

LE LAC TITICACA

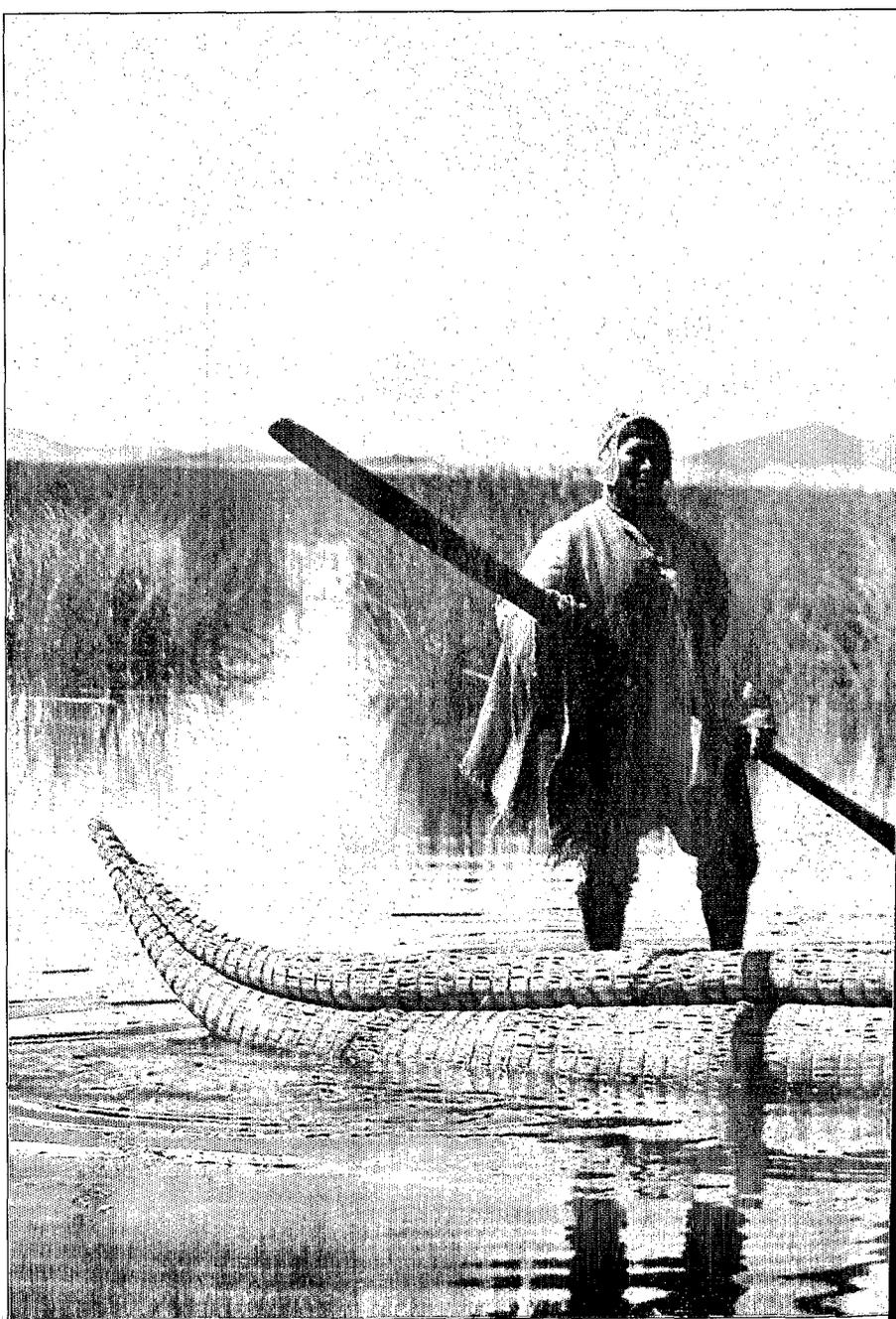
SON SEUL NOM ÉVOQUE À LA FOIS LES GRANDES ÉTENDUES DÉSERTIQUES DE L'ALTIPLANO ET LES PLUS HAUTS SOMMETS DES ANDES. LAC SACRÉ DES INCAS, LE LAC TITICACA REPRÉSENTE POUR LES INDIENS LE LIEU DES ORIGINES DE L'HUMANITÉ. POUR LES SCIENTIFIQUES QUI VIENNENT D'EN ACHEVER L'ÉTUDE, SA SITUATION GÉOGRAPHIQUE À LA CHARNIÈRE D'UN VERSANT PACIFIQUE SEC ET ARIDE ET D'UN VERSANT AMAZONIEN HUMIDE ET LUXURIANT, SON HYDROLOGIE PARTICULIÈRE ET SA FAUNE RICHE EN ESPÈCES ENDÉMIQUES EN FONT UN ÉCOSYSTÈME PARTICULIÈREMENT ORIGINAL.

CLAUDE DEJOUX

Sur l'un des plus beaux lacs du monde, le lac Titicaca, Ramón Catari, pêcheur aymara, pousse avec difficulté sa « balsa de totora » déjà vieille et imbibée d'eau dans la ceinture végétale où il a tendu hier soir quelques dizaines de mètres d'un filet dont les trous sont presque aussi nombreux que les mailles (fig. 1). A ses pieds, dans une cuvette cabossée, frétille quelques *Orestias* de petite taille et deux ou trois « suches » (*Trichomycterus*). Maigre fretin, mais qui accompagnera favorablement au repas de midi, le riz ou la quinoa, cette graminée native de l'Altiplano, plus riche en protéines que le mil.

Cette nuit encore, le ciel est resté infiniment clair et le thermomètre est descendu bien au-dessous de zéro. Une légère pellicule de glace s'est formée le long du rivage, dans quelques anses abritées par les roseaux. Des eaux libres, dont la température ne descend presque jamais en dessous de 11 °C, même au plus fort de l'hiver, monte un léger brouillard qui s'effiloche rapidement sous l'effet des premiers rayons du soleil. Une nouvelle journée commence sur le lac sacré des Incas.

Il est évident que dans son grand axe, le plan d'eau du lac Titicaca semble infini et les côtes opposées ne sont pas visibles. Que ce soit donc par son étendue (de l'ordre de 8 560 kilomètres carrés), ou bien en raison de ses eaux profondes reflétant le ciel bleu de l'hiver ou sombre de l'été pluvieux, le lac Titicaca est impressionnant. Vénéralisé des Incas, qui le considéraient comme sacré, le lac était dans leur cosmologie un lieu privilégié. C'est là où, pour eux, finissait le monde et où commençait l'éternité. C'est là qu'était accumulée la mémoire d'une race. Le lac avait toujours existé dans les souvenirs les plus lointains et cette mer intérieure était perçue comme une « chamaca », c'est-à-dire une masse d'eau sans fond où s'accumulaient les apports des fleuves et les eaux du ciel pour s'écouler, par l'intérieur, vers la



mer ! C'était un énorme trou qui faisait donc communiquer le ciel d'où viennent les pluies avec l'immense océan sur lequel flotte la terre ; un point nodal du monde permettant le passage des eaux dans les deux sens, qui eut un rôle régulateur quand la terre fit un demi-tour sur elle-même et qu'il y eut mélange de toutes les eaux existantes, au moment du grand déluge⁽¹⁾...

Mais dans la langue aymara, « chamaca » est aussi un terme qui désigne, dans la succession des âges, la toute première humanité. Et là se mêlent, dans une perception incertaine du temps : déluge, création des astres, naissance des hommes... En effet, plusieurs récits et la tradition orale placent le lac Titicaca

et le site tout proche de Tiwanaku à l'origine de la seconde création, après que la première humanité, disparue dans les ténèbres, a été détruite par le déluge universel⁽²⁾. C'est dans cette nuit des temps, au sens propre et figuré, qu'intervint le dieu Wiracocha pour réorganiser l'espace et procéder à la nouvelle création, à la fois des astres et de l'humanité. Selon la cosmogonie inca, il créa d'abord le Soleil depuis l'île Titicaca et la Lune depuis l'île Coati, îles que l'on nomme depuis, respectivement, îles du Soleil et de la Lune... et dans cet espace retrouvé naquit l'humanité.

De nos jours, le lac a gardé son caractère sacré, à la fois dans une dimension strictement religieuse (les pèlerinages à

Copacabana, petite ville de la côte ouest, rassemblent toujours les foules bigarrées des Aymaras et Quechuas qui viennent y recevoir la bénédiction de la vierge locale), mais aussi dans une dimension de croyance païenne. Nombreux sont les Indiens qui ont vu le « monstre du lac » et les derniers sacrifices humains, faits aux dieux du Titicaca, ne sont pas si éloignés si l'on en croit des rumeurs locales signalant qu'en 1986 une immolation perpétrée près du rivage du lac aurait contribué à provoquer la baisse de ses eaux ! Quand les pluies se font rares, quelques crapauds sacrés (*Telmatobius*) placés dans des jarres de terre, au sommet de l'île du Soleil, attirent par leurs cris la précieuse eau du ciel...

Figure 1.

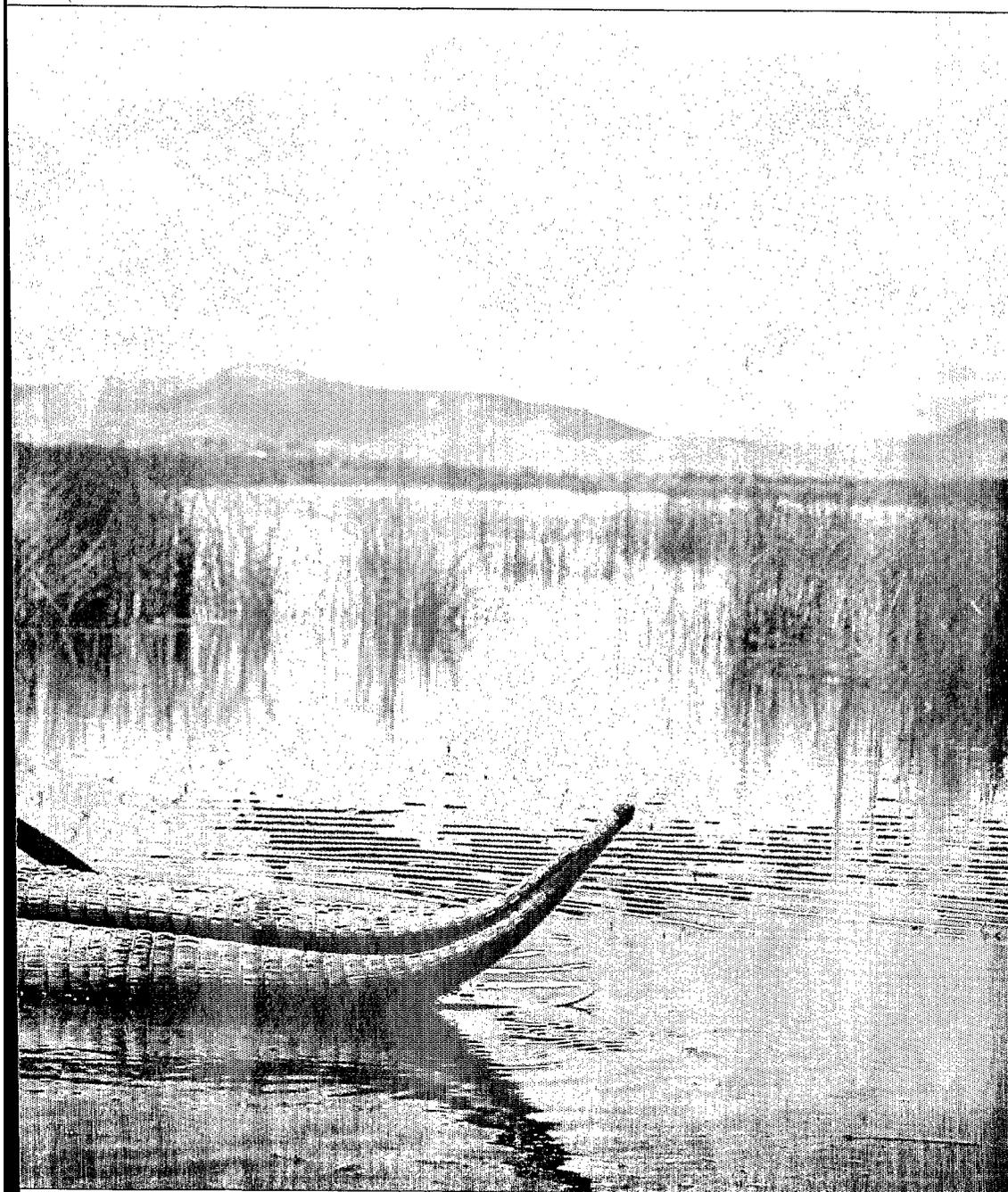
Le lac Titicaca fait partie des grands lacs anciens du monde, au même titre que le lac Baïkal de Russie.

Il représente une masse d'eau d'environ 896 millions de mètres cubes, pour une superficie totale de 3 559 kilomètres carrés. Ce paysage est caractéristique de son bassin sud, aussi appelé « petit lac » ou lac Huiñaimarca, ou Wiñaymarka en langue pukina parlée par le groupe ethnique des Collas. Ce bassin peu profond, où se trouvent de nombreuses îles, est bordé d'une ceinture végétale formée de macrophytes immergés et des fameux roseaux appelés localement totoras

(*Shoenoplectus tatora*). Les barques traditionnelles des pêcheurs aymaras, appelées « balsas », sont faites d'un assemblage de ces tiges de totora, séchées au soleil et assemblées selon une technique particulière qui leur donne une forme caractéristique, renflée au centre, amincie et relevée aux deux extrémités.

L'exploitation par l'homme des macrophytes aquatiques est très originale. Ils sont utilisés comme nourriture du bétail et représentent une source importante de revenus de revenus au même titre que la pêche.

(Cliché auteur)



CLAUDE DEJOUX est directeur de recherche en hydrobiologie à l'Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM). Il a étudié durant quatre années les macro-invertébrés du lac Titicaca et de l'Altiplano bolivien. Il occupe actuellement la fonction de représentant de l'ORSTOM au Mexique.

De manière certes plus prosaïque, mais aussi plus rigoureuse, les scientifiques se sont aussi intéressés à l'histoire du lac Titicaca et à sa genèse, pour en conclure qu'il fait véritablement partie de la catégorie des grands lacs anciens du monde, au même titre que le lac Baïkal de Russie, le lac Tanganyika d'Afrique, ou le lac Biwa du Japon. Ces lacs, où la vie s'est installée voici des millions d'années, évoluant lentement sous l'influence des grands changements climatiques ayant affecté la Terre, représentent de véritables témoins de l'histoire de notre planète. Dans leur bassin ou dans les

profond que les grands lacs tectoniques d'Asie comme le Baïkal (1 740 mètres) ou d'Afrique comme le Tanganyika (1 435 mètres) ou le Malawi (706 mètres). Sa profondeur est de l'ordre de celle des grands lacs nord-américains, mais il est beaucoup moins vaste et ses eaux ne gèlent jamais. S'intéressant tout d'abord à la géodynamique des Andes, ils ont effectué ensuite de nombreux travaux portant sur le lac lui-même et sur son bassin, étudiant successivement ses caractéristiques abiotiques : genèse⁽³⁾ paléohydrologie^(4,5), hydrochimie⁽⁶⁾, hydrologie^(7,8), mais aussi

ment son altitude actuelle. A peine émergée des océans, cette énorme masse montagneuse n'a cessé d'être le siège de grands mouvements tectoniques. Plissements, failles, déformations diverses ont résulté d'immenses forces de compression ou d'extension qui se sont poursuivies pendant plus de deux millions d'années, durant tout le Quaternaire (fig. 2).

Entre les cordillères orientale et occidentale, qui culminent à plus de 6 000 mètres, s'est formé un vaste plateau, à une altitude moyenne de 4 000 mètres : l'Altiplano bolivien-péruvien. Bassin

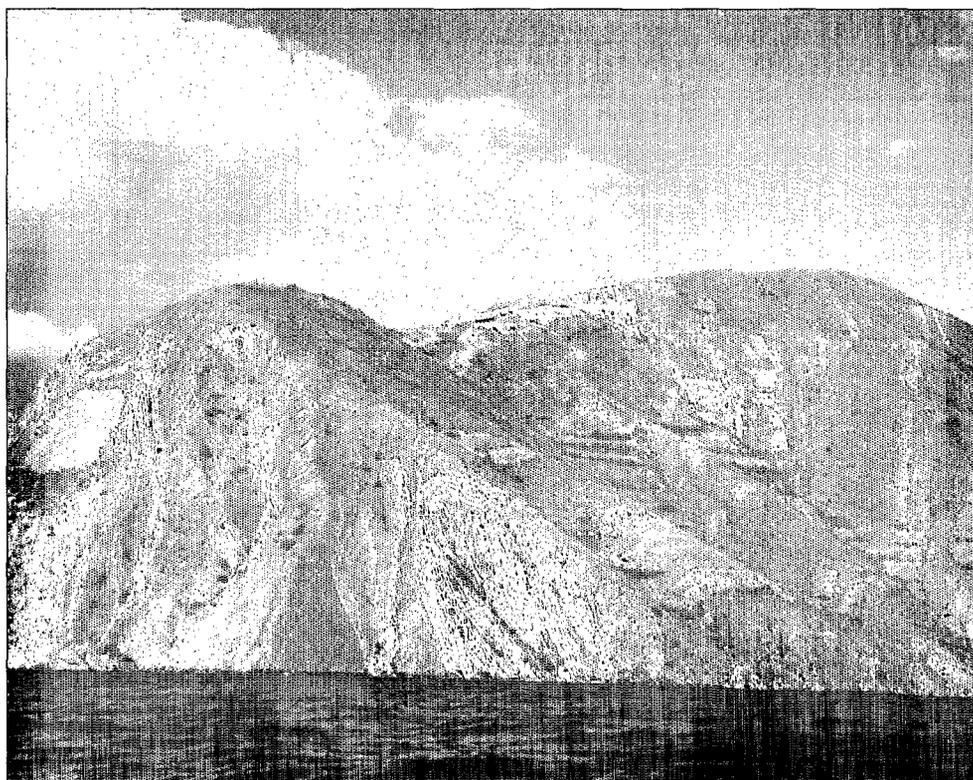


Figure 2. Il y a plus de trois millions d'années, des forces énormes résultant de la dérive des continents ont provoqué le soulèvement de la chaîne des Andes. La côte du bassin nord du lac Titicaca est en maints endroits particulièrement abrupte, surplombant le plan d'eau de parfois plusieurs centaines de mètres comme on peut le voir ici. Un relief similaire se rencontre sous l'eau, et de nombreuses îles comme celles de la Lune ou du Soleil ont leur base très proche de leur point d'émergence, à plus de 150 mètres de profondeur. (Cliché auteur)

Figure 3. Grâce à l'analyse des dépôts sédimentaires, les géologues sont en mesure de retracer les grandes lignes de l'histoire du lac Titicaca durant le Quaternaire. Ce schéma représente la succession des événements lacustres et tectoniques qui ont marqué l'évolution des masses d'eau accumulées sur l'Altiplano dans l'échelle géologique, en relation avec les principales périodes de glaciation. La distribution en altitude des différents lacs ayant occupé l'Altiplano bolivien-péruvien y est schématisée, du lac Mataro au lac Titicaca.

sédiments de leur cuvette actuelle nous retrouvons les fossiles, pollens ou restes d'animaux, qui tracent par leur succession l'évolution d'une partie de la vie terrestre, permettant de mieux comprendre l'origine et la structure des peuplements actuels.

Dans le cadre d'un accord de coopération internationale avec la Bolivie, amorcé voici plus de vingt ans, les chercheurs de l'ORSTOM ont prêté une attention toute particulière à cet écosystème aquatique qui, par le jeu de sa position en altitude et en latitude, présente à la fois les caractères d'un lac alpin et ceux d'un lac tropical profond. Si l'on associe cet ensemble de paramètres à sa très grande taille, on se trouve en effet en face d'un écosystème lacustre unique au monde. Il est par exemple beaucoup plus vaste que tous les lacs d'altitude comme le Nam Tso du Tibet situé à plus de 4 400 mètres d'altitude, mais il est nettement moins

sa flore algale^(9,10) et sa végétation supérieure⁽¹¹⁾, son zooplancton⁽¹²⁾, ses macro-invertébrés⁽¹³⁾ et ses poissons^(14,15). En partant donc d'études qui initialement ne concernaient que les géologues spécialistes de la formation des Andes, des recherches pluridisciplinaires ont progressivement été effectuées sur le lac lui-même. Souvent fondamentales dans leur contexte individuel, ces recherches représentent maintenant un ensemble indispensable à l'exploitation de l'ichtyofaune du lac, de sa végétation aquatique ou des ressources en eau. La récente synthèse de ces connaissances, publiée par les chercheurs de l'ORSTOM, représente une base de données indispensable à la gestion, mais aussi à la préservation de cet écosystème lacustre.

L'histoire géologique du lac Titicaca commence voici quelque trois millions d'années quand, à la fin du Pliocène, la cordillère des Andes atteignit pratique-

sans exutoire vers la mer (endoréique), cette vaste région encaissée accumula les eaux de pluie pour donner lieu à la formation d'un hydrosystème lacustre d'altitude. On en identifie les traces dans les importants sédiments du Pliocène andin datant de plus de trois millions d'années ; ils témoignent de l'existence, à cette époque, d'un climat relativement chaud et humide.

La première glaciation se situant à la fin du Pliocène, la transition avec le Quaternaire correspond donc à un brusque refroidissement. Suit ensuite une alternance de glaciations et de longues périodes de réchauffement qui a occasionné de fortes variations d'amplitude de la masse d'eau accumulée sur l'Altiplano, induisant, tout au long du Quaternaire, des changements importants de superficie et d'emplacement des milieux lacustres.

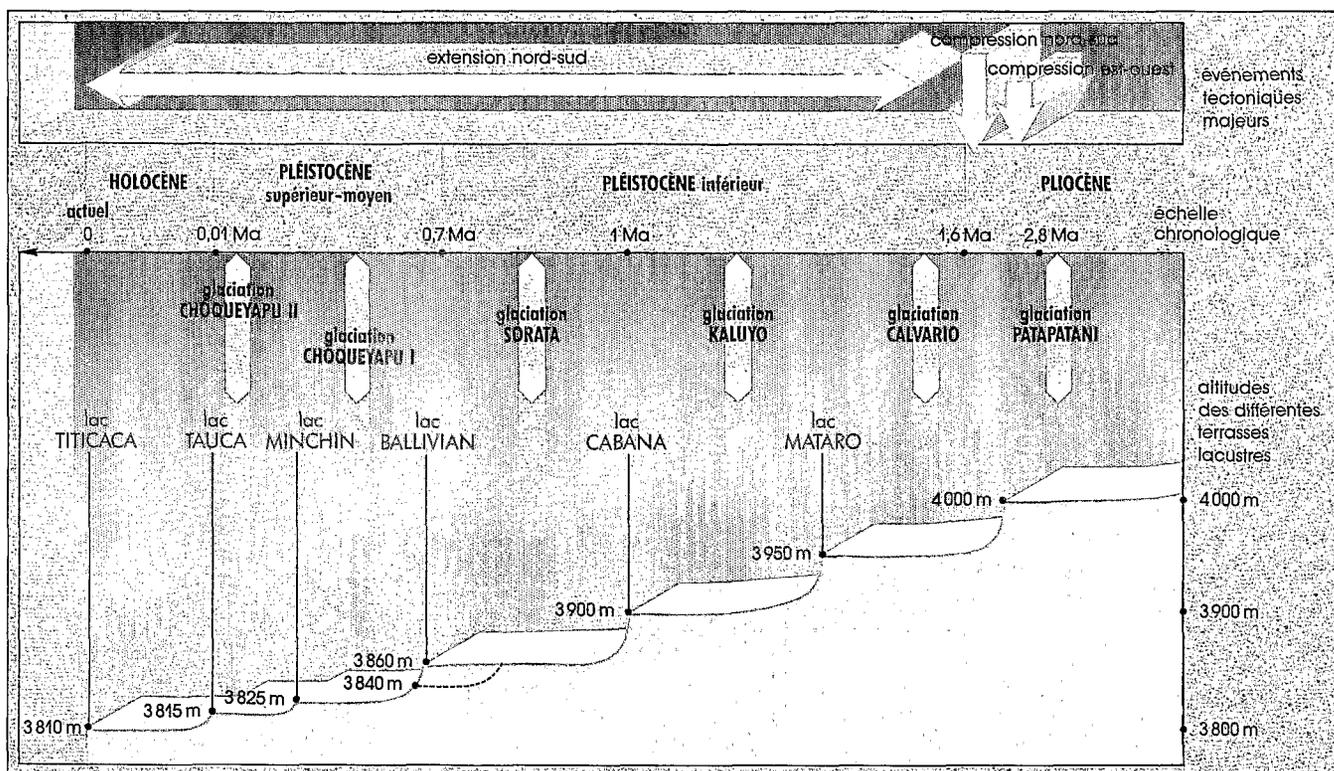
Analysant les dépôts sédimentaires tout

autour des lacs, soit par stratigraphie, paléontologie classique ou étude des pollens fossiles (palynologie), les géologues sont maintenant en mesure de retracer les grandes lignes de l'histoire du lac Titicaca durant le Quaternaire^(3,4) (fig. 3).

Les plus anciens indices d'une présence lacustre sont des dépôts sédimentaires découverts au nord-ouest du lac Titicaca, à une altitude d'environ 3 950 mètres. Ils correspondent à un lac de grande dimension (peut-être six à huit fois le lac actuel), probablement formé par la fonte des glaciers due au réchauffement

tectoniques qui ont affecté les Andes durant tout le Quaternaire (compression et extension) a provoqué des changements d'altitude différentiels de plusieurs zones de l'Altiplano, responsables d'une localisation instable (à l'échelle géologique !) de la masse d'eau présente. Si l'on ajoute à cela une réduction régulière de l'amplitude de cette même masse d'eau, au cours des âges, cela explique qu'à partir du lac Cabana nous n'ayons plus eu affaire à un plan d'eau unique, mais à un système lacustre, plus ou moins dissocié entre l'Altiplano nord et l'Altiplano sud^(16,17).

Le lac possède un seul exutoire, le río Desaguadero, situé au sud-ouest du lac Huiñaimarca. En période de hautes eaux, l'écoulement du trop-plein du lac Titicaca se fait ainsi vers les régions plus basses du sud bolivien, alimentant successivement les lacs Uru Uru et Poopó (fig. 4C). Ce dernier déverse lui-même ses eaux vers le salar de Coipasa puis, exceptionnellement, vers le salar d'Uyuni. Ces deux dernières cuvettes représentent d'immenses croûtes de sel (sodium, magnésium, potassium, bore, lithium, ...) qui fonctionnent comme de gigantesques marais salants.



(1) T. Bouysse Cassagne, Bull. IFEA, 42, 1992.
 (2) T. Bouysse Cassagne, Lluvias y Cenizas, Hisbol, 1988.
 (3) A. Lavenu et al., Cah. ORSTOM, Sér. Géol., 14(1), 1984.
 (4) M. Servant et J.-C. Fontes, Cah. ORSTOM, Sér. Géol., 10(1), 1978.
 (5) D. Wirrmann, multig., ORSTOM/UMSA, La Paz, 1982.
 (6) J.P. Carmouze et al., Rev. Hydrobiol. trop., 14(4), 1981.
 (7) J. Bourges et al., ORSTOM/PHICAB, La Paz, 1991.
 (8) J. P. Carmouze et al., Rev. Hydrobiol. trop., 11(4), 1977.
 (9) S. Servant-Vildary, Cah. de Micro-paléontologie, 1(3-4), 1986.
 (10) A. Iltis, multig., ORSTOM/UMSA, La Paz, 1987.
 (11) D. Collet et al., Rev. Hydrobiol. trop., 16(3), 1983.
 (12) R. Repelin et al., multig., ORSTOM, La Paz, 1988.
 (13) C. Dejoux, Rev. Hydrobiol. trop., 24(2), 1991.
 (14) G. Loubens, Rev. Hydrobiol. trop., 22(2), 1989.
 (15) L. Lauzanne, Rev. Hydrobiol. trop., 15(1), 1982.
 (16) W.A. Berggren et al., Géol. Soc. Amer. Bull., 86, 1985.
 (17) A. Lavenu, in C. Dejoux et A. Iltis (eds), Lake Titicaca, Kluwer Acad. Publishers, 1992.

ayant succédé à la glaciation Calvario, postérieure à 2,8 millions d'années. Ce lac, appelé lac Mataro, réduisit notablement de superficie et de volume durant la glaciation Kaluyo pour former, après un nouveau réchauffement du climat, le lac nommé Cabana. Tout indique que ces deux lacs avaient une telle superficie qu'ils formaient, chacun, un seul plan d'eau sur l'Altiplano.

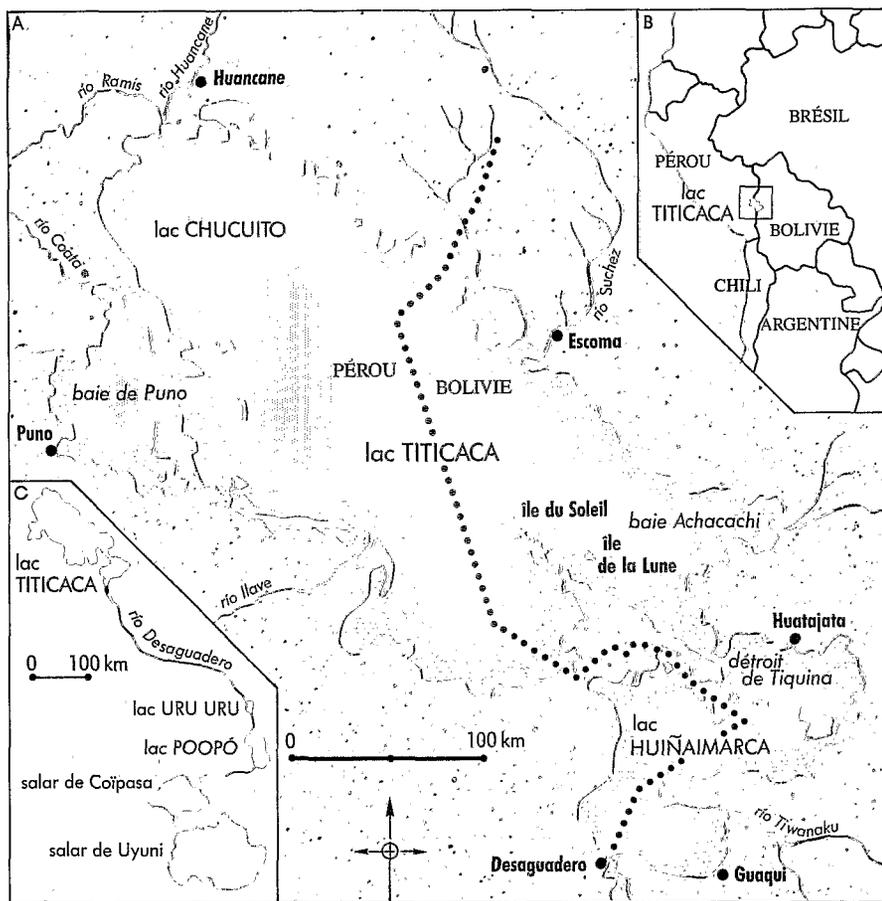
Les lacs qui se sont établis par la suite ont occupé des niveaux de plus en plus bas. Les géologues les ont appelés respectivement lac Ballivián au Pleistocène moyen supérieur (environ 700 000 ans BP, Before Present), puis lac Minchin au Pléistocène supérieur (120 000 ans BP). Le lac Tauca marque le passage à l'Holocène (environ 13 000 ans BP), succédant à la glaciation Choqueyapu II. Enfin, à l'époque actuelle, s'établirent les lacs Titicaca et Poopó que nous connaissons. Le jeu des nombreuses déformations

Au niveau du seizième parallèle de latitude sud, qui le traverse pratiquement en son milieu, le lac Titicaca représente aujourd'hui une masse d'eau d'environ 896 millions de mètres cubes, pour une superficie totale de 8 559 kilomètres carrés, quand le niveau de sa surface est à une altitude de 3 809 mètres au-dessus du niveau de la mer. Il partage ses eaux de manière inégale entre Pérou et Bolivie. Ses côtes sont souvent très découpées et très abruptes, principalement dans le bassin nord, où la profondeur peut dépasser cent mètres, à quelques centaines de mètres du bord. Seules les baies plus ou moins fermées d'Achacachi, et surtout de Puno, y ont une profondeur moindre, de huit à dix mètres en moyenne. Les côtes du bassin sud sont nettement moins abruptes et les fonds, vaseux en général, sont dans leur majorité recouverts de végétation aquatique (fig. 4).

En période de basses eaux du lac, et après de fortes pluies sur l'Altiplano, la plaine d'inondation qui se trouve près de l'embouchure du río Desaguadero peut être en charge par rapport au niveau du lac et l'écoulement des eaux de cette rivière s'inverse, en direction du Titicaca...

Durant près de quinze ans, sporadiquement ou régulièrement selon les programmes en cours, les chercheurs de l'ORSTOM ou leurs collègues boliviens ont réalisé des relevés des principaux paramètres physiques du lac Titicaca. En associant ces résultats à ceux obtenus dans le bassin nord, par les chercheurs de l'université de Davis, en Californie^(18,19), en collaboration avec ceux de l'IMARPE (Instituto del mar del Perú) de Puno, nous avons maintenant une bonne connaissance de cet aspect du lac.

La transparence des eaux est importante mais varie d'une saison à l'autre, en fonction de l'incidence des vents et du



développement planctonique, avec des valeurs extrêmes allant d'un à neuf mètres dans le bassin sud et de dix à dix-neuf mètres dans le bassin nord (la transparence est ici définie par la profondeur de disparition à la vue du disque de Secchi, disque métallique de trente centimètres de diamètre, peint de quatre secteurs alternativement blancs et noirs). Le pH est stable, fluctuant au maximum entre 8 et 9, et la minéralisation des eaux est de l'ordre d'un gramme par litre. Les eaux du Titicaca ne sont donc pas absolument douces, ce qui limite la diversité des espèces de certaines de ses composantes biologiques, par exemple les insectes. Ephéméroptères et plécoptères, sensibles aux faibles salinités, en sont totalement absents, alors qu'ils existent dans d'autres milieux lacustres moins salés de la cordillère⁽¹³⁾.

La température de l'eau varie tout au long de l'année, avec une amplitude de l'ordre de 3 °C en moyenne dans le bassin nord, où l'inertie de la grande masse d'eau joue un rôle régulateur, et de 6 °C dans le bassin sud, plus influencé par les changements de température extérieure en raison de sa faible profondeur. La température moyenne annuelle de l'eau du lac s'établit donc aux alentours de 13 °C, alors que celle de l'air n'est que de 8 °C. Cela explique que, malgré sa situation en altitude, le lac Titicaca n'est jamais couvert de glace, même quand la

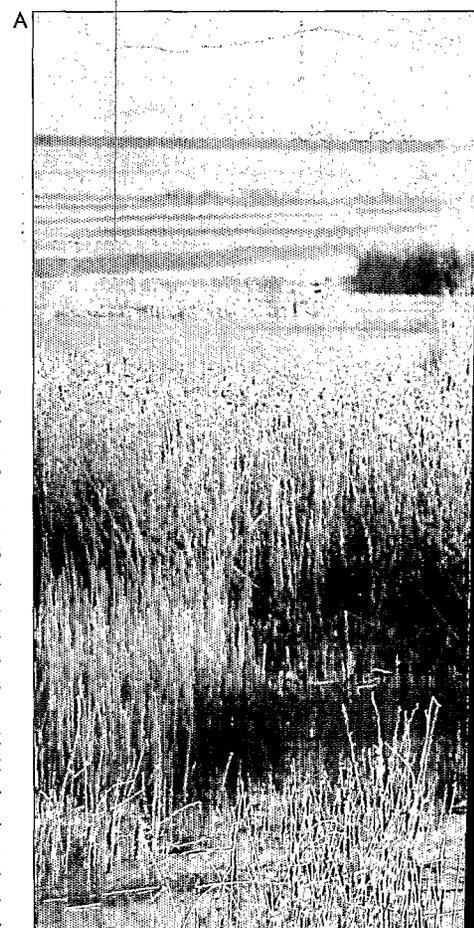
Figure 4. Situé à la frontière entre le Pérou et la Bolivie (B), le lac Titicaca est formé de deux bassins d'inégale importance (A). Le bassin nord, aux côtes généralement abruptes, est le plus profond (profondeur maximale 284 mètres) et le plus grand (6 542 kilomètres carrés de superficie). Le bassin sud, plus plat et plus petit (profondeur maximale 42 mètres, superficie 1 428 kilomètres carrés) est parsemé de nombreuses îles. Le détroit de Tiquina (850 mètres de large et 21 mètres de profondeur minimale) les relie. A certaines périodes de basses eaux, durant les derniers 10 000 ans, les deux bassins ont été séparés à ce niveau (C).

température extérieure descend à plusieurs degrés au-dessous de zéro. Seules quelques zones de faible profondeur, proches du rivage et abritées par la végétation de bordure peuvent présenter, tôt le matin et durant quelques heures, une légère pellicule de glace au plus profond de l'hiver austral, c'est-à-dire en juillet/août. Durant cette période, le ciel clair permet une insolation maximale du lac et la radiation incidente compense largement la déperdition de chaleur due aux basses températures de l'air⁽⁶⁾.

On sait que l'oxygène dissous, élément fondamental dans la biologie d'un lac, est contrôlé par deux paramètres principaux, la température et la pression atmosphérique. Dans le cas du Titicaca, nous venons de voir que la température moyenne est relativement stable et d'une valeur favorable à une bonne oxygéné-

tion de l'eau. En revanche, à une altitude de 3 810 mètres, la pression atmosphérique moyenne n'est plus que de 646 hectopascals (hPa) alors qu'elle avoisine 1 020 hPa au niveau de la mer ! En fait, ces deux facteurs se compensent l'un l'autre et les eaux de surface (épilimnion) ont généralement des teneurs en oxygène de l'ordre de sept milligrammes par litre, soit des concentrations toute l'année supérieures à 95 % de la saturation. Ces teneurs diminuent toutefois rapidement en profondeur (hypolimnion) et chutent à un ou deux milligrammes par litre à - 20 mètres, dans le bassin sud. Dans le bassin nord, comme au plus profond du bassin sud, une anoxie totale peut s'installer durant la période de stratification thermique estivale, quand en septembre/octobre apparaît une thermocline nettement marquée (couche d'eau à gradient thermique très prononcé qui limite les échanges entre surface et fond).

D'une manière générale, les eaux du lac Titicaca sont du type chlorosulfaté sodique, et leur composition chimique varie peu tout au long de l'année. Il s'agit là d'une caractéristique qu'il partage avec la plupart des autres lacs de la cordillère et de l'Altiplano andin et que l'on retrouve ailleurs sur terre dans de nombreux milieux établis en zones d'origine volcanique. Les teneurs en silice sont très



faibles dans les zones peu profondes, mais atteignent des valeurs notables en profondeur (3,7 milligrammes par litre à 150 mètres), élément favorable à la présence d'une riche flore de diatomées en eaux libres⁽²⁰⁾. Le lac est alimenté en eau par les pluies (1 000 millimètres par an en moyenne), ainsi que par cinq cours d'eau principaux dont le débit moyen annuel ne dépasse pas 270 mètres cubes par seconde, au total. Les pertes en eau sont de différentes natures et correspondent essentiellement en un écoulement superficiel *via* le río Desaguadero, une évaporation de surface et des infiltrations latérales. Tous ces termes du bilan hydrique sont d'importance inégale et certains sont difficiles à évaluer⁽²¹⁾.

Le débit d'écoulement par le río Desaguadero est fonction de la masse d'eau présente dans la cuvette lacustre et aussi du niveau du seuil que représente l'embouchure de cet exutoire. Il est d'une manière générale très fluctuant en fonction des saisons et des années, un calcul statistique l'établissant cependant autour de vingt mètres cubes par seconde ; mais cette valeur théorique est peu significative (elle-même est liée à l'intensité des précipitations et aux apports des tributaires).

De par sa position en altitude et au centre de l'Altiplano balayé par les vents, le lac Titicaca est en revanche le siège d'une

forte évaporation évaluée par J.-P. Carmouze, de l'ORSTOM, et É. Aquize, de l'UMSA (Universidad Metropolitana de San Andres à La Paz), ou M.A. Roche, également de l'ORSTOM, à plus de 1,5 mètre par an^(6,21). Si l'on ajoute à cette évaporation les pertes par infiltration latérale sur un périmètre de quelque 915 kilomètres de côtes, on se rend compte que l'équilibre hydrologique global est relativement fragile. Cela se traduit par des oscillations du niveau général de près d'un mètre par an et des variations interannuelles souvent fortes ; elles peuvent provoquer l'assèchement de grandes superficies au niveau des baies peu profondes, ou au contraire amener des inondations importantes, comme en 1986, quand le plan d'eau s'éleva de plusieurs mètres.

Carmouze et ses collaborateurs ont montré que l'évaporation et l'infiltration représentent en moyenne 96,8 % du total des pertes annuelles en eau, alors que l'écoulement superficiel ne représente que 3,2 %⁽²²⁾. Les précipitations au niveau du bassin du lac

sont donc de première importance dans le maintien d'un niveau moyen constant et compensent, en année « normale », l'incidence des deux facteurs précédents. Il s'agit là cependant d'un équilibre relativement fragile qui conditionne fortement une utilisation intensive des ressources hydriques du lac.

Les chercheurs de l'ORSTOM travaillant au SENAMHI de La Paz (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología), prenant en compte les données hydrologiques récoltées entre 1915 et 1989, ont calculé que le niveau moyen du plan d'eau durant cette période correspondait à une



Figure 5. Dans les herbiers qui bordent le lac, les totoras (*Schoenoplectus tatora*) font l'objet d'une exploitation bien organisée et très réglementée, comme nourriture pour le bétail, mais aussi pour la fabrication d'objets manufacturés (barques, toits d'habitations, artisanat,...) (A). Plusieurs qualités (« verte » ou « jaune ») sont distinguées par les riverains, qui jamais ne laissent pénétrer le bétail dans les champs de totora. La plante est coupée à cinquante centimètres en dessous de la surface pour permettre la repousse, dans des parcelles définies et selon des périodicités bien établies. A l'inverse des autres végétaux aquatiques, la totora peut être troquée, vendue, de même que peuvent l'être les lieux de production. De nombreuses parcelles sont d'ailleurs le résultat de plantations qui s'ajoutent à la population naturelle du lac. Un certain nombre d'autres macrophytes tels les *Myriophyllum*, *Elodea* et *Potamogeton*, de très bonne valeur nutritive, sont exploités suivant certaines règles locales coutumières. C'est ainsi que les bovins peuvent paître directement dans les herbiers jusqu'à une profondeur de près d'un mètre, de juin à février, sur des espaces « intralacustres » communautaires, ou sur les propriétés des riverains dont les champs peuvent s'étendre... à l'intérieur du lac. Cette production végétale, nommée « llachu », peut par ailleurs être récoltée depuis des barques, dans des eaux plus profondes et en des endroits autorisés (B), pour être ensuite ramenée à la berge, voire plus à l'intérieur des terres, où elle est consommée par les animaux. (Clichés auteur)

(18) P.J. Richerson et al., *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 19, 1975.
 (19) P.J. Richerson et al., *Hydrobiologia*, 138, 1986. (20) J.P. Carmouze et al., *Rev. Hydrobiol. trop.*, 17 (1), 1984.
 (21) M.A. Roche et al., in C. Dejoux et A. Ittis (eds), *Lake Titicaca*, Kluwer Acad. Publishers, 1992.
 (22) J.P. Carmouze et al., *Rev. Hydrobiol. trop.*, 16(2), 1983.

altitude de 3 809,35 mètres. En se fixant une variation théorique du niveau de plus ou moins 1,35 mètre autour de cette valeur, ils ont prouvé qu'il n'aurait pas été possible d'extraire du lac durant cette période une quantité d'eau de plus de 380 millions de mètres cubes par an, en moyenne théorique. Cela est peu (= 12 mètres cubes par seconde), et correspond à la consommation de quelques projets d'irrigation. Bien entendu, durant certains cycles d'années humides

ment dans toutes les zones peu profondes. En effet, la grande transparence des eaux et l'important apport énergétique dû à la forte radiation solaire sont des éléments favorables. La couche euphotique (épaisseur d'eau laissant passer suffisamment de lumière pour permettre le développement des végétaux autotrophes) est de l'ordre de cinq mètres dans le bassin sud et atteint neuf à dix mètres dans le bassin nord⁽¹¹⁾. Ces valeurs dépassent celles normalement

(cinq à six mètres dans le Huiñaimarca), est certainement la plus abondante en biomasse : elle couvre environ 60% des fonds du bassin sud et 30% dans la seule baie de Puno, formant un immense tapis sur le fond, d'une épaisseur allant de vingt centimètres à un mètre. Une telle abondance de macrophytes est inexistant dans les lacs d'altitude des régions tempérées et, à nouveau, il faut en rechercher la cause à la fois dans la situation en zone tropicale du lac Titicaca,

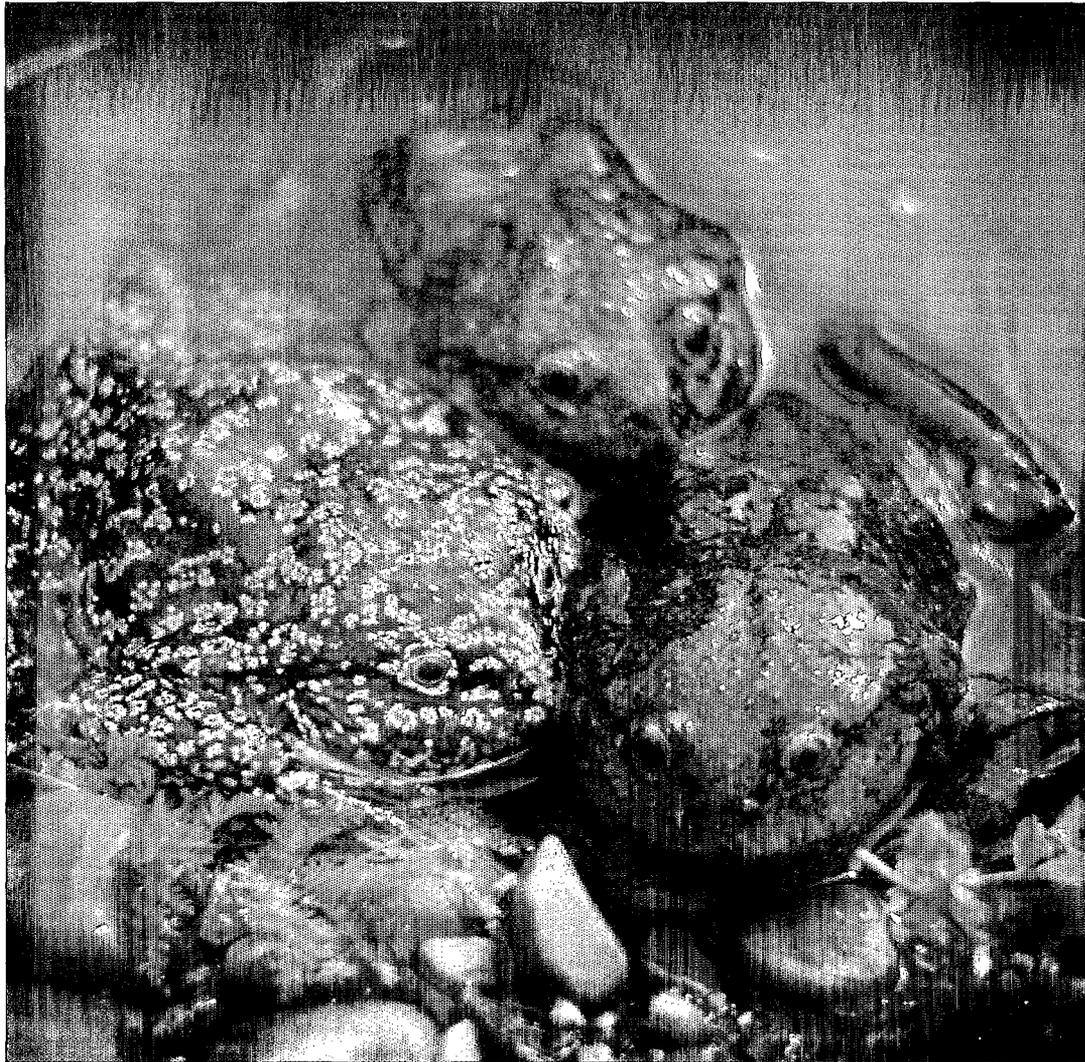


Figure 6. Les batraciens du lac Titicaca sont bien connus du grand public depuis qu'ils furent filmés par l'équipe de J.-J. Cousteau. Une quinzaine d'espèces cohabitent au niveau du lac ou de ses rives, sans se mélanger. L'une des plus connues (*Telmatobius culeus*) peut dépasser une taille de quinze centimètres et vivre à de grandes profondeurs. Elle présente une adaptation anatomique et physiologique (doublement de la surface de la peau) qui lui permet de respirer sans remonter à la surface, utilisant directement l'oxygène dissous de l'eau. (Cliché auteur)

Figure 7. Probablement toutes issues d'un ancêtre commun (*Orestias agassii*), 23 des 25 espèces d'*Orestias* recensées du lac Titicaca sont endémiques et occupent des biotopes bien définis (en bas sur la photographie). A l'heure actuelle, cinq espèces de ce genre autrefois connues du lac ont disparu, et l'on pense que les introductions de la truite arc-en-ciel (en haut), ou du « pejerrey » (au centre), en sont la cause. (Cliché auteur)

cette valeur aurait pu être triplée tout en respectant l'objectif, mais à l'opposé elle aurait été trop forte en années sèches, comme en 1982 et 1983⁽²³⁾.

Si la flore algale, diatomées comprises, ne présente pas d'originalité particulière, car formée d'espèces en majorité cosmopolites et d'une abondance que l'on peut qualifier de normale dans ce type de milieu d'altitude, il n'en va pas de même des macrophytes. Les végétaux supérieurs aquatiques, immergés ou semi-immérgés, capables de supporter la faible salinité du lac Titicaca, y trouvent d'excellentes conditions de développe-

rencontrées dans les lacs d'altitude des régions tempérées. Si l'on ajoute le fait que les eaux du lac demeurent toute l'année à une température relativement élevée, présentant peu de variations d'amplitude, on comprend que l'on ait là d'importants facteurs favorables à un grand développement de la végétation aquatique.

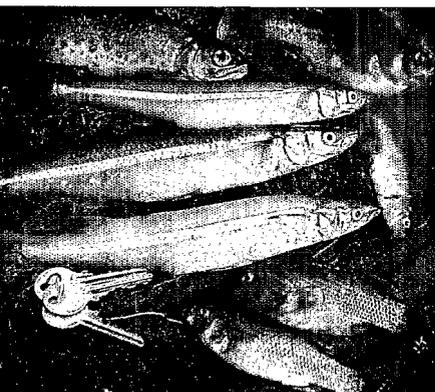
On a recensé vingt-trois espèces de macrophytes dans le lac Titicaca, dont onze espèces de *Characeae*. Cette famille, dont plusieurs espèces (*Chara papillosa*, *chara denudata*...) vivent jusqu'à la limite de la zone euphotique

et dans l'énorme apport d'énergie lumineuse qu'il reçoit. Ces vastes herbiers abritent de nombreux organismes tels des mollusques gastéropodes, des crustacés ostracodes et amphipodes, qui jouent un rôle essentiel de décomposeurs primaires dans les processus de transformation de la matière organique, avant l'intervention des bactéries. D'autres organismes y trouvent simplement un support ou un abri, par exemple les hydres, les hydracariens ou les alevins de certains poissons⁽¹³⁾.

Tout cela n'est pas spécialement original, mais l'exploitation faite par l'homme des

macrophytes aquatiques l'est beaucoup plus (fig. 5). Le peu de pâturages présents sur l'Altiplano, en raison de son altitude, a en effet amené les riverains du lac Titicaca à une exploitation rationnelle des plantes aquatiques pour nourrir le bétail. Cet apport végétal est de première importance, particulièrement en années sèches, quand les pâturages classiques s'épuisent rapidement. Certaines évaluations font état d'une production annuelle de l'ordre de 50 000 tonnes de totora « verte », dans la seule baie de Puno. Loin d'être une activité occasionnelle, l'exploitation des végétaux aquatiques représente donc une importante source de revenus, tout autant que la pêche⁽²⁴⁾.

La totora « jaune », plus mûre donc plus résistante que la « verte », jaunie au soleil, est réservée à la fabrication d'objets manufacturés et constitue une matière première recherchée par les riverains et



particulièrement par les Indiens Urus qui vivent sur les îles flottantes de la baie de Puno. L'ensemble de la totora présente un autre intérêt : la partie inférieure de sa tige ainsi que son rhizome sont aussi consommés par l'homme (fig. 5).

Pour le biologiste, l'important degré d'endémisme présenté par la faune du lac Titicaca est remarquable. Il semble en effet que le lac réunisse plusieurs caractéristiques que les scientifiques s'accordent à considérer comme favorables à l'établissement d'une importante spéciation. L'âge du lac est bien entendu un facteur clef, ayant permis un établissement de la vie dans ce milieu depuis plusieurs millions d'années. Son isolement dans un bassin endoréique d'altitude peu étendu, la présence de la barrière physique des cordillères tout autour ont certainement limité de possibles échanges de faunes avec le reste des Andes d'une part, et avec les versants pacifique désertique et amazonien humide d'autre part. Enfin, l'histoire géologique du lac a vu l'alternance de longues périodes de stabilité, puis de changements drastiques de ses conditions d'environnement, amenant de fortes baisses de niveau avec d'impor-

tantes augmentations de salinité, ou bien l'inverse en périodes de fonte des glaciers⁽²⁵⁾.

Associés à une grande profondeur, tous ces facteurs conjugués, que l'on retrouve dans le cas d'autres lacs anciens comme le lac Biwa et surtout le lac Baïkal, ont permis la diversification d'une faune initiale, probablement moins complexe que la faune actuelle. Il a en effet été montré par J. Vellard alors chercheur à l'IFEA (Institut français d'études andines) que les batraciens du bassin du lac Titicaca (dix-sept formes recensées actuellement) dérivèrent essentiellement d'un seul phylum (*marmoratus*), issu d'un genre unique (*Telmatobius*)⁽²⁶⁾. L'altitude de 3 000 mètres représentant une barrière physiologique pour la dispersion de ces organismes, seules quelques rares formes ont été à même de passer au-delà et de résister à l'action des rayons ultraviolets et infrarouges, aux grandes différences de température entre le jour et la nuit, à la forte évaporation et aux basses pressions d'oxygène (fig. 6). De même, L. Lauzanne de l'ORSTOM émet l'hypothèse, fort vraisemblable, que toutes les espèces de poissons du genre *Orestias* ont un ancêtre commun : *Orestias agassii*⁽¹⁵⁾. La présence dans le lac de biotopes bien individualisés et très différents les uns des autres (plusieurs types d'herbiers aquatiques, côtes rocheuses, fonds sableux ou vaseux,...), représente par ailleurs un caractère très favorable à des adaptations diversifiées d'une même espèce, favorisant le processus de spéciation.

Il est certain que le niveau d'endémisme dans le lac Titicaca n'atteint pas celui du lac Baïkal où, par exemple, sur 240 espèces connues d'amphipodes, 239 sont considérées comme uniques à ce milieu ! Malgré cela, il faut savoir que plus de 80 % des amphipodes du lac Titicaca ne se retrouvent pas ailleurs. Certains ont des formes très inhabituelles, le corps présentant de grandes épines au rôle mal défini. Ce sont généralement des espèces d'eau profonde comme *Hyaella echina*, qui peut se rencontrer jusqu'à - 200 mètres, une anoxie périodique des couches d'eau situées au-delà interdisant de toute manière la présence de vie à plus grande profondeur. Près de 80 % des poissons sont également endémiques. Cet endémisme atteint même 95 % chez le genre *Orestias*, genre natif du lac Titicaca et très diversifié dans ce milieu (25 espèces recensées). Le pourcentage est un peu plus faible (50 %) si l'on considère les ostracodes, et baisse encore plus chez les mollusques (20 %) ; mais dans ces deux groupes on retrouve de nombreuses formes à l'aspect étrange, souvent fortement ornementées comme dans le cas de certains ostracodes des genres *Lymnocythere* et *Ilyocypris* ; ou bien à la coquille très carénée (*Littoridina*

andecola neveu), voire totalement déroulée (*Ecpomastrum mirum*), quand il s'agit des mollusques.

La seule éponge connue du lac (*Balliviaspongia wirrmanni*) représente un genre et une espèce endémique. Ce caractère est fort intéressant et rapproche le lac Titicaca d'autres lacs très anciens qui, eux aussi, présentent une faune de spongiaires uniquement formée d'un ou plusieurs genres monospécifiques (*Ochridaspongia* du lac Ochrid, *Malawiaspongia* du lac Malawi, ...)⁽²⁷⁾.

Il n'est de nos jours guère possible de parler d'un milieu aquatique déterminé, sans s'interroger sur son niveau de contamination. Comparé au lac Baïkal, que nous avons déjà évoqué, le lac Titicaca apparaît comme un paradis. Même s'il offre un accès facile en dépit de son altitude, tant du côté péruvien que du côté bolivien, et qu'il s'étend dans la zone la plus peuplée de l'Altiplano (mais tout est relatif...), il est jusqu'à maintenant peu affecté par l'action de l'homme. Cela ne signifie pas qu'il est exempt de toute contamination, et des zones particulières comme la baie de Puno, où les échanges d'eau avec le reste du lac sont faibles, sont à l'heure actuelle assez polluées.

Il n'y a aucune industrie sur le pourtour du lac, mais les deux centres urbains importants situés sur ses rives ou à proximité (Juliaca et Puno, chacun de plus de cent mille habitants) déversent leurs effluents dans la baie de Puno, pratiquement sans épuration préalable. Cela se traduit concrètement par une très forte eutrophisation de l'ensemble de la baie, une importante diminution de la biodiversité avec disparition de certaines espèces de poissons autrefois exploitées, une entrave à la navigation par un excès de croissance des macrophytes et, bien entendu, la présence de micro-organismes pathogènes dans l'eau de la baie, souvent utilisée directement pour la boisson⁽²⁸⁾.

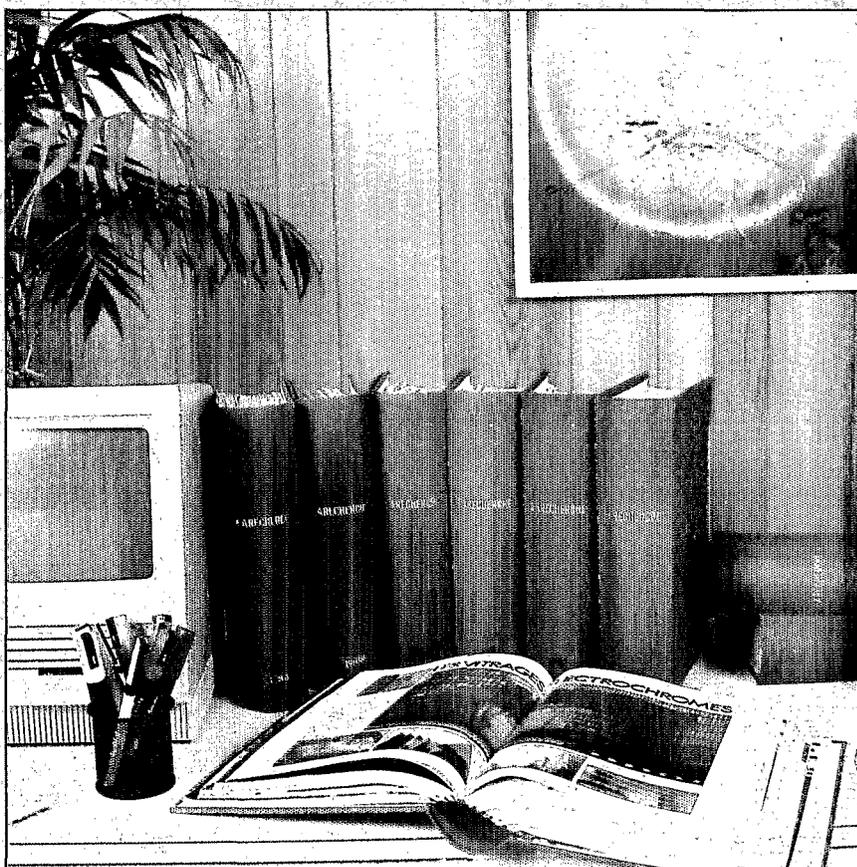
Sur le reste du pourtour du lac, l'impact lié aux activités humaines est faible. Une ancienne mine de cuivre située sur la côte est du bassin nord est maintenant fermée depuis plus de dix ans, et les traces de sa contamination locale s'effacent peu à peu. L'agriculture de bordure, même si elle est intense, emploie peu d'engrais et pratiquement aucun pesticide. Les nombreux villages situés tout au long des côtes ne provoquent guère qu'une faible contamination organique localisée et diffuse, facilement compensée par la capacité d'épuration du milieu récepteur et par l'influence des ultraviolets, très forte à cette altitude.

En termes de conservation, il faut en revanche noter que l'ichtyofaune native du lac a certainement souffert de deux introductions successives d'espèces prédatrices : la truite arc-en-ciel (*Salmo gairdneri*) dans les années quarante,

(23) J. Bourges et al., in C. Dejoux et A. Illis (eds), *Lake Titicaca*, Kluwer Acad. Publishers, 1992.
 (24) D. Levieil et B. S. Orlove, *Amer. Anthropol.*, 92(2), 1990.
 (25) C. Dejoux, Commun. Workshop on speciation in ancient lakes, Belgique, 1993.
 (26) J. Vellard, Tr. IFEA, Paris-Lima, 4(1), 1954.
 (27) N. Boury-Esnault et C. Volkmer-Ribeiro, in C. Dejoux et A. Illis (eds), *Lake Titicaca*, Kluwer Acad. Publishers, 1992.
 (28) T.G. Northcote et al., *Westwater*, Res. Center Vancouver, 1989.

CONSERVEZ VOTRE COLLECTION DE LA RECHERCHE

Pour 75 F seulement
nos reliures vous permettront de protéger
votre collection de LA RECHERCHE,
en l'intégrant harmonieusement
dans votre bibliothèque.



CHAQUE RELIURE CONTIENT LES 11 NUMÉROS DE L'ANNÉE

OUI, je souhaite recevoir exemplaire(s) de la reliure de LA RECHERCHE au prix de 75 F TTC, franco de port pour la France, 85 F TTC pour les autres pays (envoi en recommandé); 550 FB pour la Belgique.

Je joins mon règlement par chèque bancaire ou postal à l'ordre de LA RECHERCHE.

Nom, prénom _____

Adresse _____

Ville _____

Code postal | | | | | Pays _____

A renvoyer sous enveloppe à
LA RECHERCHE 5, RUE JACQUES-CALLOT 75006 PARIS
Belgique: ÉDITION SOUMILLION AV. MASSENET, 28 B-1190 BRUXELLES
Délai: trois semaines environ.

puis le pejerrey (*Basilichthys bonariensis*) dix ans plus tard⁽¹⁴⁾ (fig. 7). L'introduction de la truite s'effectua à partir d'œufs probablement en provenance des États-Unis, mis en place dans une pisciculture proche de Puno, sur la côte péruvienne du lac. Entre les années 1941 et 1969 des millions d'alevins ont ensuite été déversés dans le lac. Pour ce qui est du pejerrey, qui normalement vit dans les fleuves et estuaires d'Argentine, d'Uruguay et du sud brésilien, il semble que les premiers exemplaires aient été introduits dans le lac Poopó par un club de pêche sportive et que l'espèce soit par la suite remontée vers le Titicaca, par le Río Desaguadero. Bien que peu de données existent sur le réel impact de ces deux poissons sur l'ichtyofaune endémique du lac, la disparition de quelques espèces du genre *Orestias* et la baisse sensible des captures de ce même genre, depuis leur introduction, peuvent certainement leur être imputées⁽¹⁵⁾.

Enfin, nous avons vu que malgré sa masse d'eau imposante, il n'est guère possible d'en soustraire annuellement de grandes quantités sans risquer de provoquer d'importantes baisses de niveau qui auraient des conséquences graves sur l'équilibre biologique du milieu. Il importe donc de veiller à ce que les projets de développement de la région ne soient pas fondés sur une utilisation inconsidérée de ses eaux, ressource fort attractive mais finalement précaire. Des projets d'extraction d'eau du bassin nord par un canal allant vers le Chili, comme il fut envisagé au début des années quatre-vingt, sont certainement à proscrire. Le projet actuel de régulation des crues du lac (projet COMILAGO avec financement de la CEE) est plus respectueux de la ressource en eau. On peut cependant s'interroger sur les effets écologiques du maintien du niveau du lac à une altitude relativement constante, notamment en ce qui concerne la dynamique de croissance de son importante ceinture végétale dans le bassin sud... Il ne reste qu'à espérer que le lac Titicaca demeure, encore longtemps, un de ces sanctuaires naturels qui se distinguent dans le monde par leur beauté et leur intérêt scientifique et que son statut de parc national lui assure réellement la protection qu'il mérite. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

La limnologie en général :

■ B. Dussart, *Limnologie, l'étude des eaux continentales*, 2^e éd., Editions N. Boubée, 1992.

■ G.E. Hutchinson. *A treatise on limnology 2. Introduction to lake biology and the limnoplankton*, John Wileys and sons, 1957.

■ R. Margalef, *Limnología*, Ed. Omega, 1983. Le lac Titicaca en particulier :

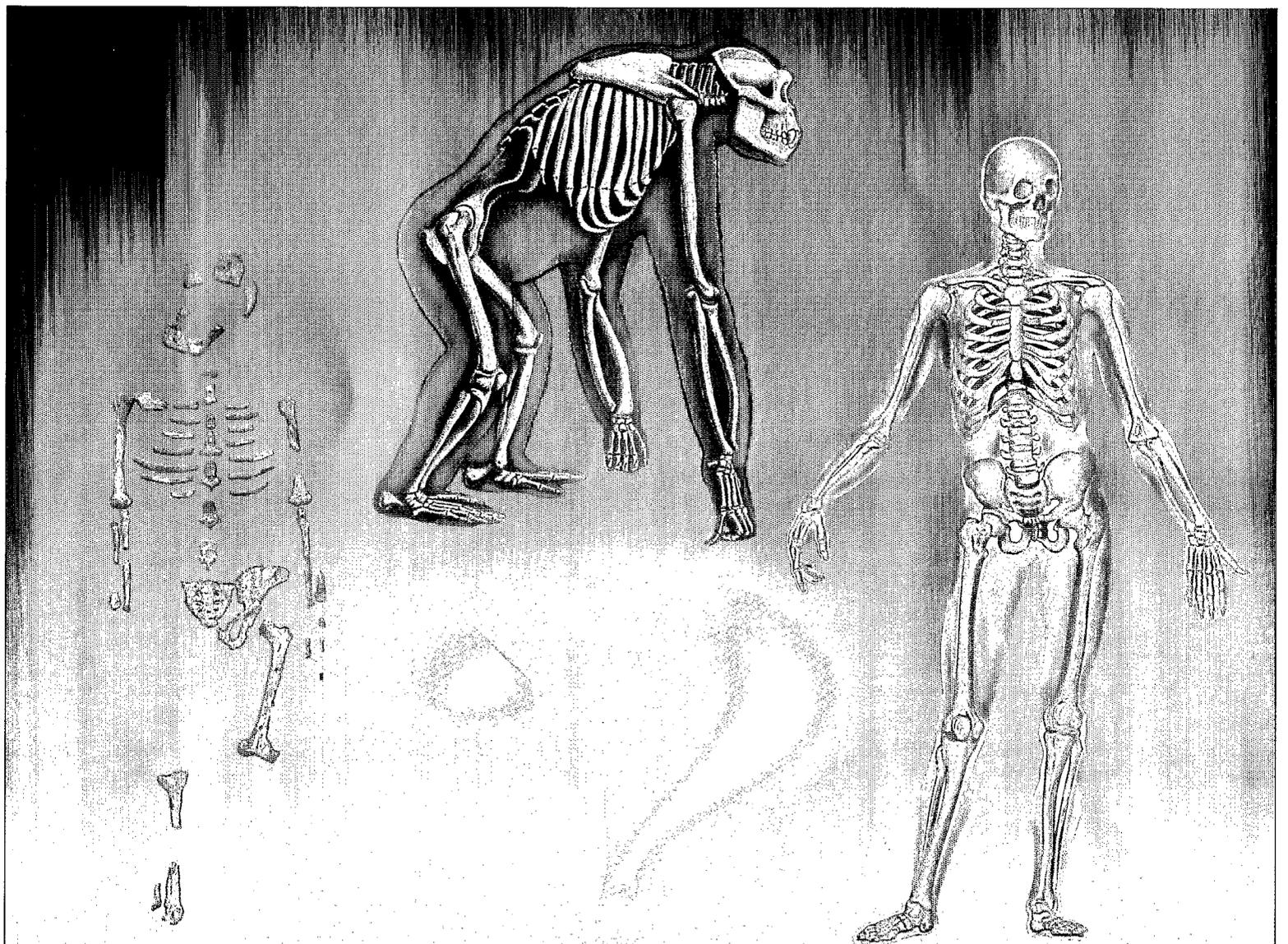
■ C. Dejoux et A. Ittis (eds), *Lake Titicaca, a synthesis of limnological knowledge*, Kluwer Acad. Publ., 1992. (Une version existe en espagnol)

Les supercalculateurs: pour quoi faire?

LA

RECHERCHE

**LES NOYAUX EXOTIQUES • LES VERRES CORRECTEURS
LE THÉORÈME DE FERMAT • LE LAC TITICACA • LES VERS DE TERRE**



ORIGINE DE L'HOMME
LES RAISONS D'UN DÉBAT

M 1108 - 263 - 38,00 F

