,1	151,1	141,4	134,4	37,3	11,2	1,3	2,3	9,2	699
TAQUILE (Isla).....	1964-78	61,2	43,9	80,3	150,7	234,6	247,5	157,3	58,5	24,0	7,8	6,1	19,3	1091
URUS.....	1964-78	31,0	29,7	48,5	114,1	155,9	134,8	125,0	49,2	18,1	1,4	2,5	11,3	722
YUNGUYO.....	1964-78	39,3	34,7	47,9	113,3	183,2	167,1	104,9	32,8	20,4	5,1	8,8	20,6	773

la Cordillère Royale (Escoma-Belén), elle est respectivement de 65 %, 26 % et 9 %; vers la Cordillère Occidentale (Mazo-Cruz) elle est de 83 %, 15 % et 2 %.

Indépendamment du lieu, la hauteur maximum est enregistrée en janvier, la hauteur minimum en juin. C'est sur l'île Taquile qu'a été enregistrée la précipitation mensuelle maximale en janvier 1973 (491 mm). Pour un grand nombre de stations, la précipitation mensuelle maximale a été enregistrée en janvier 1976 : Copacabana (358 mm), Juli (331 mm), Ilave (282 mm), Urus (266 mm)... L'année 1975-76 fut l'année record pour la période considérée.

Outre la sécheresse normale des mois de mai et août, d'autres périodes sèches peuvent survenir par déficience ou par mauvaise distribution dans les précipitations. Une analyse fréquentielle pour 45 années d'observations aux stations de Puno et El Alto-La Paz montre qu'il ne paraît pas exister de cycles fixes : sans tenir compte des mois de la période sèche, 30 % des précipitations à Puno et 35 % à El Alto ont été inférieures à la moyenne.

C'est durant les mois de transition (septembre à décembre), que les sécheresses exceptionnelles sont les plus fréquentes. D'une analyse mensuelle, il résulte que le mois d'octobre a la plus grande fréquence de sécheresse (40 %) contre 20 à 30 % pour les autres mois.

3.2.1. PRÉCIPITATIONS SUR LE BASSIN

Les précipitations moyennes sont présentées sur la figure 14 où l'on peut distinguer :

— des zones à forte précipitation (> 800 mm) dans le secteur du lac (île Soto, île Taquile, Copacabana et à l'extrémité nord-ouest du bassin : col de la Raya) ;

— des zones à précipitation moyennement forte comprise entre 700 et 800 mm, situées au nord-est du bassin au-dessus de 4000 m,

— des zones à précipitation moyenne comprise entre 500 et 700 mm au centre et au sud-est du bassin,

— des zones à faible précipitation (< 500 mm) situées au pied de la Cordillère Orientale (Escoma, El Belén).

3.2.2. PRÉCIPITATIONS SUR LA SURFACE DU LAC (fig. 15).

Bien qu'approximatives, en raison du petit nombre de stations réparties sur les îles et les bords du lac, ces données ont été établies en vue du calcul du bilan hydrologique du lac (CARMOUZE *et al.*, 1981). Les isohyètes ont été tracées à partir des hauteurs de précipitations annuelles pour chacune des 14 années hydrologiques. Les surfaces délimitées ont été calculées par planimétrie. A chaque surface comprise entre deux isohyètes a été attribuée la précipitation moyenne de ces deux isohyètes.

Les volumes et hauteurs d'eau correspondants sont reportés dans le tableau VII.

Les précipitations moyennes sur le Grand Lac (945 mm) et sur le petit lac (792 mm) sont supérieures à la précipitation moyenne enregistrée pour l'ensemble du bassin qui se situe entre 650 et 700 mm.

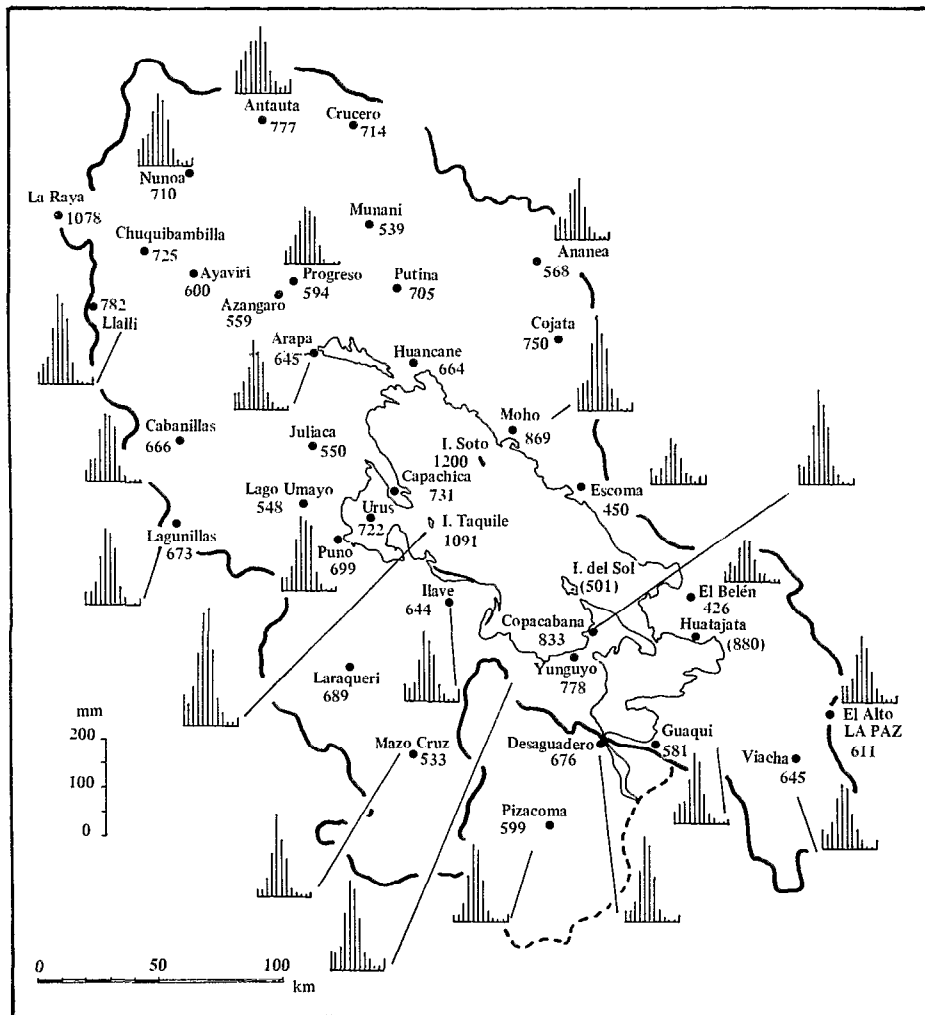


FIG. 14. — Répartition des précipitations sur le bassin du lac Titicaca

Depuis 1972-73 toutes les valeurs sont au-dessus de la moyenne. Dans ces mêmes années le niveau du lac est monté et s'est maintenu au-dessus de son niveau moyen (GARMOUZE *et al*, 1981).

Les précipitations les plus fortes se produisent sur le lac et probablement aussi sur les sommets. Les masses d'air humide et chaud provenant de l'Amazonie, se refroidissent en montant la Cordillère, ce qui augmente leur humidité relative provoquant de fortes précipitations sur les sommets. Descendant vers le lac, ces masses d'air se réchauffent, leur pression augmente, ce qui réduit leur humidité relative (effet de foehn); ainsi au pied de la Cordillère, les précipitations sont faibles (Escoma - El Belén - Muñani).

Avec sa température qui se maintient entre 10 °C et 12 °C, le lac a une action directe sur les précipitations. Il se forme des courants ascendants chauds et humides, spécialement durant la nuit alors que l'atmosphère est froide, courants qui augmentent l'humidité ambiante, et par conséquent les précipitations. C'est ainsi que les isohyètes les plus élevées se referment sur le centre du lac.

Sur le petit lac, les précipitations sont plus importantes dans le secteur des îles Paco et Taquiri que dans celui de Huatajata, de plus, les pluies proviennent souvent du S.SW (1).

Les vents, dont la dominance principale sur le grand lac est N.NW-S.SE, poussent les nuages et

(1) Informations recueillies auprès des paysans. Il est possible de cultiver du maïs dans l'île Paco mais non à Huatajata.

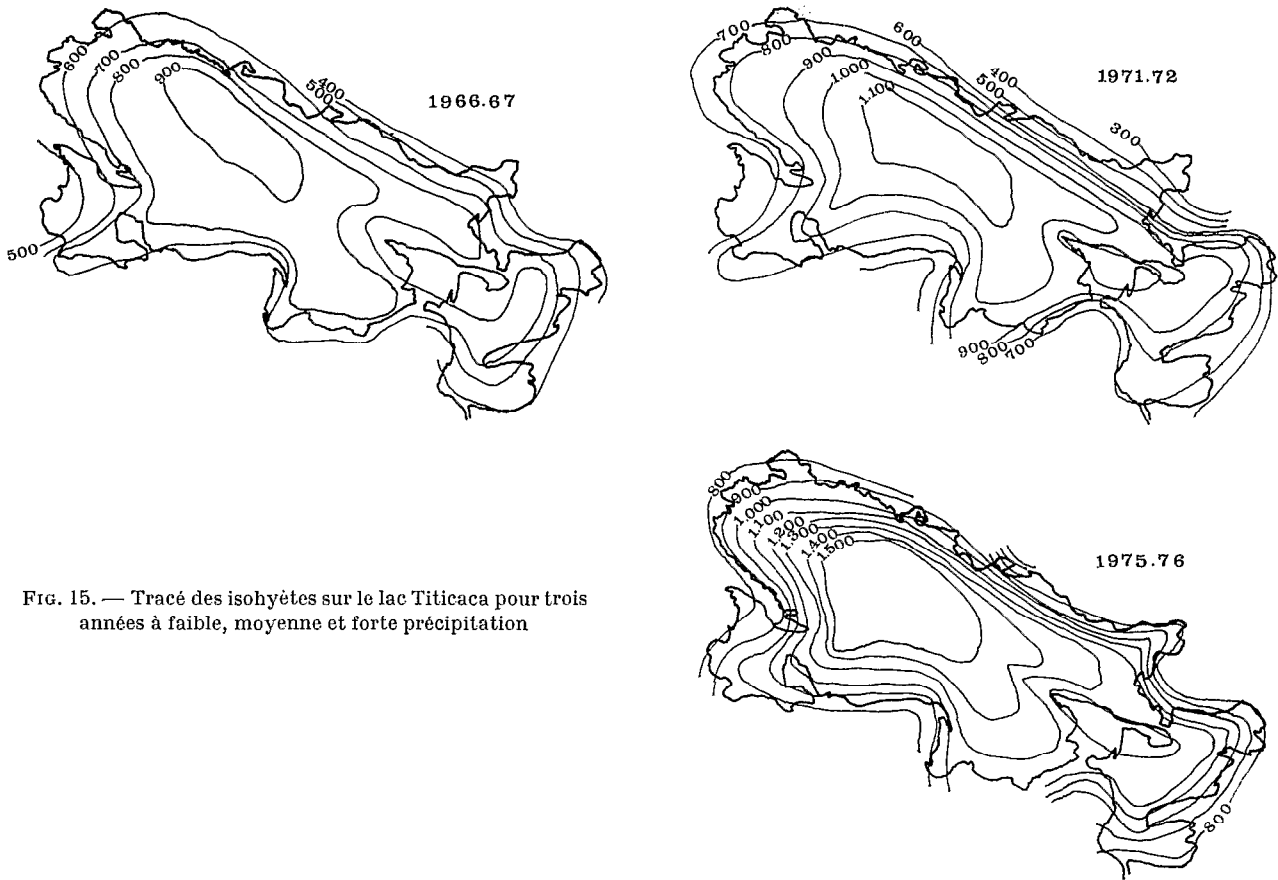


FIG. 15. — Tracé des isohyètes sur le lac Titicaca pour trois années à faible, moyenne et forte précipitation

TABLEAU VII
Précipitations sur le Lac de 1964 à 1978

	Grand Lac		Petit Lac	
	Volume × 10 ⁶ m ³	Précipitation en mm.	Volume × 10 ⁶ m ³	Précipitation en mm.
1964-65.....	6061	850	758	531
1965-66.....	5676	796	1088	762
1966-67.....	5412	759	890	623
1967-68.....	6524	915	1188	832
1968-69.....	5484	769	1007	705
1969-70.....	5477	768	883	618
1970-71.....	6104	856	1000	700
1971-72.....	6525	915	1162	814
1972-73.....	8315	1166	1399	980
1973-74.....	8222	1153	1265	886
1974-75.....	7195	1009	1299	910
1975-76.....	8928	1252	1502	1052
1976-77.....	7160	1004	1091	764
1977-78.....	7302	1024	1317	922
Moyenne.....	6739	945	1131	792
Superficie du lac en km ²	7131		1428	

masses d'air humide réchauffé en direction de la Baie de Copacabana et du détroit de Tiquina (1). Ces masses d'air passent vers le petit lac surtout au niveau de l'isthme de Yunguyo, elles se trouvent alors sous l'influence de vents de direction S.N. qui ont remonté la vallée du Desaguadero. Ces vents froids augmentent l'humidité relative des masses d'air et provoquent une ultime précipitation.

Les précipitations de ces dernières années (1972 à 1978) sont nettement supérieures à la moyenne; il semble que cette tendance se fasse sentir depuis 1931. C'est le cas de la station de Puno (fig. 16). Cette

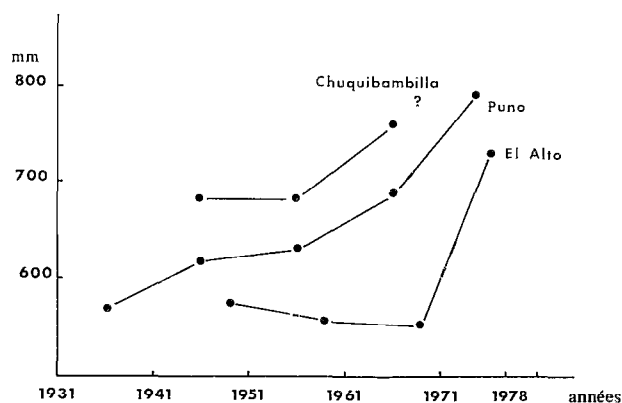


FIG. 16. — Moyennes décennales des précipitations. Stations El Alto-Chuquibambilla-Puno

augmentation pourrait se trouver liée à un léger réchauffement général qui se marque par le recul des glaciers et les fortes précipitations sur le lac.

Si cette tendance se confirmait il serait nécessaire d'en suivre exactement l'importance afin de prévoir les conséquences futures quant aux variations de niveau du lac.

3.2.3. ENSOLEILLEMENT. RAYONNEMENT SOLAIRE

Les données ne sont que partielles et fragmentaires sur l'ensemble du bassin. Nous n'en présentons que quelques-unes prises à la station de Puno.

La moyenne mensuelle des heures d'enseillement pour une période de 15 ans (1964-1978) est présentée dans le tableau VIII.

Durant les mois d'été et malgré que les jours soient plus longs, le temps d'enseillement est moindre en raison d'une forte nébulosité.

Un premier essai pour calculer l'intensité du rayonnement solaire a été fait à partir de données recueillies sur un Actinograph Fuess. Il a été relevé

TABLEAU VIII

Ensoleillement moyen (heures/jour) à Puno de 1964-1978

Septembre	9.0	Janvier	5.8	Mai	9.1
Octobre	9.2	Février	5.8	Juin	9.4
Novembre	8.5	Mars	6.6	Juillet	9.7
Décembre	6.8	Avril	8.5	Août	9.1

TABLEAU IX

Quantité de radiations solaires. Moyenne mensuelle en Cal/cm²/jour à Puno en 1978

Septembre	555	Janvier	513	Mai	471
Octobre	577	Février	494	Juin	464
Novembre	579	Mars	480	Juillet	445
Décembre	552	Avril	524	Août	525

pour l'année 1978 une moyenne journalière de 520 cal/cm² dont la répartition mensuelle est donnée dans le tableau IX.

4. CONCLUSION

Dans cette présentation géographique du lac Titicaca, nous nous sommes attachés à préciser certaines données concernant le bassin versant et la cuvette lacustre. Cela a été rendu possible en raison du nombre d'observations plus important sur le bassin et sur le lac, et de données climatiques plus abondantes et précises que n'avaient pu en disposer GILSON (1964) et MONHEIM (1956).

Le bassin versant du lac Titicaca est limité par les lignes des crêtes des Cordillères orientale et occidentale, sauf dans la partie sud où sa bordure, commune avec le bassin du lac Poopó, traverse l'Altiplano. Le lac de forme ellipsoïdale est une profonde dépression conique d'origine tectonique (LAVENU 1981), ouverte au niveau d'un seuil (Desaguadero) vers le lac Poopó. Ce seuil est le seul exutoire du lac.

L'effondrement de la cuvette actuelle s'est produit après les épisodes lacustres du Ballivian et du Michiu, ce qui explique la discontinuité des profils d'équilibre des rivières au niveau 4000 m : la partie amont est très abrupte et la prairie aval très plate : les zones inondables aux abords du lac sont étendues.

Le climat est un climat de montagne semi-aride dont les effets sont influencés par le lac : températures plus douces et amplitudes moins fortes aux abords du lac, précipitations beaucoup plus élevées à la surface du lac que sur les flancs du bassin soumis à l'effet de foehn.

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

(1) Deux années de relevés à la station de l'île du Soleil ne sont pas significatives, mais permettent cependant d'indiquer que les précipitations paraissent inférieures à celles de Tiquina et de Copacabana.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AQUIZE (J. E.), 1975. — Climatología del cultivo de la Quinua, *in curso de Química, IICA*. Lima Peru : 119-127.
- CARMOUZE (J.-P.) et AQUIZE (J. E.), 1981. — La régulation hydrique du lac Titicaca et l'hydrologie de ses tributaires. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14 (4) : 311-328.
- COLLOT (D.), 1980. — Les macrophytes de quelques lacs andins (Lac Titicaca, Lac Poopo, Lacs des Vallées d'Hichu Kkota et d'Ovejhujo). *Rapp. multigr.*, 115 p.
- DUSSARD (B.), 1966. — *Limnologie. L'étude des eaux continentales*. Gauthier-Villars, Paris 676 p.
- GILSON (H. C.), 1939. — The Percy Sladen Trust Expedition to lake Titicaca in 1937. *Trans. Limn. Soc. London*. (Sér. 3), 1 : 1-357.
- GILSON (H. C.), 1964. — Lake Titicaca. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 15 : 112-127, Stuttgart.
- HUTCHINSON (G. E.), 1957. — *A Treatise on Limnology*. Vol. I., *Geography, Physics, and chemistry*. John Wiley & Sons. New York.
- KESSLER (A.), 1963. — Über Klima und Wasserhaushalt des Altiplano (Bolivien-Peru) Während des Hochstaudes der letzten Vereisung. *Erdkunde*, 17 : 165-173.
- KESSLER (A.), 1970. — Über dem Jahresgang der potentiellen Verdunstung in Titicacabecken. *Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B*, 18 : 239-252.
- KESSLER (A.), MONHEIM (F.), 1968. — Der Wasserhaushalt des Titicacasees nach neueren Messergebnissen. *Erdkunde, Arch. für wissensch. geogr.*, 22 (4) : 275-283.
- LAVENU (A.), 1981. — Origine et évolution néotectonique du lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14 (4) : 289-297.
- MARTONE (E. de), 1950. — *Traité de géographie physique. I. notions générales, climat, hydrographie*. Paris, 496 p.
- MONHEIM (F.), 1956. — Beiträge zur klimatologie und hydrologie des Titicacabeckens. *Selbstvel. d. Geographi. Int. de Univ. Heidelberg*, 152 p.
- MORLON (P.), 1979. — Apuntes sobre el problema agronomico de las helada. El aspecto meteorologico. *Can. para el desar. intern. Conv. Peru - Canada. Mini. agr. y Alim. Puno. Rapp. multigr.*, 54 p.
- NEVEU-LEMAIRE (M.), 1906. — *Les lacs des Hauts Plateaux de l'Amérique du Sud*, Paris.
- PÉGUY (Ch. P.), 1970. — *Précis de Climatologie*. Masson Paris, 468 p.