

# SCIENCES GÉOLOGIQUES



GÉOCHIMIE DES LACS SALÉS ET CROÛTES DE SEL DE  
L'ALTIPLANO BOLIVIEN □ François RISACHER □

*GEOCHEMISTRY OF SALINE LAKES AND SALT CRUSTS OF THE BOLIVIAN ALTIPLANO*  
*GEOQUÍMICA DE LOS LAGOS SALADOS Y CROSTRAS SALINAS DEL ALTIPLANO BOLIVIANO*

## COMITÉ D'ÉDITION

---

|                                                    |                                     |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Directeur de la publication et Rédacteur en chef : | Bertrand FRITZ                      |
| Rédactrices en chef adjointes :                    | Hélène PAQUET et Anne-Marie KARPOFF |
| Secrétaire de rédaction :                          | Danièle AUNIS                       |
| Responsable de l'impression :                      | François GAUTHIER-LAFAYE            |
| Responsable de la gestion financière :             | Bertrand FRITZ                      |
| Responsable scientifique de la publicité :         | Monique SCHULER                     |

## RÉDACTEURS ASSOCIÉS

Comité de lecture

|                       |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| C. BABIN, Lyon        | Z.S. ALTSCHULER, Reston, U.S.A. |
| G. BOURRI'E, Rennes   | D. BERNOULLI, Zurich, Suisse    |
| P. CHOUKROUNE, Rennes | J.R. O'NEIL, Ann Arbor, U.S.A.  |
| M. MEYBECK, Paris     | J.P. SCHAEER, Neuchâtel, Suisse |
| D. NAHON, Marseille   | G. SPOSITO, Berkeley, U.S.A.    |
| M. STEINBERG, Orsay   | M. STREEL, Liège, Belgique      |
| Y. TARDY, Strasbourg  | J. TOURET, Amsterdam            |

---

## COMITÉ DE DIRECTION

|                                                          |                  |
|----------------------------------------------------------|------------------|
| Président : † Georges MILLOT, de l'Académie des Sciences |                  |
| Pierre CHEVALLIER                                        | Jacques LUCAS    |
| Jean DERCOURT                                            | Daniel NAHON     |
| Bertrand FRITZ                                           | Michel STEINBERG |
| Hubert de La ROCHE                                       | Francis WEBER    |

|                         |                                                                       |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Echanges :              | Bibliothèque de l'Institut de Géologie, Betty KIEFFER, Bibliothécaire |
| Ventes et abonnements : | Marguerite WOLF, Régisseur                                            |

---

|           |                                                                                                                                                                 |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Editeur : | Institut de Géologie, Université Louis Pasteur de Strasbourg<br>et Centre de Géochimie de la Surface, CNRS<br>1, rue Blessig, F-67084 STRASBOURG Cedex (France) |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

# SCIENCES GÉOLOGIQUES

Sci. Géol., Bull., 45, 3–4, Strasbourg, 1992

---

## GÉOCHIMIE DES LACS SALÉS ET CROÛTES DE SEL DE L'ALTIPLANO BOLIVIEN *GEOCHEMISTRY OF SALINE LAKES AND SALT CRUSTS OF THE BOLIVIAN ALTIPLANO* GEOQUIMICA DE LOS LAGOS SALADOS Y COSTRAS SALINAS DEL ALTIPLANO BOLIVIANO

par François RISACHER

### SOMMAIRE

|                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| INTRODUCTION . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                | 140 |
| I – UBIQUITÉ ET DIVERSITÉ DES LACS SALÉS . . . . .                                                                                                                                                                                                                                    | 141 |
| Distribution globale – Les mécanismes généraux de la salinisation des eaux – Diversité chimique des évaporites continentales                                                                                                                                                          |     |
| II – PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES SALARS DE L'ALTIPLANO BOLIVIEN . . . . .                                                                                                                                                                                                               | 150 |
| Géologie – Climat – Hydrologie actuelle – Paléolimnologie de l'Altiplano – Morphologie simplifiée des salars de l'Altiplano                                                                                                                                                           |     |
| III – LES PETITS SALARS DU LIPEZ : FONCTIONNEMENT ACTUEL DE SYSTÈMES INDÉPENDANTS . . . . .                                                                                                                                                                                           | 159 |
| L'origine des solutés – L'évolution des eaux du Lipéz au cours de l'évaporation – Conclusions sur les salars du Lipéz                                                                                                                                                                 |     |
| IV – LE SYSTÈME COUPLÉ DES SALARS D'UYUNI ET DE COIPASA : FONCTIONNEMENT ACTUEL ET QUATERNAIRE . . . . .                                                                                                                                                                              | 170 |
| La croûte de sel du salar d'Uyuni – Le salar de Coipasa – Le paléolac Tauca – Origine du sel : utilisation de la géochimie du brome dans le salar d'Uyuni – Evolution quaternaire de l'Altiplano central : le sondage profond – Conclusions sur les évaporites de l'Altiplano central |     |
| CONCLUSIONS GÉNÉRALES . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                       | 193 |
| BIBLIOGRAPHIE . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                               | 194 |
| Planches . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                    | 199 |
| Annexe . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                      | 205 |
| Liste des figures et des tableaux . . . . .                                                                                                                                                                                                                                           | 211 |
| Table des matières . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                          | 213 |

---

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Rapport succinct concernant la revue <i>Sciences Géologiques</i> . . . . .          | 215 |
| Instructions aux auteurs. <i>Editorial guidelines for the manuscripts</i> . . . . . | 217 |
| Table des matières du tome 45 (1992) . . . . .                                      | 219 |

---

## GÉOCHIMIE DES LACS SALÉS ET CROÛTES DE SEL DE L'ALTIPLANO BOLIVIEN

François RISACHER<sup>1</sup>

### RÉSUMÉ

L'Altiplano est un vaste bassin fermé de 200 000 km<sup>2</sup> situé à 4000 m d'altitude entre les Cordillères Orientale et Occidentale des Andes. Le climat est sec et froid, avec une pluviosité toujours nettement inférieure à l'évaporation potentielle. L'Altiplano bolivien renferme un des plus beaux ensembles de bassins évaporitiques du monde. La dépression centrale de l'Altiplano (3653 m) est occupée par la plus grande croûte de sel du monde : le salar d'Uyuni (10 000 km<sup>2</sup>). Dans l'Altiplano méridional, de nombreux petits bassins intravolcaniques contiennent des lacs salés et des croûtes de sel au chimisme très varié.

Une trentaine de salars ont été étudiés. Non seulement ils diffèrent par leur morphologie, mais également par leur chimisme. On trouve des salars à chlorures, sulfates, carbonates, borates de sodium et de calcium. Et pourtant les bassins versants, constitués de roches volcaniques acides, paraissent tous semblables. Il s'agit d'expliquer cette diversité. Les sels dissous dans les eaux d'apport ont une double origine. L'altération, qu'elle soit météorique ou hydrothermale, des roches volcaniques des bassins versants produit des eaux bicarbonatées sodiques, alors que la redissolution d'évaporites anciennes, enfouies sous les formations volcaniques, conduit à des eaux chlorurées sodiques. La simulation de l'évaporation des eaux d'apport montre que près de la moitié d'entre elles devraient évoluer vers des saumures alcalines, carbonatées sodiques. L'autre moitié devrait produire des saumures neutres chloro-sulfatées sodiques. Cependant les salars carbonatés sodiques sont rares : six sur la trentaine étudiés. Les néoformations argileuses observées sur les frustules de diatomées produisent des ions H<sup>+</sup> qui neutralisent une partie des carbonates dissous, ce qui peut modifier l'évolution des eaux de la voie alcaline vers la voie saline neutre. Cependant ce mécanisme ne rend compte que très partiellement du changement de l'évolution des eaux. La principale raison de la rareté des salars carbonatés sodiques tient à l'apport de soufre natif depuis les sommets des volcans dans les eaux diluées. Erodé par le vent, il se dépose sur les formations superficielles qui sont ainsi enrichies en soufre. En saison des pluies celui-ci est entraîné par les eaux de ruissellement vers le centre du bassin. Le soufre au contact de l'eau et de l'air s'oxyde en produisant de l'acide sulfurique qui neutralise une grande partie des carbonates des eaux d'apport, ce qui favorise l'évolution vers la voie saline neutre. La double origine des solutés, associée aux néoformations argileuses et à l'oxydation du soufre natif, explique la grande variété des faciès chimiques des salars du Lipéz.

Le salar d'Uyuni provient de l'assèchement, il y a 10 000 ans, d'un immense lac salé : le lac Tauca. La croûte de sel (halite) repose sur des sédiments lacustres. Elle renferme une saumure interstitielle chlorurée sodique très riche en Li, K, Mg, B. Les teneurs en Li (4,7 g/l) et B (4,3 g/l) sont parmi les plus fortes du monde. Les réserves en lithium du salar d'Uyuni sont les plus élevées du monde (9 millions de tonnes). La composition chimique du paléolac Tauca a été reconstituée de deux façons : (1) en dissolvant les masses de tous les constituants dans le volume d'eau de l'ancien lac, et (2) en simulant l'évaporation des principaux apports actuels. Les deux compositions ainsi obtenues sont très différentes. En dissolvant le salar on obtient des concentrations en Li, K, Mg, B de 5 à 50 fois plus faibles que celles que l'on obtient en évaporant les eaux diluées actuelles de l'Altiplano. Cela peut s'expliquer soit par une perte de ces éléments par infiltration de la saumure intracrustale, soit par un fort excès de chlorure de sodium dans les eaux du paléolac. Un sondage profond de 121 m a révélé une séquence évaporitique complexe de 12 croûtes de sel (halite) séparées par 11 niveaux de sédiments lacustres. Les teneurs en brome de la halite dans l'ensemble du

<sup>1</sup> ORSTOM-CNRS, 1 rue Blessig, 67084 Strasbourg Cedex, France. Adresse actuelle (*present address*) : Departamento de Quimica, Universidad Catolica del Norte, Antofagasta, Chili.

profil sont comprises entre 1,3 et 10,4 ppm. De telles teneurs sont parmi les plus faibles reportées dans le monde. La halite ne peut pas provenir de la simple évaporation des eaux diluées de l'Altiplano. Celles-ci précipiteraient du sel avec des teneurs de plusieurs dizaines de ppm de brome. La détection de halite de très faible teneur en brome (2 ppm) dans un diapir de gypse du bassin de drainage suggère que la plus grande partie de la halite qui s'est déposée dans l'Altiplano central provient du lessivage d'anciennes formations salifères de l'Altiplano. La composition très particulière du dernier paléolac (Tauca) était donc due à un fort excès de chlorure de sodium, et non à une perte des constituants de la saumure intracrustale (Li, K, Mg, B). Le niveau des paléolacs du bassin du Titicaca s'est abaissé au cours du Quaternaire, alors que celui des paléolacs de l'Altiplano central semble s'être simultanément élevé. L'augmentation des apports en eau dans le bassin central de l'Altiplano est sans doute due à l'abaissement du seuil de déversement du bassin du Titicaca.

Géochimie, Evaporites, Salars, Lacs salés, Saumures, Modélisation, Paléolimnologie, Altiplano bolivien

## Geochemistry of saline lakes and salt crusts of the Bolivian Altiplano

### EXTENDED ABSTRACT

The Bolivian Altiplano is a wide closed-basin of 200,000 km<sup>2</sup> in area located at an elevation of 4000 m between the eastern and the western Cordillera of the Andes. The Eastern Cordillera is made of Paleozoic sediments which constitute also the basement of the Altiplano. The Western Cordillera is a huge volcanic chain of Cenozoic age. Volcanic rocks range from andesite to rhyodacite. The Altiplano basin is filled with thick fill of continental sediments of Cretaceous and Tertiary age : sandstones, claystones, mudstones, shales and evaporites. Numerous gypsum diapirs crop out in these formations. The southern Altiplano (Lipez) was affected by intense acidic volcanic activity during the Pliocene and the Quaternary. Volcanoes, lava flows and ignimbrites generally overlie the Tertiary formations and delineate a number of small closed basins at high elevation (4100 to 4600 m). Deposits of native sulfur are frequently located near the summits of the volcanoes.

The climate is dry and cold. Potential evaporation varies from 1 to 1.5 m/yr. Annual precipitation drops from 700 mm in the North to less than 100 mm in the South. Air temperature ranges from -30°C in winter (June-July) to 20°C in summer (January-February).

The two basic conditions are met for saline lakes to form : closed basins where potential evaporation largely exceeds rainfalls. The Bolivian Altiplano, indeed, contains one of the most impressive set of evaporitic basins in the world. The trough of the central Altiplano is occupied by two giant salt crusts : the salar of Uyuni, which is probably the largest salt crust in the world (10,000 km<sup>2</sup>) and the salar of Coipasa (2500 km<sup>2</sup>). The numerous undrained intravolcanic basins of the southern Altiplano (Lipez) are occupied by playas, saline lakes and salt crusts.

### The small salars of the southern Altiplano (Lipez)

About thirteen small intravolcanic salars were investigated. They show striking differences in morphology and chemistry from one salar to the other. Sodium chloride, sodium sulfates, sodium carbonates, calcium sulfate and borates are the most frequently encountered salts. However, the drainage basins, made of acidic volcanic rocks, look all alike. Why such a variability of salts and brines ? Solutes carried by springs and rivers into the salars have a double origin : (1) both weathering and hydrothermal alteration of volcanic rocks lead to sodium-bicarbonate dilute waters, and (2) the leaching of ancient buried evaporites below the extensive volcanic structures provides sodium chloride inflow waters to the salars. High concentrations of lithium and boron are not specifically related to hydrothermal activity.

The calculated evaporative evolution of the inflow waters shows that most of them should evolve as highly alkaline brines with pH above 10. The others should end as near-neutral brines. However alkaline soda lakes are rare in the Altiplano. Most lake brines belong to the Na-Cl and Na-Cl-SO<sub>4</sub> types. Smectite authigenesis observed on diatom frustules produces H<sup>+</sup> ions which neutralize some of the carbonate alkalinity (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + 2CO<sub>3</sub><sup>=</sup>) and can therefore modify the alkaline evolution of the brine toward a neutral facies. Nevertheless, such a process accounts only partially for the reduction of alkalinity. The scarcity of alkaline soda lakes has to be related essentially to the input of eolian native sulfur in the inflow waters. The sulfur is eroded by the wind from the summits of the volcanoes and deposited on the surficial formations in the surrounding areas. Spring and river waters carry along sulfur particles, which are oxidized into sulfuric acid. This acid, in turn, neutralizes a large amount of carbonate species of the inflow waters, which favors the brine concentration toward neutral facies. The same mechanism also holds during the rainy season, when ephemeral streams drain a wider area of the drainage basin.

The mixed origin of the dissolved species in the inflow waters, associated to clay authigenesis and sulfur oxidation, accounts for the high variability of the chemical facies observed in the salars of the southern Altiplano. The hydrology of the drainage basin seems to control largely the brine evolution. Inflow waters springing far upstream in the drainage basin drain for a rather long time the sulfur-enriched colluvium before reaching the salar in the central depression. These waters may oxidize and dissolve enough sulfur to modify the brine evolution. In contrast, if the springs are located right at the salar shore, inflow waters enter immediately the lake and are not in contact with the surficial sulfur. These waters can then evolve toward sodium alkaline brines, which is actually observed in the few alkaline lakes of the Altiplano.

Presently, all lakes are at relatively low levels and inflow waters often drain an important area of the drainage basin, which explain the few number of saline alkaline lakes. In contrast, at the end of the Pleistocene, lakes were at much higher levels and inflow waters rapidly penetrated the lake without interacting noticeably with the surficial formations. Alkaline soda lakes could have been more abundant. It is possible that present neutral salars are the remnants of ancient soda lakes. The chemistry of some lakes may have changed during the Quaternary.

### The giant salars of Uyuni and Coipasa

These two wide salt crusts are the remnant of saline Lake Tauca (13,000–10,000 yr BP) that dried up 10,000 years ago. Field data are provided by 43 drill wells. The crusts lie on impermeable lacustrine sediments. Maximum thickness is 11 m at Uyuni and 2 m at Coipasa. Salts are mostly halite ( $\text{NaCl}$ , 95 %) with little gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) at Uyuni, and halite with mirabilite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) at Coipasa. The crusts are very porous and filled with an intracrustal brine very rich in lithium, potassium, magnesium and boron. Lithium reserves are the highest known in the world : around 9 million tons. Other bittern solute reserves in brines are also important : around 194 million tons K, 8 million tons B and 211 million tons Mg. The highest concentrations are found at the southeastern shore, slightly downstream the mouth of the Rio Grande River, which is by far the most important tributary to the salar. Lithium and boron contents in brines are among the highest reported in the world : 4.7 g/l and 4.3 g/l respectively. Such high concentrations in a small area are due to the last 10,000 years of contribution from the Rio Grande to the intracrustal brine at the southern shore.

The paleochemistry of Lake Tauca was tentatively derived in two ways : (1) by dissolving all chemical components of the salars in the former lake volume, and (2) by simulating the evaporation of the present major inflows to the basin. The resulting chemical compositions are very different. By dissolving all salt and brines in the former lake volume the concentration of the bittern solutes Li, K, Mg and B are 5 to 50 times lower than those obtained by evaporating the present dilute waters of the Altiplano. However, both compositions present the same Na and Cl content. This suggests either a loss of the bittern solutes by infiltration of the residual brine through the bottom sediments once the crust was deposited or a strong excess of sodium chloride in the paleolake water.

To investigate such a major anomaly, a deep well was drilled down to 121 m in central Uyuni. It disclosed a complex evaporitic sequence of 12 salt crusts (halite) separated by 11 parting muds. In the lower half of the profile, thick halite beds alternate with thin mud layers. Then, the mud layers thicken upwards and show clear lacustrine features, while the thickness of the salt beds decreases markedly. Bromine geochemistry appeared to be a good tool to unravel, at least partially, the lacustrine history of the salt crusts. Bromine content in halite of all crusts of the deep well ranges from 1.3 to 10.4 ppm. Such contents are among the lowest reported in the world. Halite cannot have originated from the dilute waters draining the present formations of the Altiplano. These waters have a high Br/Cl ratio which would lead to Br content in halite of tens of ppm. The detection of halite of extremely low Br content in a gypsum diapir of the drainage basin strongly suggests that most of the halite deposited in the giant salars stems from the leaching of ancient salt formations of the Altiplano.

The deep and thick halite beds were deposited in a playa lake. Each year the basin was flooded by saline inflows which dried up leaving a thin detrital-rich halite layer of very low and fairly constant Br content (1.6–2.3 ppm). There was no permanent lake. Almost all the halite stems from the leaching of the diapirs. Thereafter, successive perennial salt lakes spread out in the central Altiplano ("intermediate lakes"). Their duration was increasing from one lake to the next. Increasing amounts of dilute inflow waters of high Br/Cl ratio draining halite-free formations, associated to the exhaustion of diapiric halite of low Br/Cl content, simultaneously increased both the thickness of the lacustrine layers and the bromine content of the salt crusts (5–10 ppm) deposited as the lakes dried up. The salt of the intermediate crusts has a triple origin : the diapirs, the partial resolution of the former deposited salt crust and the dilute inflow waters of the Altiplano.

The upper crusts show both a reduction of their bromine content and of the thickness of their associated lacustrine layers. This suggests a decrease of freshwater input that lowered the lake levels. Halite originates mostly from the resolution of the underlying salt crust deposited by the former salt lake. Therefore the very peculiar chemical composition of the last paleolake (Tauca) is due to a strong excess of sodium chloride, recycled from one lake to the

next, and not to the loss of the bittern solutes (Li, K, Mg, B) by infiltration of the intracrustal brine within the underlying sediments.

The levels of the intermediate paleolakes in the central Altiplano were rising from past to now, whereas those in the northern Altiplano (the Titicaca basin) were simultaneously falling. The progressive erosion of the threshold between northern and central Altiplano by the overflowing Rio Desaguadero lowered the level of the northern lakes and allowed more dilute waters of high Br/Cl ratio to flood the central Altiplano. Therefore, both the thickness of lacustrine sediments and the bromine content of the salt crusts were increasing from past to now.

The very low bromine content of ancient diapiiric halite is similar to that of Quaternary halite. It is probable that ancient salars of Tertiary age provided most of the salt to the recent salars. However such a mechanism only pushes the problem further back in time. What is the origin of the bromine-poor Tertiary salt? Ancient evaporites are known in Cretaceous, Permo-Triassic and Paleozoic formations. A joint study of the basin geodynamics and the geochemistry of the ancient salt formations could enlighten the origin of the large amounts of salt in the central Altiplano.

Geochemistry, Evaporites, Salars, Salt lakes, Brines, Models, Paleolimnology, Bolivian Altiplano

## Geoquímica de los lagos salados y costras salinas del Altiplano Boliviano

### RESUMEN EXTENDIDO

El Altiplano Boliviano es una extensa cuenca cerrada de 200,000 km<sup>2</sup> de superficie a unos 4000 m de altura, ubicada entre las Cordilleras Oriental y Occidental de los Andes. La Cordillera Oriental esta constituida de sedimentos paleozoicos, los cuales también componen el basamento del Altiplano. La Cordillera Occidental es una imponente cadena volcánica de edad cenozoica. Las rocas volcánicas son ácidas : andesitas a riolitas. La cuenca del Altiplano esta rellena con potentes formaciones volcano-sedimentarias cretácicas y terciarias (areniscas, limonitas, lutitas, evaporitas). Numerosos diapiros de yeso afloran en estas formaciones. El Altiplano meridional (Lipez) ha sido sometido a una intensa actividad volcánica durante el Pleistoceno y el Cuaternario. Los volcanes, los flujos de lavas y las ignimbritas descansan generalmente sobre las formaciones terciarias y delimitan numerosas pequeñas cuencas cerradas de alta elevación (4100-4600 m). Yacimientos de azufre nativo son comunes cerca de las cumbres de los volcanes.

El clima es árido y frío. La evaporación potencial es comprendida entre 1 y 1.5 m/año. Las precipitaciones anuales disminuyen de 700 mm al norte del Altiplano hasta menos de 100 mm en el extremo sur. La temperatura varía de -30°C en invierno (junio-julio) hasta 20°C en verano (enero-febrero).

Quedan reunidas las dos condiciones básicas para que un lago salado pueda establecerse : cuencas cerradas donde la evaporación potencial supera las precipitaciones. Efectivamente, el Altiplano Boliviano posee uno de los más impresionantes conjuntos de cuencas evaporíticas del mundo. La depresión central del Altiplano, a 3653 m de altura, es cubierta por dos inmensas costras salinas : el salar de Uyuni, que es probablemente la más extensa costra de sal del mundo (10,000 km<sup>2</sup>) y el salar de Coipasa (2500 km<sup>2</sup>). Las numerosas cuencas cerradas intravolcánicas del Altiplano meridional (Lipez) contienen playas, lagos salados y costras de sal.

### Los pequeños salares del Altiplano meridional (Lipez)

Se investigaron unos treinta salares en las cuencas intravolcánicas del Lipez. Estos salares son muy distintos unos de los otros, a la vez por su morfología y por su quimismo. Cloruro de sodio, sulfato de sodio, carbonatos de sodio, sulfato de calcio y boratos son las sales más comunes. Sin embargo, las cuencas intravolcánicas son muy parecidas. ¿ Porqué tales variaciones de quimismo de un salar al otro ? Los componentes disueltos en las aguas de los manantiales y ríos tienen un doble origen : (1) la alteración meteórica e hidrotermal de las rocas volcánicas produce aguas diluidas bicarbonatadas-sódicas, y (2) la disolución de antiguas evaporitas encubiertas por las extensas formaciones volcánicas origina aguas clorurada-sódicas. Los altos contenidos en litio y boro no estan específicamente relacionados con el termalismo.

La evaporación simulada de las aguas diluidas que alimentan los salares indica que la mayor parte de ellas debería evolucionar hacia salmueras alcalinas de pH superior a 10. Pocas aguas de aporte deberían producir salmueras neutrales, sin carbonatos. Sin embargo, los lagos alcalinos son escasos en el Altiplano. La mayor parte son del tipo neutral : Na-Cl o Na-Cl-SO<sub>4</sub>. Una neoformación de esmectitas ha sido observada sobre frustulas de diatomeas, lo que libera iones H<sup>+</sup> en las aguas. Estos iones neutralizan una parte de la alcalinidad carbonatada (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + 2CO<sub>3</sub><sup>=</sup>), lo que puede modificar la evolución alcalina de la salmuera hacia un facies neutral. Sin embargo, un tal mecanismo no da cuenta de toda la pérdida de alcalinidad en las aguas de aporte. La causa principal de la rareza de los lagos alcalinos

se debe al azufre nativo eólico erodado por el viento desde la cima de los volcanes y depositado en las formaciones superficiales de las cuencas de drenaje. Las aguas diluidas de los manantiales y ríos llevan partículas de azufre que se oxidan en ácido sulfúrico. Este ácido, a su vez, neutraliza una parte notable de carbonatos y bicarbonatos de las aguas de aportes, lo que favorece la evolución de las aguas por evaporación hacia las facies neutrales. El mismo proceso ocurre durante la época de lluvia cuando ríos temporales drenan una superficie más amplia de la cuenca de drenaje.

El doble origen de los componentes disueltos en las aguas de aporte, asociado con la neoformación de arcillas y la oxidación del azufre, da cuenta de la gran variedad de las facies químicos observados en los salares del Altiplano meridional. La hidrología de la cuenca de drenaje parece controlar en gran parte la evolución de las salmueras. Aguas de manantiales que emergen en zonas altas de las cuencas drenan por algún tiempo los coluviones enriquecidos en azufre antes de llegar en el salar. Estas aguas pueden oxidar y disolver suficiente azufre para modificar la evolución química de la salmuera. Al contrario, si los manantiales emergen justo al borde del salar, sus aguas penetran inmediatamente en el lago y, por lo tanto, no están en contacto con el azufre superficial. Estas aguas pueden evolucionar hacia salmueras alcalinas, lo que efectivamente se observa en los escasos lagos alcalinos del Altiplano.

Actualmente el nivel de todos los lagos está relativamente bajo. Las aguas de aporte a menudo drenan una importante superficie de las cuencas de drenaje, lo que da cuenta del reducido número de lagos alcalinos. Al contrario, al final del Pleistoceno, el nivel de los lagos estaba mucho más alto. Las aguas de aporte penetraban en los lagos sin contactos prolongados con los sedimentos superficiales. Puede ser que los lagos alcalinos hayan sido más numerosos. Es posible que algunos salares actuales de quimismo neutral son los vestigios de antiguos lagos alcalinos. La composición química de algunos lagos puede haber cambiado durante el Cuaternario.

#### Los grandes salares de Uyuni y Coipasa

Estas dos extensas costras salinas provienen de la desecación hace 10,000 años de un amplio lago salado : el lago Tauca (13,000-10,000 años B.P.). Los datos provienen de 43 pozos a través de la costra de sal. Las costras descansan sobre sedimentos lacustres impermeables. Su mayor espesor es de 11 m a Uyuni y de 2 m a Coipasa. Las sales son principalmente halita ( $\text{NaCl}$ , 95 %) con un poco de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en Uyuni, y halita con mirabilita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) en Coipasa. Las costras son muy porosas y contienen una salmuera intersticial muy rica en litio, potasio, magnesio y boro. Las reservas en litio son las más altas conocidas en el mundo : 9 millones de toneladas. Reservas en potasio (194 millones de ton.), magnesio (211 millones de ton.) y boro (8 millones de ton.) son también muy elevadas. Las mas altas concentraciones en litio (4.7 g/l) y en boro (4.3 g/l) se encuentran en la orilla sudeste, ligeramente río abajo de la desembocadura del Río Grande, el mayor tributario del salar. Estas concentraciones, que son entre las más elevadas del mundo, provienen de la acumulación durante los 10,000 últimos años de los aportes por el Río Grande en la salmuera intersticial al sudeste del salar.

La composición química del paleolago Tauca ha sido estimada de dos maneras : (1) disolviendo todas las sales y salmueras de los salares en el volumen del antiguo lago, y (2) simulando la evaporación de los principales ríos actuales de la cuenca de drenaje. Las dos composiciones químicas así obtenidas son muy diferentes. Las concentraciones en Li, K, Mg y B obtenidas por disolución de los salares son 5 a 50 veces inferiores a las concentraciones obtenidas por simulación de la evaporación de las aguas diluidas actuales del Altiplano. Sin embargo, las concentraciones en Na y Cl son similares en los dos casos. Eso sugiere, o sea una pérdida de los elementos Li, K, Mg, B por infiltración de la salmuera residual a través de los sedimentos lacustres después del secamiento del lago, o sea un gran exceso de cloruro de sodio en las aguas del lago Tauca.

Para investigar esta anomalía mayor, un sondeo de 121 m de profundidad ha sido realizado en la zona central del salar de Uyuni. Se han encontrado 12 costras de sales separadas por 11 niveles de sedimentos limosos. En la mitad inferior del perfil, espesas costras de halita alternan con delgados niveles de sedimentos limosos. Más arriba, los niveles limosos aumentan de espesor y presentan nítidos rasgos lacustres, mientras que el espesor de las costras salinas disminuye notablemente. La geoquímica del bromo dio buenos resultados para desenredar, por lo menos parcialmente, la historia lacustre de estas costras de sal. El contenido en bromo de la halita de todas las costras del sondeo profundo varía de 1.3 a 10.4 ppm. Tales concentraciones están dentro de las menores en el mundo. La halita no puede haber precipitado a partir de la evaporación de las aguas diluidas que drenan las formaciones actuales del Altiplano. Estas aguas, de alto ratio Br/Cl, precipitarían, al evaporarse, halita con decenas de ppm de bromo. El descubrimiento de halita de muy bajo contenido en bromo (2 ppm) en un diapiro de yeso de la cuenca de drenaje, indica que la mayor parte de la halita depositada en el Altiplano central proviene de la lixiviación de antiguas formaciones salinas del Altiplano.

Los profundos y espesos niveles de sal fueron depositados en un lago de tipo playa. Cada año, aportes salinos inundaban la cuenca y, al evaporarse, depositaban una delgada capa de sal rica en detríticos y de contenido en bromo aproximadamente constante (1.6-2.3 ppm). No existían lagos permanentes. Casi toda la halita de estas costras

profundas proviene de la lixiviación de los diapiros. Después, lagos permanentes, ("intermedios") separados por fases de sequía, se establecieron en el Altiplano central. El tiempo de existencia de estos lagos aumentaban de un lago al siguiente. El aumento de los aportes diluidos de alto ratio Br/Cl drenando formaciones sin halita, asociado al agotamiento de la halita diapírica de bajo ratio Br/Cl, produjo un aumento simultáneo del espesor de los niveles lacustres y del contenido en bromo de las costras salinas sobre-yacientes (5-10 ppm). La halita de estas costras intermedias tiene un triple origen : los diapiros, la disolución parcial de la costra de sal precedente y las aguas diluidas del Altiplano.

Las costras superiores muestran a la vez una disminución de su contenido en bromo y del espesor de los niveles lacustres asociados. Eso sugiere una reducción de los aportes diluidos, lo que puede haber bajado el nivel de los últimos lagos. La halita de las costras superiores proviene sobre todo de la disolución de la costra de sal depositada por el lago anterior. Entonces la composición muy especial del antiguo lago Tauca se debe a un fuerte exceso de cloruro de sodio, transmitido de un lago al siguiente, y no a una pérdida de Li, K, Mg, B por infiltración de la salmuera residual en los sedimentos lacustres.

El nivel de los antiguos lagos intermedios del Altiplano central subía de un lago al siguiente, mientras que el nivel de los lagos contemporáneos del Altiplano norte (la cuenca del lago Titicaca) bajaba simultáneamente. La erosión progresiva por el Río Desaguadero del umbral entre estas dos mayores cuencas permitió el rebalse en el Altiplano central de cantidades crecientes de aguas diluidas de alto ratio Br/Cl. Así, el espesor de los niveles lacustres y el contenido en bromo de las costras salinas aumentaba con el tiempo.

La halita cenozoica de los diapiros y la halita cuaternaria de los salares tienen contenidos extremadamente bajos en bromo. Es probable que la mayor parte de la halita de los salares cuaternarios provienen de antiguos salares terciarios. Sin embargo, un tal mecanismo hace retroceder el problema en el tiempo. ¿ De donde proviene la halita terciaria de muy bajo contenido en bromo ? Se conocen evaporitas cretácicas, permo-triásicas y paleozoicas. Se necesitaría un estudio conjunto de la geodinámica de las cuencas asociado con la geoquímica de las antiguas formaciones salinas para esclarecer el origen de las enormes cantidades de sal acumuladas en el Altiplano central.

Geoquímica, Evaporites, Salares, Lagos salados, Salmueras, Modelos, Paleolimnología, Altiplano Boliviano

## INTRODUCTION

L'Altiplano est, au coeur des Andes centrales, un vaste bassin fermé de 200 000 km<sup>2</sup> à environ 4000 m d'altitude. Il est bordé à l'Est par la Cordillère Orientale et à l'Ouest par la Cordillère Occidentale des Andes. Il appartient essentiellement à la Bolivie et marginalement au Pérou, au Chili et à l'Argentine. L'Altiplano renferme un des plus beaux et des plus vastes ensembles de bassins évaporitiques continentaux du monde : les salars.

L'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM) s'est intéressé aux Andes de Bolivie dès l'année 1968. Une première phase de recherches, axée sur la géologie structurale des Andes, s'est développée entre 1968 et 1974 (MARTINEZ et TOMASI, 1978). A partir de 1974, un programme multidisciplinaire s'est mis en place en coopération avec l'Université de La Paz. Les formations quaternaires, les bassins évaporitiques, l'hydrologie, l'hydrochimie et l'hydrobiologie du lac Titicaca, la sédimentation lacustre et la néotectonique en étaient les principaux thèmes mobilisateurs. Des numéros spéciaux de diverses revues, ainsi qu'un livre de synthèse sur le lac Titicaca, ont été dédiés aux Andes Centrales :

- Evolution récente des hauts plateaux andins de Bolivie. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, X, 1, 1978.
- Lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. trop.* (14), 4, 1981.
- Paléoclimatologie et paléolimnologie de l'Altiplano bolivien. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, XIV, 1, 1984.
- Paléolacs et paléoclimats en Amériques latine et en Afrique (20 000 ans B.P.-Actuel). *Géodynamique*, 2, (2), 1988.
- Géodynamique des Andes Centrales. *Géodynamique*, 3, (1-2), 1988.
- Géodynamique andine. Actes du Symposium international tenu à Grenoble (15-17 mai 1990). Coll. Sém., ORSTOM, 406 p., 1990.

- Lake Titicaca. A synthesis of limnological knowledge. *Monographiae Biologicae*, 68 (C. Déjoux & A. Iltis, Eds), Kluwer Academic Publishers, 584 p., 1992.

L'étude des salars a débuté en 1975. C'était une opération de développement en coopération dont le but était de faire l'inventaire et d'évaluer les ressources économiques des salars. Le Centre de Géochimie de la Surface, à Strasbourg, a joué le rôle de base arrière. Grâce aux nombreuses observations et analyses d'ordre économique, il a été possible de mettre en évidence certains problèmes géochimiques et d'en donner une interprétation scientifique. C'est ainsi que des publications se sont régulièrement intercalées entre les études appliquées. C'est pourquoi j'ai soutenu, à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, une thèse de publications, accompagnée d'un mémoire qui ne nécessitait pas, pour sa compréhension, la lecture des publications en annexe. C'est une version largement révisée de ce mémoire que je présente ici.

Cet article est divisé en quatre parties. La première présente la répartition des salars dans le monde et les principaux mécanismes de salinisation. La suivante décrit les traits généraux de l'Altiplano bolivien (géologie, climat, hydrologie) ainsi que son histoire paléolimnologique. Les deux dernières parties traitent de la géochimie des salars des deux principales provinces évaporitiques de l'Altiplano : les petits salars de l'Altiplano méridional, et les salars géants de l'Altiplano central. L'orientation géochimique de cette étude découle directement de problèmes d'ordre économique :

- la recherche de carbonates de sodium, et plus accessoirement de sulfates et de borates de sodium, dans l'Altiplano méridional,
- la localisation et l'évaluation des réserves en éléments économiquement intéressants que sont le lithium, le potassium, le magnésium et le bore dans les salars géants de l'Altiplano central.

Les salars carbonatés sodiques ont donc été recherchés et étudiés en détail. Or il est apparu qu'il y en avait très peu et que leurs réserves ne justifiaient pas une exploitation industrielle. La question que l'on s'est alors posée a été de comprendre pourquoi ce type de salar était si peu répandu sur l'Altiplano, alors que les modèles d'évolution des eaux suggéraient le contraire. On a également essayé de savoir s'il pouvait y avoir des carbonates de sodium en profondeur. Ce sont ces questions qui sont à l'origine de l'étude des petits salars du Sud de l'Altiplano.

L'évaluation des réserves en Li, K, Mg, B des salars géants de l'Altiplano central a mis en évidence une anomalie majeure. Les bilans de matière ne "bouclaient" pas. Les réserves en Li, K, Mg, B, bien qu'énormes (celles en lithium sont de loin les plus importantes connues à ce jour au monde), ne représentaient que 5 à 10 % de ce que l'on prévoyait dans le cadre de la géochimie des eaux de l'Altiplano. La question que l'on s'est alors posée a été de savoir si effectivement ces éléments avaient été perdus au cours de l'histoire lacustre du bassin et, dans l'affirmative, où ils étaient passés. Cette question a été le point de départ de l'étude des salars géants de l'Altiplano central.

## I – UBIQUITÉ ET DIVERSITÉ DES LACS SALÉS

### A – DISTRIBUTION GLOBALE

Les bassins à évaporites actuels se rencontrent dans les zones désertiques de tous les continents (BORCHERT et MUIR, 1964). Ils se répartissent le long de quatre ceintures parallèles à l'équateur (fig. 1) :

- la zone polaire arctique. On connaît effectivement des bassins évaporitiques en Alaska (HAWKINS, 1985),
- la ceinture subtropicale des grands déserts de l'hémisphère nord : Sahara, Rift africain, Mer Morte, Arabie, Tibet, désert de Gobi, Californie, Nevada, Utah, Mexique,
- la ceinture subtropicale des grands déserts de l'hémisphère sud : Altiplano (Bolivie, Chili, Argentine), Namibie, Australie,
- l'Antarctique, où se trouvent de nombreux lacs salés (MATSUBAYA *et al.*, 1979). L'antarctite ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) est un minéral évaporitique typique de cette région.

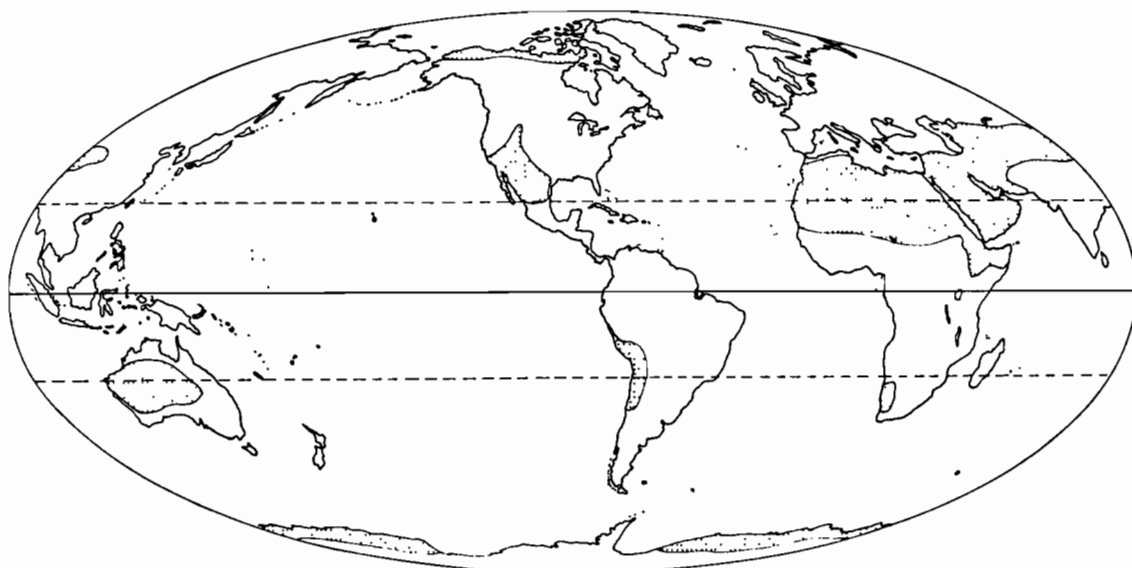


Fig.1 – *Distribution des zones arides dans le monde.* Distribution of arid areas in the world. *Distribución de las zonas áridas en el mundo*

Les tropiques sont en pointillé. *Dotted lines are tropics.* Los trópicos estan en rayitas

REF. : BORCHERT & MUIR, 1964.

Une synthèse des connaissances actuelles sur les lacs salés a été publiée par HAMMER (1986). Un des plus beaux ensembles de bassins évaporitiques se trouve sur l'Altiplano de Bolivie, entre les Cordillères Occidentale et Orientale des Andes (fig. 2). On y trouve de nombreux lacs salés et croûtes de sel au chimisme très varié. La dépression centrale de l'Altiplano est occupée par la plus grande croûte de sel du monde : le salar d'Uyuni (10 000 km<sup>2</sup>). Le potentiel économique des milieux évaporitiques de Bolivie est immense. Les réserves de lithium du salar d'Uyuni sont les plus élevées connues à ce jour dans le monde. Les réserves de potassium, magnésium et bore sont également énormes.

## B – LES MÉCANISMES GÉNÉRAUX DE LA SALINISATION DES EAUX

Nous venons de voir que de nombreuses régions continentales, de par le monde, possèdent des bassins évaporitiques. Pourquoi cela ? Généralement on relie, en un raccourci très simplificateur, la salinisation à l'aridité en parlant de "déficit en eau". En outre, on associe souvent évaporites et climat chaud, ce qui n'est pas le cas sur l'Altiplano, et encore moins dans l'Antarctique. En fait, les mécanismes exacts qui régissent la salinisation des eaux ne sont bien souvent pas clairement perçus. Afin de les préciser, nous allons envisager un modèle théorique très simple en imaginant un bassin fermé que l'on suppose très peu perméable. Le volume d'eau qui s'infiltre est négligeable en regard de tous les autres volumes d'eau considérés. Mais nous ne le supposons pas rigoureusement nul. Nous allons soumettre ce bassin théorique à des conditions climatiques de plus en plus arides. Commençons donc par faire pleuvoir.

### 1. L'acquisition des solutés

L'eau de pluie renferme un constituant fondamental : l'acide carbonique (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) qui provient de la mise en solution du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) de l'atmosphère. D'autres acides, comme l'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) et l'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>), peuvent aussi être dissous dans l'eau de pluie, notamment dans les régions industrielles. Ces acides sont les principaux agents de l'altération des carbonates et des silicates des roches

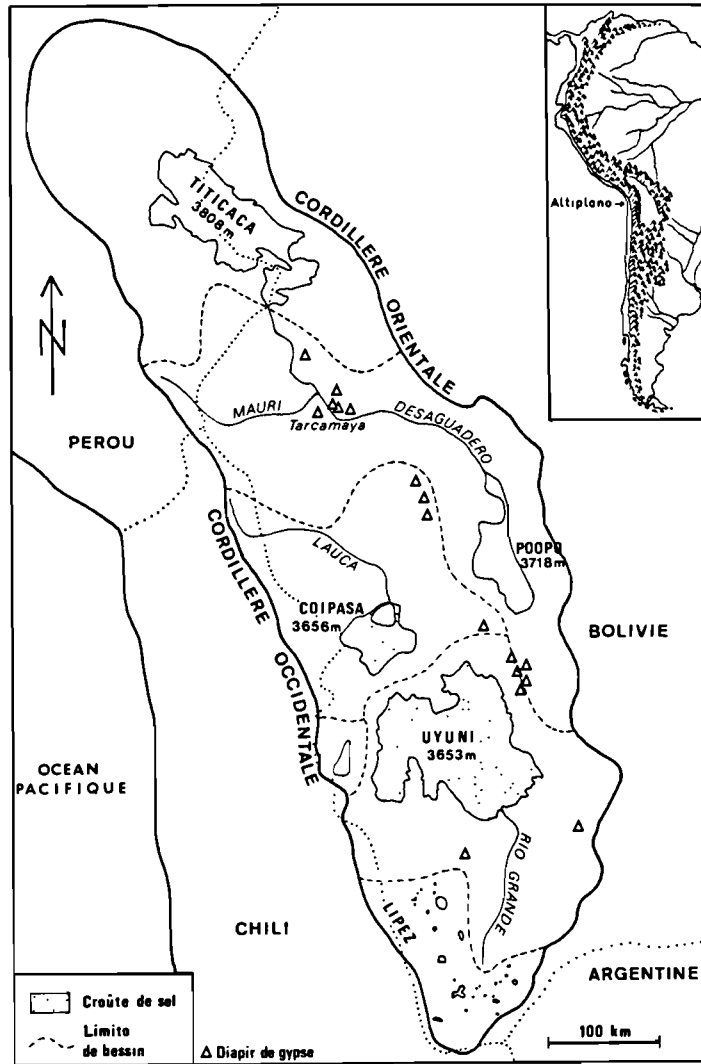
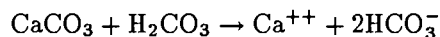


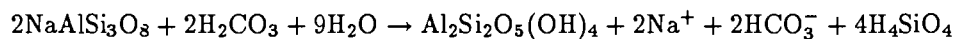
Fig.2 – L'Altiplano et ses principaux bassins hydrologiques. The Altiplano and the major drainage basins.  
*El Altiplano y sus principales cuencas de drenaje*

REF. : RISACHER, 1992.

du bassin. Par exemple la dissolution de la calcite libère du calcium et des bicarbonates :



L'altération de l'albite en kaolinite fournit du sodium, des bicarbonates et de la silice :



En plus de ce type de réactions, l'eau de pluie peut dissoudre des aérosols : chlorure de sodium près de la mer,  $\text{SO}_2$  dans les zones volcaniques ou industrielles. La dégradation de la matière organique libère dans les sols du  $\text{CO}_2$  qui devient de l'acide carbonique dans les eaux. L'oxydation des sulfures en sulfates produit de l'acide sulfurique. La plupart de ces réactions augmente l'acidité des eaux, ce qui favorise l'altération des roches. Enfin, si le bassin versant renferme des roches évaporitiques anciennes (halite, gypse), celles-ci, de par leur solubilité élevée, peuvent fournir des quantités appréciables de sels dissous. Les eaux qui s'écoulent vers le centre du bassin se chargent donc d'espèces chimiques, appelées aussi "solutés", dont les principales sont les suivantes :  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{--}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ .

## 2. Bilans hydriques et salinisation

Des approches légèrement différentes ou plus détaillées ont été publiées par HUTCHINSON (1957), LANGBEIN (1961), CARMOUZE et PEDRO (1977, 1981) et PACES (1984). Soient respectivement P et E les hauteurs annuelles des précipitations et de l'évaporation potentielle. Nous considérerons un climat à saisons contrastées : une saison des pluies suivie d'une saison sèche. C'est généralement le cas dans les régions arides. Nous supposerons également le bassin assez petit, et donc les écoulements superficiels assez rapides, pour pouvoir négliger l'évaporation pendant le ruissellement.

Soumettons tout d'abord notre bassin à un *climat non aride* : la pluviosité est supérieure à l'évaporation potentielle ( $P > E$ ). On conçoit aisément que le niveau du lac qui s'établit au fond du bassin s'élèvera d'une année à l'autre, puisque la hauteur d'eau qui tombe sur le bassin est supérieure à celle qui s'en évapore. Au bout de quelques années le niveau du lac atteindra le seuil de déversement du bassin. L'eau s'écoulera en dehors et la surface du lac sera alors définie par le seuil. Examinons les bilans d'eau et de sels dissous. Le lac étant en équilibre, il entre en une année autant d'eau qu'il en sort :

$$V_{ap} + S.P = S.E + V_{ef}$$

$$V_{ap} + S(P - E) = V_{ef} \quad (1)$$

où  $V_{ap}$  est le volume moyen annuel des apports par les versants,  $V_{ef}$  le volume moyen annuel d'eau perdu par l'effluent et S la surface du lac. Comme  $P > E$ ,  $P - E > 0$  et  $V_{ef} > V_{ap}$ . Il sort plus d'eau par l'effluent qu'il n'en rentre par les écoulements superficiels. Considérons une espèce chimique inerte, c'est-à-dire qui n'intervient pas dans la précipitation d'un minéral ou dans un processus biochimique (Cl, par exemple). Au bout d'un certain nombre d'années il s'établit dans le lac un régime stationnaire pour cette espèce. La quantité qui entre dans le lac est égale à celle qui en sort. La concentration de cette espèce dans les eaux du lac est alors constante. On peut donc écrire, en faisant l'hypothèse d'un bon mélange :

$$V_{ap}C_{ap} = V_{ef}C_{ls}$$

$$C_{ls} = C_{ap}V_{ap}/V_{ef} \quad (2)$$

où  $C_{ap}$  est la concentration moyenne de l'espèce envisagée dans les eaux d'apports et  $C_{ls}$  sa concentration stationnaire dans les eaux du lac. On a vu ci-dessus que  $V_{ef} > V_{ap}$ . Donc  $V_{ap}/V_{ef} < 1$  et  $C_{ls} < C_{ap}$ . La concentration d'une espèce inerte dans les eaux du lac est inférieure à sa concentration dans les eaux d'apports. Le lac agit comme un bassin de dilution. Il est évident que les espèces qui sont consommées par des processus géochimiques ou biochimiques dans le lac ne pourront pas davantage se concentrer. De telles conditions climatiques ne se rencontrent pas sur l'Altiplano. Un lac européen, le lac Léman, est donné en exemple dans le tableau 1.

Plaçons maintenant notre bassin en *climat aride* : l'évaporation potentielle excède les précipitations ( $E > P$ ). Si P est la hauteur de la lame d'eau qui tombe sur tout le bassin, le lac qui s'établit la première année dans la dépression centrale aura à la fin de la saison des pluies une profondeur maximum P' supérieure à P, puisque le volume d'eau tombé dans tout le bassin se concentre sur une surface plus petite. Deux cas peuvent se produire selon que la hauteur d'évaporation potentielle E est inférieure ou supérieure à P'.

Si  $E < P'$ , alors le lac ne s'assèchera que partiellement. A la fin de la saison sèche il subsistera une lame d'eau résiduelle au fond du bassin. C'est ce qui se produit en climat semi-aride lorsque P n'est pas trop inférieur à E. Le même processus se répétant les années suivantes, le niveau du lac montera progressivement. Jusqu'où montera-t-il ? Si P n'est que très peu inférieur à E, ou bien si le seuil du bassin est assez bas, alors le lac se déversera comme dans le cas précédent et son niveau sera contrôlé par la topographie. La formule (1) est toujours valable, sous une présentation légèrement modifiée :

$$V_{ap} = S(E - P) + V_{ef}$$

Comme  $E > P$ ,  $E - P > 0$  et  $V_{ef} < V_{ap}$ , au contraire de ce qui se passe en climat humide. La concentration d'une espèce chimique inerte dans les eaux du lac, lorsque le régime est devenu stationnaire pour cette espèce, s'écrit toujours :

$$C_{ls} = C_{ap}V_{ap}/V_{ef}$$

Tableau 1 – Bilans hydriques annuels de quelques lacs. Annual water budget of some lakes. Balance hídrico anual de algunos lagos

|          | P<br>m | E<br>m | S<br>km <sup>2</sup> | C <sub>ap</sub><br>mmol/l | C <sub>ls</sub><br>mmol/l | Apports                |                                    | Pertes                 |                                   |                                    |
|----------|--------|--------|----------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
|          |        |        |                      |                           |                           | S.P<br>km <sup>3</sup> | V <sub>ap</sub><br>km <sup>3</sup> | S.E<br>km <sup>3</sup> | V <sub>i</sub><br>km <sup>3</sup> | V <sub>ef</sub><br>km <sup>3</sup> |
| LEMAN    | 1      | 0,75   | 582                  | 0,089                     | 0,068                     | 0,58                   | 7,55                               | 0,44                   | ~ 0                               | 7,57                               |
|          |        |        |                      |                           |                           | <i>7,1</i>             | <i>92,9</i>                        | <i>5,5</i>             | <i>~ 0</i>                        | <i>94,5</i>                        |
| TITICACA | 0,9    | 1,7    | 8456                 | 1,51                      | 7,83                      | 7,85                   | 8,4                                | 14,5                   | 1,4                               | 0,22                               |
|          |        |        |                      |                           |                           | <i>48,3%</i>           | <i>51,7%</i>                       | <i>90%</i>             | <i>8,7%</i>                       | <i>1,4%</i>                        |
| POOPO    | 0,3    | 1,55   | 2000                 | 9,61                      | 395                       | 0,6                    | 2,56                               | 3,1                    | 0,062                             | —                                  |
|          |        |        |                      |                           |                           | <i>19%</i>             | <i>81%</i>                         | <i>98%</i>             | <i>2%</i>                         | —                                  |
| COIPASA  | 0,3    | 1,0    | 200                  | 0,115                     | 22,2                      | 0,06                   | 0,14                               | 0,2                    | 0,00073                           | —                                  |
|          |        |        |                      |                           |                           | <i>30%</i>             | <i>70%</i>                         | <i>99,6%</i>           | <i>0,4%</i>                       | —                                  |

P = précipitations ; E = évaporation ; S = surface du lac ; C<sub>ap</sub> = concentration moyenne des apports ; C<sub>ls</sub> = concentration moyenne du lac ; S.P = volume des précipitations sur la surface du lac ; V<sub>ap</sub> = volume des apports par le bassin versant ; S.E = volume évaporé à partir de la surface du lac ; V<sub>i</sub> = volume des infiltrations ; V<sub>ef</sub> = volume exporté par les effluents. Les concentrations sont celles du chlorure pour les lacs Léman, Titicaca et Poopo, et du lithium pour le lac de Coipasa. On a indiqué en italiques les pourcentages des différentes composantes des apports et des pertes d'eau.

P = precipitations ; E = evaporation ; S = lake surface ; C<sub>ap</sub> = mean concentration of inflows ; C<sub>ls</sub> = mean concentration of the lake ; S.P = volume of precipitations on the lake surface ; V<sub>ap</sub> = volume of inflows from the drainage basin ; S.E = volume evaporated from the lake surface ; V<sub>i</sub> = volume of infiltrations ; V<sub>ef</sub> = volume of outlet waters. Conservative component is chloride for lakes Lemman, Titicaca and Poopo, and lithium for lake Coipasa. Percentage of inflows and losses are in italics.

P = precipitaciones ; E = evaporación ; S = superficie del lago ; C<sub>ap</sub> = concentración promedia de los aportes ; C<sub>ls</sub> = concentración promedia del lago ; S.P = volumen de las precipitaciones sobre la superficie del lago ; V<sub>ap</sub> = volumen de los aportes de la cuenca de drenaje ; S.E = volumen evaporado desde la superficie del lago ; V<sub>i</sub> = volumen de las infiltraciones ; V<sub>ef</sub> = volumen exportado por los efluentes. Las concentraciones son las del cloruro para los lagos Lemman, Titicaca y Poopó, y del litio para el lago Coipasa. Los porcentajes de aportes y pérdidas de agua son indicados en itálicas.

REF. : Lemman : MEYBECK, 1970 ; Titicaca : CARMOUZE & AQUIZE JAEN, 1981 ; Poopo : CARMOUZE *et al.*, 1978 ; Coipasa : RISACHER & FRITZ, 1991 b.

Mais cette fois V<sub>ap</sub>/V<sub>ef</sub> > 1 et la concentration de l'espèce chimique inerte dans les eaux du lac est supérieure à sa concentration dans les eaux d'apport. Les eaux du lac se concentrent. C'est le cas du lac Titicaca (CARMOUZE et AQUIZE JAEN, 1981). La salinité totale des eaux du lac est environ quatre fois plus élevée que celle des apports.

Revenons à notre bassin théorique et réduisons un peu la hauteur de pluie de sorte qu'il n'y ait plus déversement. Le niveau du lac se stabilise en dessous du seuil de déversement du bassin. Comment ce niveau est-il défini ? Déjà en 1715, Edmund HALLEY (le découvreur de la comète) avait compris le mécanisme fondamental qui régit l'existence de ce type de lac : *"Maintenant je conçois, puisque tous ces lacs reçoivent des rivières et n'ont ni effluent ni déversoir, qu'il est donc nécessaire que leurs eaux montent et couvrent le pays jusqu'à ce que leurs surfaces soient assez étendues pour exhaler en vapeur toute l'eau qui est amenée par les rivières"*.

Lorsque le niveau du lac est stable, on a donc le bilan (fig. 3) :

$$V_{ap} + S.P = S.E$$

$$V_{ap} = S(E - P) \quad (3)$$

Cette formule est fondamentale. Elle est également très simple et ne comporte qu'une seule approximation, presque toujours vérifiée dans la réalité : le volume des infiltrations par le fond du lac est négligeable. Dans notre modèle V<sub>ap</sub> correspond à un écoulement superficiel. En réalité cette formule est parfaitement valable

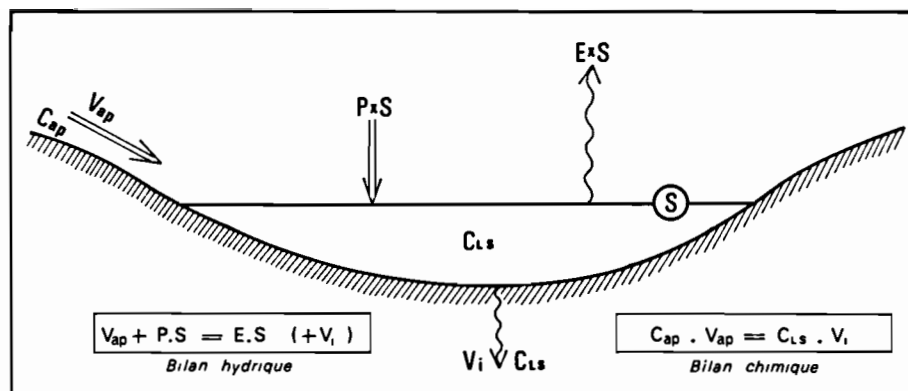


Fig.3 – Modèle d'un lac permanent en climat aride. Perennial lake model in an arid climate. Modelo de un lago permanente en clima árido

quelle que soit la forme des apports : rivières, sources, ruissellement, décharge de nappes... Elle ne dépend que des paramètres climatiques E et P, du volume des apports et de la surface du lac. Le volume du lac n'intervient pas. *Un lac en climat aride est donc caractérisé par sa surface d'équilibre et non par son volume. La forme du fond du bassin, et donc la profondeur du lac, n'importe pas.* Si l'on parvient à mesurer E et P, la surface du lac étant facilement déterminable, on peut en déduire très simplement le volume annuel des apports. Réciproquement, si l'on parvient à déterminer  $V_{ap}$ , par exemple lorsqu'un fleuve fournit l'essentiel des apports, alors il est possible d'en déduire l'évaporation, paramètre difficile à mesurer directement.

En ce qui concerne le bilan des sels, un soluté se concentre théoriquement jusqu'à ce qu'il participe à une réaction bio- ou géochimique, comme la précipitation d'un minéral. A partir de là il peut soit se diluer, soit continuer à se concentrer, mais à un rythme plus lent. En réalité, aucun fond de lac n'est totalement imperméable. Il s'infiltre toujours une quantité, même très faible, d'eau. C'est pourquoi nous avons bien précisé au début de cette étude que notre bassin théorique n'était pas rigoureusement imperméable. Soit  $V_i$  le volume annuel d'eau du lac qui s'infiltre par le fond. Il est négligeable devant les autres volumes :  $V_{ap}$ , S.P et S.E. Chaque année il entre dans le lac une masse  $C_{ap}V_{ap}$  d'un constituant que nous considérerons inerte, et il s'en infiltre par le fond une masse  $C_iV_i$ ,  $C_i$  étant la concentration de l'espèce dans le lac. Tant que la quantité qui entre dans le lac est supérieure à celle qui en sort,  $C_i$  augmente d'une année à l'autre et la quantité qui en part,  $C_iV_i$ , augmente également. Mais puisque la quantité qui entre dans le lac,  $C_{ap}V_{ap}$ , reste constante, il arrivera un moment où les pertes compenseront exactement les apports (fig. 3) :

$$C_{ap}V_{ap} = C_iV_i$$

La concentration du constituant inerte dans les eaux du lac est alors constante :

$$C_i = C_{ap}V_{ap}/V_i \quad (4)$$

Insistons bien sur le fait que cette formule n'est valable que si le lac est en équilibre dynamique pour les constituants dissous, c'est-à-dire lorsqu'il en entre autant qu'il en sort. C'est souvent difficile à démontrer. Par exemple, on peut raisonnablement supposer que le lac Poopo est en équilibre dynamique. Le lac est de faible volume, très peu profond, et la salinité de ses eaux, bien que pouvant varier très fortement d'une année à l'autre, est limitée. Ceci suggère que la salinité des eaux du lac, essentiellement définie par les constituants inertes sodium et chlorure, est limitée par les infiltrations. Par contre il faut se méfier des lacs de grand volume qui ont été soumis à des changements climatiques récents. Ils peuvent encore être en train de se concentrer, ou de se diluer, très lentement. Dans ce cas la formule (4) donne une valeur limite supérieure des infiltrations, ce qui est aussi une donnée très utile. Le tableau 1 présente quelques bilans hydriques de grands lacs de l'Altiplano.

L'application de la formule (4) montre que le volume des infiltrations des lacs salés Poopo et Coipasa ne représente respectivement que 2% et 0,4% des apports. Pour le bilan hydrique de tels volumes sont

négligeables, car bien en deçà des incertitudes sur les mesures de volumes d'eau. *Par contre, ce volume infiltré ne peut absolument pas être négligé pour le bilan chimique du lac. C'est lui qui détermine la salinité des eaux du lac.*

Nous venons d'étudier le cas où la hauteur d'évaporation potentielle  $E$  est inférieure à l'épaisseur  $P'$  de la lame d'eau qui s'accumule la première année au fond de notre bassin imaginaire. Réduisons encore les pluies de telle sorte que  $P'$  soit inférieur à  $E$ . Dans ce cas le lac s'assèchera complètement à la fin de chaque saison sèche et déposera la totalité de ses constituants dissous en une mince couche de sel. C'est ce qu'on appelle un lac de type "playa". Il s'inonde et s'assèche chaque année en déposant une faible quantité de sel. C'est partiellement le cas du salar de Coipasa ainsi que de plusieurs petits salars du Sud de l'Altiplano. La bordure sud du salar d'Uyuni, en aval du delta du Rio Grande, correspond partiellement à ce modèle. Il existe des lacs de type playa, notamment aux Etats-Unis, un peu plus complexes que le modèle très simple présenté ici. Il est fréquent qu'il ne pleuve jamais, ou très peu, sur le lac lui-même. L'essentiel de son alimentation provient alors de pluies loin en amont sur les versants, lesquelles alimentent des nappes et des rivières qui se déversent au fond du bassin (EUGSTER et HARDIE, 1978).

Supposons à présent qu'un changement climatique augmente sensiblement l'aridité dans une région où se trouve un lac salé permanent et assez profond. Celui-ci va s'assécher très rapidement (quelques siècles) en déposant une croûte de sel assez épaisse. C'est le cas du salar d'Uyuni. Il provient de l'assèchement, il y a 10 000 ans, d'un lac salé de 70 m de profondeur.

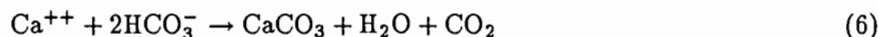
De cette brève étude il ressort plusieurs faits (RISACHER, 1992) :

- La condition fondamentale d'existence des milieux évaporitiques est que *l'évaporation potentielle soit supérieure aux précipitations*. Cette condition est nécessaire, mais non suffisante. Contrairement à une idée assez répandue, la température ne joue pas un rôle déterminant dans la formation des milieux évaporitiques. A l'échelle de la planète, cette condition climatique se rencontre dans quatre ceintures parallèles à l'équateur qui sont des zones de hautes pressions (fig. 1).
- La deuxième condition nécessaire à l'établissement de milieux évaporitiques est la présence de *bassins fermés*. Cette fermeture doit être double. D'abord topographique : il faut une dépression. Ensuite lithologique : les pertes par infiltrations doivent être réduites. Il faut donc que le bassin se colmate. C'est là un processus sédimentologique naturel puisque les particules détritiques les plus fines s'accumulent dans les zones les plus basses. Plus le bassin se colmate, plus élevée sera la salinité des eaux qui le remplissent.
- La salinité des eaux augmente avec l'aridité. Cela est bien illustré par l'augmentation de la teneur en sels des eaux superficielles de l'Altiplano depuis le lac Titicaca (1 g/l) jusqu'aux flaques superficielles au Sud du salar d'Uyuni (400 g/l). Mais il n'en va pas de même pour les masses de sels. Les plus grandes quantités de sels s'accumulent de préférence dans des lacs salés permanents assez profonds, donc pour des aridités faibles à moyennes, où l'évaporation potentielle n'est pas trop supérieure à la pluviosité. En climat non aride les sels sont éliminés par les effluents. *En climat très aride il y a peu d'eau disponible, donc peu d'apports par le bassin et peu de sels en solution, même si leurs concentrations sont élevées*. A la limite, mentionnons le cas trivial de l'aridité absolue : s'il ne pleut jamais, aucune accumulation saline n'est possible. On peut faire le rapprochement entre le salar d'Uyuni et les énormes masses salifères du passé, comme celles du Zechstein et du Messinien. Ces dépôts de sel proviennent de l'assèchement de mers entières suite, en partie, à une aridification du climat au Permien et au Miocène.

## C – DIVERSITÉ CHIMIQUE DES ÉVAPORITES CONTINENTALES

Les eaux d'apports, une fois accumulées au fond du bassin, sont soumises à l'évaporation et vont précipiter une séquence de minéraux de solubilité croissante. Le modèle que nous allons décrire et appliquer aux salars de Bolivie a été développé par HARDIE et EUGSTER (1970) et EUGSTER et HARDIE (1978). Nous présentons une version "didactique" légèrement simplifiée. Deux approches plus rigoureuses et différentes sont décrites par RISACHER, 1978 a et RISACHER et FRITZ, 1991 a. Le premier minéral qui précipite est presque toujours

la calcite :  $\text{CaCO}_3$ , minéral très peu soluble. On peut écrire sa précipitation soit à partir des carbonates ( $\text{CO}_3^{--}$ ), soit à partir des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) :



La loi d'action de masse s'écrit pour chacune de ces réactions :

$$(\text{Ca}^{++})(\text{CO}_3^{--}) = K_1 \quad (7)$$

$$(\text{Ca}^{++})(\text{HCO}_3^-)^2 = K_2(\text{H}_2\text{O})\text{PCO}_2 \quad (8)$$

$(\text{Ca}^{++})$ ,  $(\text{CO}_3^{--})$ ,  $(\text{HCO}_3^-)$  sont les activités des ions en solution,  $(\text{H}_2\text{O})$  est l'activité de l'eau, très voisine de 1 à ce stade de l'évolution, et  $\text{PCO}_2$  est la pression partielle du  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère. C'est une constante.  $K_1$  et  $K_2$  sont deux valeurs du produit de solubilité de la calcite. Ce sont des constantes qui ne dépendent que de la température et de la pression.

Les concentrations en carbonates ( $\text{CO}_3^{--}$ ) et bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) dépendent du pH de la solution. Considérons tout d'abord une solution initiale dans laquelle les carbonates sont dominants. Nous négligerons ici les bicarbonates. Ce sont donc la réaction (5) et l'équation (7) qui doivent être prises en compte. Aux faibles salinités qui correspondent à la précipitation précoce de la calcite, les activités varient dans le même sens que les concentrations et leur sont approximativement proportionnelles. Lorsque la solution se concentre par évaporation tout en précipitant la calcite, il est clair que  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{CO}_3^{--}$  ne peuvent pas se concentrer simultanément, puisque le produit de leurs activités  $(\text{Ca}^{++})(\text{CO}_3^{--})$ , et donc en première approximation le produit de leurs concentrations, doit être maintenu constant. Si la concentration de l'un augmente, alors celle de l'autre doit diminuer. Ce sont les proportions initiales en  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{CO}_3^{--}$  qui vont déterminer lequel des deux constituants se concentrera. *Si au départ il y a plus de calcium que de carbonates, alors le calcium se concentrera et les carbonates diminueront. La solution évolue vers un faciès chimique pauvre en carbonates et riche en calcium, donc de pH neutre (vers 7-8). C'est la voie saline neutre. Par contre, si au départ il y a plus de carbonates que de calcium, alors l'évolution inverse se produit : la solution s'appauvrit en calcium et s'enrichit en carbonates. Le pH se stabilise vers 9-10. C'est la voie alcaline.*

Envisageons maintenant une solution initiale dans laquelle les bicarbonates dominent. On néglige ici les carbonates. On peut tenir le même raisonnement qu'avec les carbonates. Il est impossible de concentrer simultanément une eau en calcium et en bicarbonates. La seule différence est qu'il faut cette fois comparer le double de la concentration en calcium à la concentration des bicarbonates pour déterminer laquelle des voies sera suivie par la solution au cours de l'évaporation.

*On constate que la dichotomie fondamentale de l'évolution des eaux par évaporation dépend des proportions relatives entre le calcium et les espèces carbonatées dans l'eau initiale. Il suffit d'une faible variation de cette proportion pour modifier fondamentalement le chimisme de la saumure finale.* Nous avons envisagé des eaux à carbonates, puis à bicarbonates dominants. En réalité on a souvent les deux espèces dans la solution initiale. C'est pourquoi, dans la pratique, on ne considère ni les carbonates ni les bicarbonates, mais l'alcalinité carbonatée de la solution :

$$\text{alc} = 2[\text{CO}_3^{--}] + [\text{HCO}_3^-] \quad (9)$$

Les crochets représentent les concentrations. On démontre, grâce à la notion d'alcalinité résiduelle, qu'il suffit de comparer  $\text{alc}$  et  $2[\text{Ca}^{++}]$  pour prévoir de façon rigoureuse l'évolution de la solution (AL-DROUBI *et al.*, 1980). Si  $\text{alc}$  est supérieur à  $2[\text{Ca}^{++}]$  dans l'eau initiale, celle-ci évoluera vers la voie alcaline ; par contre si  $\text{alc}$  est inférieur à  $2[\text{Ca}^{++}]$ , alors c'est la voie saline neutre qui sera suivie.

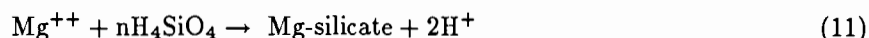
Considérons la voie saline neutre. Le calcium se concentre et les espèces carbonatées diminuent. Le prochain minéral qui précipite dans cette voie est en général le gypse :  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . On a alors la relation :

$$(\text{Ca}^{++})(\text{SO}_4^{--})(\text{H}_2\text{O})^2 = K_3 \quad (10)$$

$K_3$  est le produit de solubilité du gypse. Le mécanisme décrit pour  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{CO}_3^{--}$  s'applique pareillement pour  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{SO}_4^{--}$ . Si au début de la précipitation du gypse il y a plus de calcium que de sulfates, alors

la solution se concentre en calcium et s'appauvrit en sulfates. La solution évolue vers un faciès du type Na-Ca-(Mg)-Cl. Au contraire, s'il y a plus de sulfates que de calcium, alors la solution évolue vers un faciès du type Na-(Mg)-Cl-SO<sub>4</sub>.

Envisageons à présent la voie alcaline. La solution s'enrichit en carbonates et s'appauvrit en calcium. Le gypse ne pourra donc pas précipiter. Mais on observe que beaucoup d'eaux, qui au départ s'engagent dans cette voie, modifient brusquement leur évolution et finissent par produire des saumures neutres. Cette déviation est due à la formation de silicates de magnésium, minéraux très fréquents dans ces milieux mal drainés. On peut écrire schématiquement le bilan de la réaction :



On voit que la néoformation de silicates magnésiens libère des ions H<sup>+</sup> qui vont neutraliser une partie des carbonates et des bicarbonates, ce qui peut inverser l'évolution de la solution au cours de l'évaporation. Dans la pratique on compare l'alcalinité, alc, à la somme : 2[Ca<sup>++</sup>] + 2[Mg<sup>++</sup>] dans l'eau initiale. Si alc est supérieur à 2[Ca<sup>++</sup>] + 2[Mg<sup>++</sup>], alors les néoformations de silicates magnésiens ne sont pas suffisantes pour modifier l'évolution de la solution vers la voie saline neutre. Par contre, si alc est supérieur à 2[Ca<sup>++</sup>] mais inférieur à 2[Ca<sup>++</sup>] + 2[Mg<sup>++</sup>], alors la solution verra son évolution modifiée par la précipitation des silicates magnésiens vers la voie saline neutre. La figure 4 résume cette discussion.

Notons que la néoformation de silicates magnésiens n'est pas limitée à la voie alcaline. Ils peuvent aussi précipiter dans la voie saline neutre. Mais dans ce cas ils ne modifient pas fondamentalement cette voie évolutive. Par contre, ils pourront régir le comportement du magnésium dans cette voie évolutive. Le modèle que nous venons d'étudier est en fait très simplifié. On peut le compliquer à souhait. Mais d'une part l'intérêt didactique disparaît sous l'enchevêtrement des voies intermédiaires envisagées, et d'autre part, bien que schématique, ce modèle décrit de façon très satisfaisante les traits majeurs de l'évolution d'un grand nombre d'eaux naturelles soumises à l'évaporation. Si l'on souhaite davantage de précision, il faut alors se tourner vers les modèles informatiques (FRITZ, 1975 ; RISACHER et FRITZ, 1984a). Ceux-ci calculent de façon rigoureuse, en se basant sur les lois de l'équilibre thermodynamique, et sans aucune approximation, l'évolution de la composition des solutions soumises à l'évaporation et déterminent la séquence des minéraux précipités. Ils tiennent également compte dans une large mesure des effets de température (RISACHER et FRITZ, 1984b).

Le chimisme des eaux d'altération et des saumures qui en dérivent est lié à la lithologie du bassin versant. Les roches cristallines et volcaniques, sans impuretés ni minéralisations, ne peuvent fournir aucun anion en quantité appréciable dans les eaux d'altération. L'anion majeur est alors HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, lequel provient, comme nous l'avons vu, de l'atmosphère. Au cours de l'évaporation, ces eaux évolueront donc en suivant la voie alcaline. Ce sont surtout des carbonates qui précipiteront : calcite (CaCO<sub>3</sub>), magnésite (MgCO<sub>3</sub>), dolomite (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), hydromagnésite (Mg<sub>5</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>(OH)<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O), trona (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.NaHCO<sub>3</sub>.2H<sub>2</sub>O), natron, (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.10H<sub>2</sub>O), thermonatrite (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.H<sub>2</sub>O). En réalité, impuretés, inclusions fluides et minéralisations peuvent apporter certaines quantités d'autres anions, essentiellement du chlorure et du sulfate, ce dernier pouvant même dominer si les sulfures sont abondants dans le bassin. En général, les lacs carbonatés sodiques se trouvent effectivement dans des bassins cristallins (Sierra Nevada, GARRELS et MACKENZIE, 1967 ; natronières du Tchad, MAGLIONE, 1976) ou volcaniques (lac Magadi, EUGSTER, 1970 ; lac Natron, GUEDDARI, 1984). C'est là un motif d'étonnement fréquent pour le néophyte que de voir de telles quantités de carbonates au fond d'un bassin dont les versants en sont totalement dépourvus. Les roches sédimentaires, par contre, apportent des quantités notables de chlorure et de sulfate. En général les eaux qui drainent les bassins sédimentaires évoluent vers des faciès neutres.

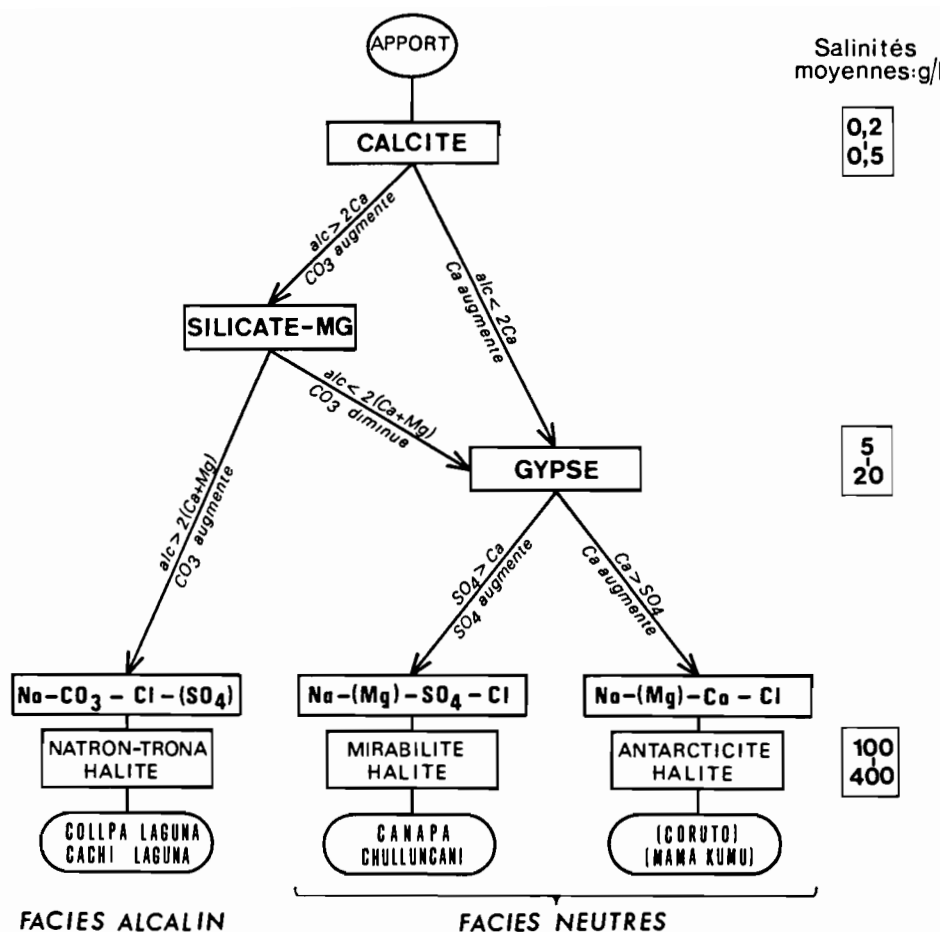


Fig.4 - *Diagramme théorique d'évolution des eaux soumises à l'évaporation.* Theoretical flow sheet for evaporative concentration of dilute waters. *Diagrama teórico de evolución de aguas diluidas sometidas a evaporación*

Les concentrations indiquées à droite des minéraux sont approximativement celles des solutions à ce stade de l'évolution. Deux exemples de salars boliviens sont donnés pour chaque faciès chimique terminal. Les saumures de Coruto et Mama Kumu appartiennent bien à la voie évolutive indiquée, mais ne sont pas assez concentrées pour précipiter l'antarctite.

*Concentrations quoted for each mineral are very roughly those corresponding at this stage of brine evolution. Two examples of Bolivian salars are given for each chemical facies. Coruto and Mama Kumu brines actually belong to the reported evolution path, but they are not enough concentrated to reach antarctite saturation.*

Las concentraciones indicadas para cada mineral corresponden aproximadamente a este nivel de evolución. Dos salares bolivianos ilustran cada faciès químico. Las salmueras de Coruto y Mama Kumu pertenecen efectivamente a la vía evolutiva indicada, pero no están suficientemente concentradas para precipitar la antarctita.

REF. : HARDIE & EUGSTER, 1970 ; RISACHER, 1992.

## II - PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES SALARS DE L'ALTIPLANO BOLIVIEN

### A - GÉOLOGIE

Le socle précambrien est de nature granitique et cristallophyllienne. La Cordillère Orientale est constituée principalement de sédiments paléozoïques (grès, schistes, pélites, quartzites) traversés par des plutons grano-dioritiques auxquels sont associés les fameux gisements d'étain boliviens (fig. 5 et 6). Les forma-

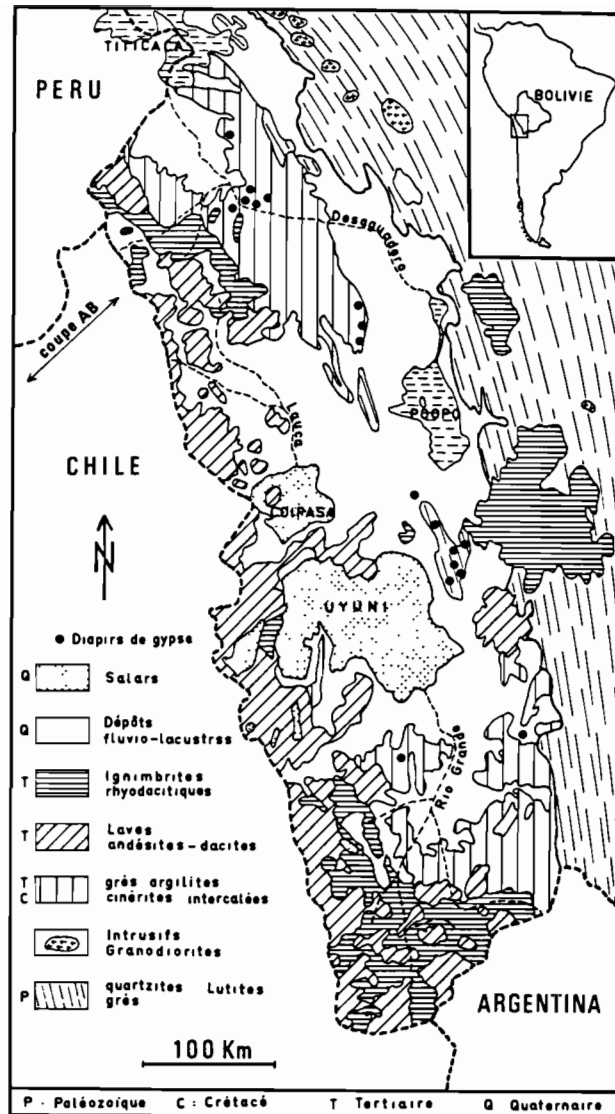


Fig.5 – Carte géologique de l'Altiplano bolivien. Geologic map of the Bolivian Altiplano. *Mapa geológico del Altiplano Boliviano*

REF. : *Geobol.*, 1978 ; RISACHER & FRITZ, 1991 b.

tions précambriennes et paléozoïques constituent le substratum de l'Altiplano. Elles sont recouvertes par de puissantes séries volcano-sédimentaires, fortement plissées et faillées, d'âge crétacé, tertiaire et quaternaire, pouvant atteindre 15 000 m d'épaisseur (grès, conglomérats, argilites, "shales", marnes, calcaires, évaporites). De nombreux diapirs de gypse d'âge crétacé et tertiaire affleurent au Nord et au centre-Est de l'Altiplano, notamment le diapir de Tarcamaya (fig. 2). L'Altiplano central s'est affaissé en graben au cours du Crétacé et du Tertiaire, ce qui a permis l'établissement de lacs et de salars, au moins depuis le Pléistocène. On ignore à quel moment l'Altiplano s'est fermé (AHLFELD, 1972 ; MARTINEZ et TOMASI, 1978).

La Cordillère Occidentale est essentiellement d'origine volcanique. Au cours du Cénozoïque une intense activité volcanique a affecté l'Ouest et le Sud de l'Altiplano. Les volcans, les coulées de laves et les ignimbrites reposent en général sur les formations tertiaires. Ils délimitent au Sud de l'Altiplano, dans la région du Lipez, de nombreux petits bassins fermés d'altitude élevée (4100-4500 m ; Pl. I, 1-2). Les roches volcaniques sont

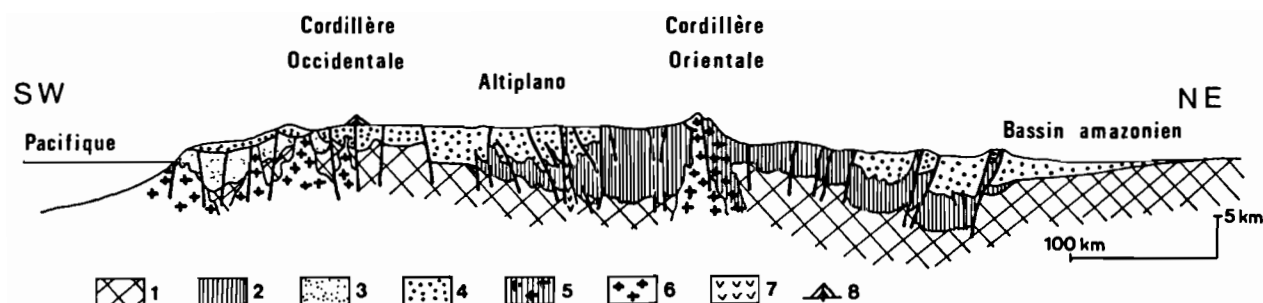


Fig.6 - Coupe géologique simplifiée (AB) à travers les Andes centrales (localisation sur la figure 5). Diagrammatic section (AB) through the Central Andes (localization in fig. 5). Corte geológico simplificado (AB) transversal a los Andes centrales (ubicación en la fig. 5)

1 : socle précambrien ; 2 : Paléozoïque ; 3 : Trias, Jurassique, Crétacé inf. ; 4 : Crétacé terminal, Tertiaire ; 5 : granites hercyniens ; 6 : granites andins ; 7 : volcanisme tertiaire ; 8 : volcans quaternaires.

1 : Precambrian basement ; 2 : Paleozoic ; 3 : Triassic, Jurassic, Early Cretaceous ; 4 : Late Cretaceous, Tertiary ; 5 : Hercynian granites ; 6 : Andean granites ; 7 : Tertiary volcanism ; 8 : Quaternary volcanoes.

1 : zócalo precámbrico ; 2 : Paleozoico ; 3 : Triasico, Jurásico, Cretácico inf. ; 4 : Cretácico terminal, Terciario ; 5 : granitos hercínicos ; 6 : granitos andinos ; 7 : volcanismo terciario ; 8 : volcanes cuaternarios.

REF. : MARTINEZ & TOMASI, 1978.

surtout de type acide : andésites à rhyodacites (FERNANDEZ *et al.*, 1973). Le soufre natif est abondant vers les sommets des volcans (Pl. I, 8).

## B - CLIMAT

Les données météorologiques, relativement abondantes pour l'Altiplano nord, deviennent de plus en plus éparées et douteuses lorsqu'on descend vers le Sud désertique (tabl. 2). On ne peut qu'extrapoler les rares données des zones voisines du Chili et de l'Argentine. Par ailleurs, des mesures de températures et d'évaporation ont été effectuées pendant les missions de terrain.

Tableau 2 - Données climatiques de l'Altiplano bolivien. Climatic data of the Bolivian Altiplano. Datos climáticos del Altiplano Boliviano

|                   | Températures °C |     |     | Précipitations<br>mm/an | Evaporation<br>mm/an |
|-------------------|-----------------|-----|-----|-------------------------|----------------------|
|                   | moy             | max | min |                         |                      |
| Altiplano nord    | +15             | +25 | -15 | 700                     | 1000-1500            |
| Altiplano central | +10             | +20 | -20 | 300                     | 1000-1500            |
| Altiplano sud     | + 7             | +15 | -30 | 100                     | 1000-1500            |

Le climat est sec et froid, avec de fortes variations du Nord au Sud (fig. 7 et 8). Il est caractérisé par l'alternance d'une saison sèche et froide en hiver (avril à novembre) et d'une saison moins froide et pluvieuse en été (décembre à mars). La pluviosité décroît de 700 mm au Nord, sur le bassin du lac Titicaca, jusqu'à 100 mm à l'extrême Sud. Les températures moyennes annuelles diminuent également de 10°C au Nord à environ 5°C au Sud. En hiver, dans le Lipez, la température peut descendre jusqu'à -30°C la nuit.

L'évaporation potentielle est très difficile à estimer. C'est la hauteur maximale d'eau que peut évaporer l'atmosphère, par opposition à l'évaporation réelle qui est la hauteur d'eau effectivement évaporée, laquelle dépend bien sûr de la quantité d'eau disponible. Les basses températures peuvent geler les plans d'eau pendant plusieurs mois, ce qui réduit la hauteur d'évaporation. Mais dans le cas d'eaux salées, la température de congélation s'abaisse notablement. Le lac ne sera gelé que peu de temps ou même pas du tout. Cela devrait

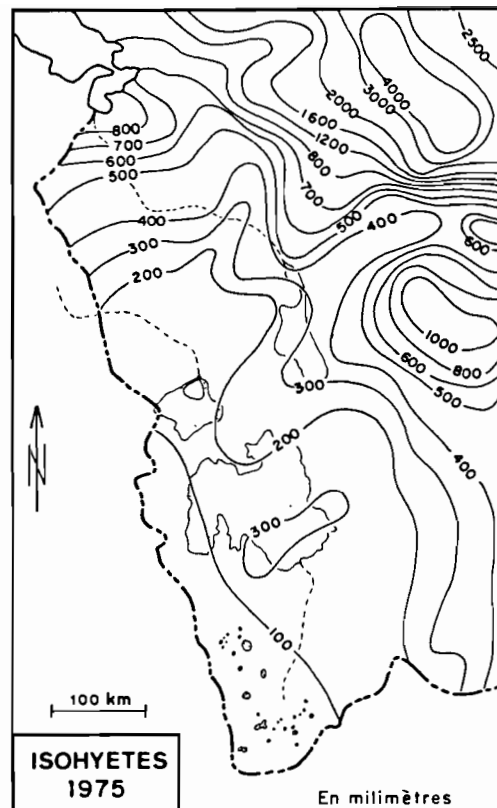
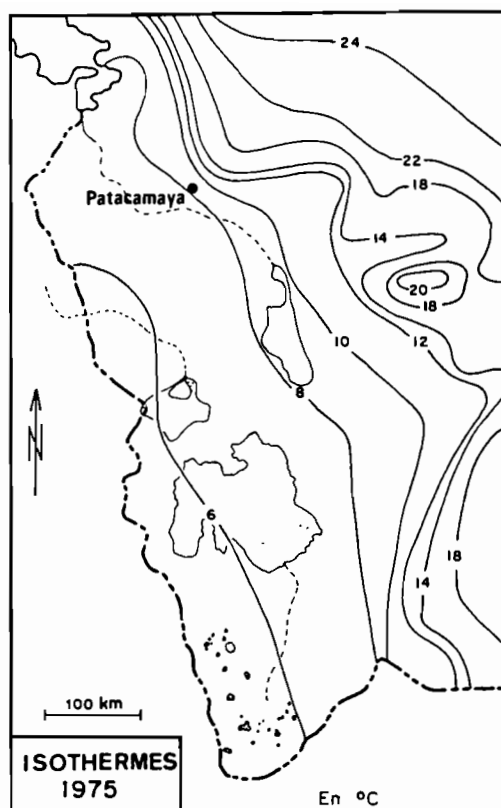
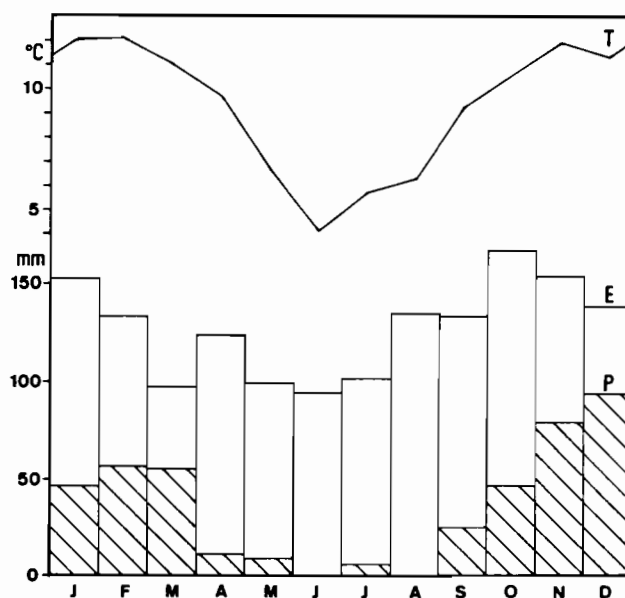


Fig.7 - Isothermes et isohyètes du Sud-Ouest de la Bolivie. Isotherms and isohyets of south-western Bolivia. *Isotermas e isoyetas del sud-oeste de Bolivia*  
REF. : MINISTERIO DE TRANSPORTE, 1975.

Fig.8 - Distribution mensuelle des précipitations ( $P$  mm), de l'évaporation potentielle ( $E$  mm) et de la température ( $T^{\circ}C$ ) à Patacamaya en 1977 (fig. 7). Monthly distribution of precipitations ( $P$  mm), potential evaporation ( $E$  mm) and temperature ( $T^{\circ}C$ ) at Patacamaya in 1977 (fig. 7). *Distribución mensual de las precipitaciones ( $P$  mm), de la evaporación potencial ( $E$  mm) y de la temperatura ( $T^{\circ}C$ ) en Patacamaya en 1977 (fig. 7)*  
REF. : VACHER, inédit - unpublished - inédito.



donc favoriser l'évaporation. Mais un autre phénomène joue en sens inverse : la vitesse d'évaporation d'une saumure diminue régulièrement lorsque la salinité augmente. On voit la difficulté à estimer l'évaporation, potentielle ou réelle. La plupart des données dont on dispose actuellement indiquent une hauteur d'évaporation potentielle comprise entre 1000 et 1500 mm/an sur tout l'Altiplano, sans qu'il soit possible de détecter un gradient net du Nord au Sud (CARMOUZE et AQUIZE JAEN, 1981 ; RAMIREZ, 1985 ; MARIACA, 1985 ; VACHER *et al.*, 1988 ; mesures inédites dans le salar d'Atacama au Chili et dans la boratière de Tincalayu en Argentine). De toute façon, le point essentiel est que l'évaporation potentielle est toujours supérieure à la pluviosité, partout dans l'Altiplano, l'écart augmentant fortement du Nord au Sud.

Il est bien évident que l'aridité et les basses températures ne favorisent pas le développement des sols et de la végétation. A l'extrême Sud du Lipez, près de l'Argentine, le paysage est totalement minéral, sans la moindre trace de végétation.

## C - HYDROLOGIE ACTUELLE

L'Altiplano est divisé en plusieurs bassins hydrologiques (fig. 2 et 9). Au Nord, le lac Titicaca, à 3808 m d'altitude, est le plus grand plan d'eau navigable du monde (8560 km<sup>2</sup>) situé à une telle altitude (BOULANGE et AQUIZE JAEN, 1981). Le fond du lac, à 284 m de profondeur, est le point le plus bas de l'Altiplano. Le lac est essentiellement alimenté par quatre grandes rivières, de 300 mg/l de salinité moyenne. Les eaux du lac contiennent environ 1 g/l de sels dissous, ce qui permet encore de le classer parmi les lacs d'eau douce. Le bilan hydrique du lac est donné dans le tableau 1 (CARMOUZE et AQUIZE JAEN, 1981 ; CARMOUZE *et al.*, 1981). Une synthèse de toutes les données hydriques, chimiques et biologiques du lac Titicaca a été publiée (référence dans l'introduction).

Le lac Titicaca se déverse au Sud par le Rio Desaguadero dans le lac Poopo, un lac salé chloruré sodique de 2300 km<sup>2</sup> situé à 3686 m d'altitude. A l'exutoire du lac Titicaca le Rio Desaguadero a la salinité des eaux du lac, soit 1 g/l. Au cours de leur trajet les eaux se concentrent progressivement pour atteindre 4 à 5 g/l à l'embouchure dans le lac Poopo. La profondeur maximale du lac est de 2,5 m. La salinité moyenne des eaux est de 25 g/l, mais elle peut varier considérablement d'une année à l'autre et elle augmente du Nord au Sud du lac (5-100 g/l). D'après les cartes topographiques le seuil de déversement du bassin du Poopo se situerait au Sud du lac entre 3690 et 3700 m d'altitude. Si ces valeurs sont exactes, il est peu probable que le lac puisse se déverser en saison des pluies. Par contre, il est possible que les eaux du lac s'infiltrant et alimentent des nappes de bordure (CARMOUZE *et al.*, 1978 ; bilan hydrique dans le tableau 1).

Le bassin suivant, au SW du lac Poopo, le salar de Coipasa, à 3656 m d'altitude, contient une croûte de sel (halite) de 2500 km<sup>2</sup> de surface. Le salar est recouvert au Nord par un lac permanent de saumure chlorurée sodique, alimenté par le principal tributaire du salar : le Rio Lauca (140 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/an ; Service National de Météorologie et d'Hydrologie de Bolivie, 1985, inédit). En saison sèche, l'épaisseur maximale du lac salé est de 50 cm, sa surface d'environ 200 km<sup>2</sup> (mais elle peut varier beaucoup) et sa salinité de 300 g/l (bilan hydrique dans le tableau 1). En saison des pluies (décembre à mars) le salar est entièrement recouvert d'une lame de saumure de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur.

Au Sud du salar de Coipasa, la dépression centrale de l'Altiplano, à 3653 m d'altitude, est occupée par la plus grande croûte de sel du monde (halite) : le salar d'Uyuni. Sa surface de 10 000 km<sup>2</sup> correspond à celle de deux départements français ou au tiers de celle de la Belgique. Le Rio Grande, au Sud, est le principal tributaire du salar. Son débit a été estimé très approximativement à 60 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/an à la suite de mesures sporadiques. Seules subsistent, en saison sèche, quelques flaques de saumure très concentrée (400 g/l), de quelques dizaines de mètres de diamètre et d'environ un centimètre d'épaisseur à l'embouchure du Rio Grande, au SE du salar. En saison humide le salar d'Uyuni est totalement inondé comme le salar de Coipasa.

Enfin, au Sud de l'Altiplano, dans la région du Lipez, lacs salés et croûtes de sel occupent le centre des nombreux petits bassins fermés intravolcaniques situés à des altitudes comprises entre 4100 et 4700 m (Pl. I, 1). Le chimisme des sels et des saumures est très varié : chlorures, sulfates, carbonates, borates de sodium et de calcium.

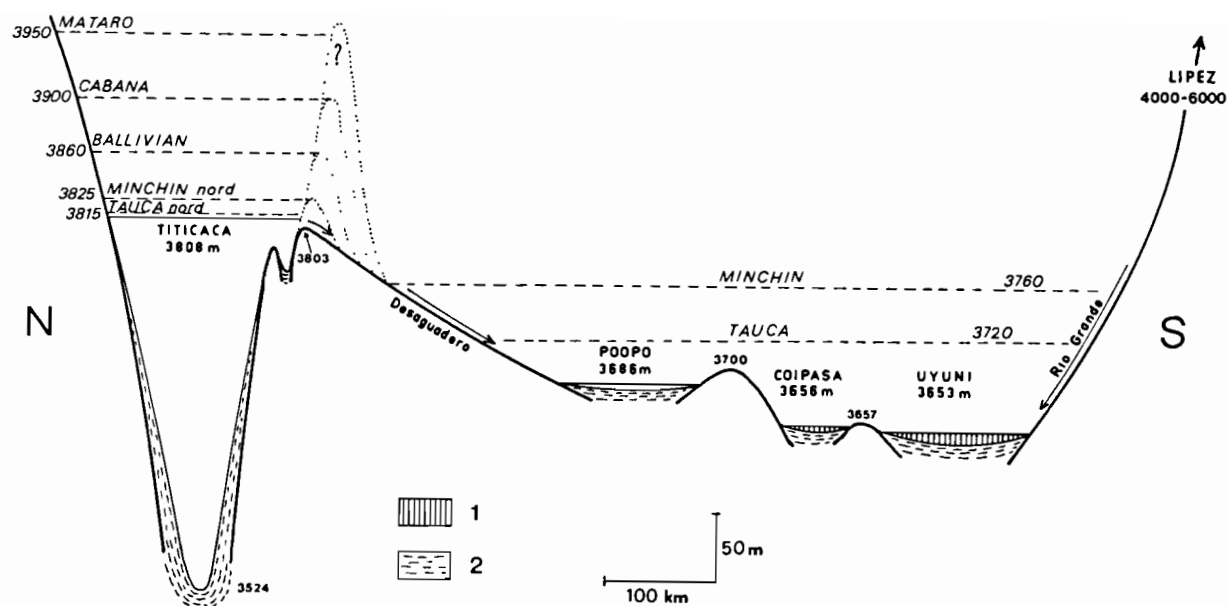


Fig.9 - Coupe schématique N-S à travers l'Altiplano. N-S schematic cross-section through the Altiplano. Corte esquemático N-S a través del Altiplano

Les niveaux des paléolacs sont en pointillé, ainsi que les seuils hypothétiques entre l'Altiplano nord et l'Altiplano central. 1 : croûtes de sel ; 2 : sédiments lacustres.

Paleolake levels, and hypothetical thresholds between northern and central Altiplano, are shown as dotted lines. 1 : salt crusts ; 2 : lacustrine sediments.

Los niveles de los paleolagos, así como los niveles de rebalse de los antiguos lagos del Altiplano norte, están indicados con rayitas. 1 : Costras de sal ; 2 : sedimentos lacustres.

## D - PALÉOLIMNOLOGIE DE L'ALTIPLANO

Plusieurs lacs ont successivement occupé l'Altiplano au cours du Quaternaire. Il faut distinguer l'Altiplano nord constitué par le bassin du lac Titicaca, l'Altiplano central qui comprend les bassins du lac Poopo et des salars de Coipasa et d'Uyuni, et l'Altiplano sud ou méridional qui correspond aux petits bassins élevés du Lipez (fig. 2 et 9).

### 1. L'Altiplano nord

Cinq phases lacustres ont été reconnues dans le bassin du lac Titicaca. Une chronologie relative, basée sur les emboîtements des dépôts lacustres, a pu être établie (LAVENU *et al.*, 1984). Elle montre que le niveau des paléolacs s'abaissait d'une phase lacustre à la suivante. Le paléolac le plus ancien, Mataro, correspond au plan d'eau le plus élevé à 3950 m d'altitude, soit 142 m au-dessus du lac Titicaca (3808 m). Lui succèdent les paléolacs Cabana à 3900 m (+92 m), Ballivian à 3860 m (+52 m), Minchin-Nord à 3825 m (+17 m) et enfin le plus récent, Taucá-Nord, à 3815 m (+7 m). Le paléolac Ballivian est connu depuis le début du siècle (AHLFELD, 1972). Les phases lacustres Minchin-Nord et Taucá-Nord ont été reconnues par SERVANT et FONTES (1978). Elles correspondent très vraisemblablement à deux phases lacustres qui ont pu être datées dans l'Altiplano central (voir ci-dessous) : les paléolacs Minchin (avant 27 000 ans B.P.) et Taucá (13 000-10 000 ans B.P.). Enfin, LAVENU *et al.* (1984) ont montré l'existence des paléolacs Cabana et Mataro.

Il est presque certain que les plans d'eau de ces paléolacs ne s'étendaient pas vers le Sud. En effet, le seuil de déversement de l'Altiplano central se trouve vers 3810 m d'altitude à l'Est du salar d'Uyuni (I.G.M., 1972). Ce seuil n'est pas soumis à une érosion active, comme c'est le cas du seuil du bassin du lac Titicaca entaillé par le Rio Desaguadero. Il semble donc que les niveaux des cinq paléolacs ont été contrôlés par un

seuil analogue à celui qui contrôle aujourd'hui le niveau du lac Titicaca (fig. 9). L'érosion de ce seuil par la rivière-exutoire des anciens lacs peut expliquer l'abaissement continu de leur plan d'eau.

Le lac Titicaca a atteint son niveau actuel, aux alentours de 3808 m, vers 10 000 ans B.P. Au cours de l'Holocène, entre 7700 et 3650 ans B.P., le niveau du lac s'est abaissé d'une cinquantaine de mètres, ce qui correspond à une aridification notable du climat de l'Altiplano nord (WIRRMANN et OLIVEIRA ALMEIDA, 1987). Le lac a ensuite repris son niveau antérieur défini par le seuil de déversement du bassin, vers 3808 m.

## 2. L'Altiplano central

De spectaculaires encroûtements algaires, parfaitement rectilignes, tapissent le pourtour du lac Poopo et des salars de Coipasa et d'Uyuni (Pl. II, 2). Ils se développent souvent sur des terrasses d'abrasion littorales. Deux niveaux sont plus particulièrement marqués, à 3700 et 3747 m. Dès le début du siècle ces constructions récifales furent attribuées à un vaste paléolac qui recouvrait une grande partie de l'Altiplano central : le paléolac Minchin (AHLFELD, 1972). Plus récemment, SERVANT et FONTES (1978) ont étudié d'anciens dépôts lacustres (sils, argiles, diatomites) le plus souvent situés dans des creux topographiques à l'écart des zones récifales. Ils ont ainsi mis en évidence trois phases lacustres dans l'Altiplano central. Ni l'âge ni l'extension de la plus ancienne – Escara – ne sont connus. Les deux plus récentes, par contre, ont pu être datées. Ce sont les paléolacs "Minchin" (avant 27 000 ans B.P.) et Tauca (13 000–10 000 ans B.P.). En baptisant "Minchin" le lacustre antérieur à 27 000 ans B.P., SERVANT et FONTES (1978) ont implicitement admis que les encroûtements algaires lui étaient contemporains, ce qui n'est pas définitivement établi. On ne dispose en effet, à notre connaissance, d'aucune datation de ces algues. Les tentatives faites au carbone 14 ont donné des résultats erratiques, vraisemblablement dus à des processus de recristallisation. Bien que cela aille à l'encontre du principe d'antériorité, nous réserverons le nom de Minchin au paléolac identifié à partir des sédiments lacustres par SERVANT et FONTES (1978) avant 27 000 ans B.P. Il est en effet possible que les différentes lignes récifales correspondent à plusieurs épisodes lacustres et ne puissent ainsi justifier d'un nom unique. Le paléolac Minchin aurait atteint 3760 m, mais cette valeur est sujette à caution, car elle correspond aux récifs algaires les plus élevés, lesquels ne sont pas datés. Le paléolac Tauca a atteint 3720 m, valeur établie à partir de sédiments datés. Son extension est représentée sur la figure 10.

Les diatomées des sédiments lacustres ont clairement montré que les anciens lacs Minchin et Tauca étaient des lacs salés (SERVANT-VILDARY, 1978). Cela est confirmé par la présence dans les sédiments lacustres de coprolites d'*Artemia*, petit crustacé branchiopode, caractéristique des eaux salées. Les croûtes de sel des salars d'Uyuni et de Coipasa semblent donc bien provenir de l'assèchement, il y a 10 000 ans, du dernier lac salé qui a occupé l'Altiplano central : le lac Tauca. Ces croûtes renferment actuellement une saumure sub-affleurante à 10–20 cm sous la surface. RISACHER et FRITZ (1992) ont mis en évidence un abaissement important de la nappe dans la croûte après son dépôt, ce qui implique qu'un climat d'une aridité extrême a affecté l'Altiplano central au cours de l'Holocène. Cette phase aride, qui n'a pas été datée au niveau du salar d'Uyuni, est vraisemblablement contemporaine de celle décrite par WIRRMANN et OLIVEIRA ALMEIDA (1987) dans le bassin du lac Titicaca (7700–3650 ans B.P.).

## 3. L'Altiplano sud

Trois épisodes lacustres ont été identifiés dans les petits bassins intravolcaniques du Lipez (FERNANDEZ, 1980). Ce sont, du plus ancien au plus récent, les lacustres Hedionda, Ramaditas, et Honda. La profondeur des lacs diminue progressivement de la phase la plus ancienne (Hedionda) à la plus récente (Honda). Lors de chaque phase lacustre il existait plusieurs lacs indépendants et d'altitudes différentes. Les deux épisodes les plus récents, Ramaditas et Honda, correspondent vraisemblablement aux lacustres Minchin et Tauca décrits dans l'Altiplano central. Ils se subdivisent chacun en deux phases de montée des eaux séparées par un abaissement du plan d'eau. Les lacs salés et les croûtes de sel actuels du Lipez sont les reliques des paléolacs de l'épisode Honda (probablement 13 000–10 000 ans B.P.). Un essai de corrélation des épisodes lacustres des trois grandes régions de l'Altiplano est présenté dans la figure 11.

Fig.10 - Extension du paléolac Tauca, 13 000-10 000 ans B.P. Outline map of Paleolake Tauca, 13,000-10,000 yr B.P. Extensión del paleolago Tauca, 13,000-10,000 yr B.P.

REF. : SERVANT et FONTES, 1978.

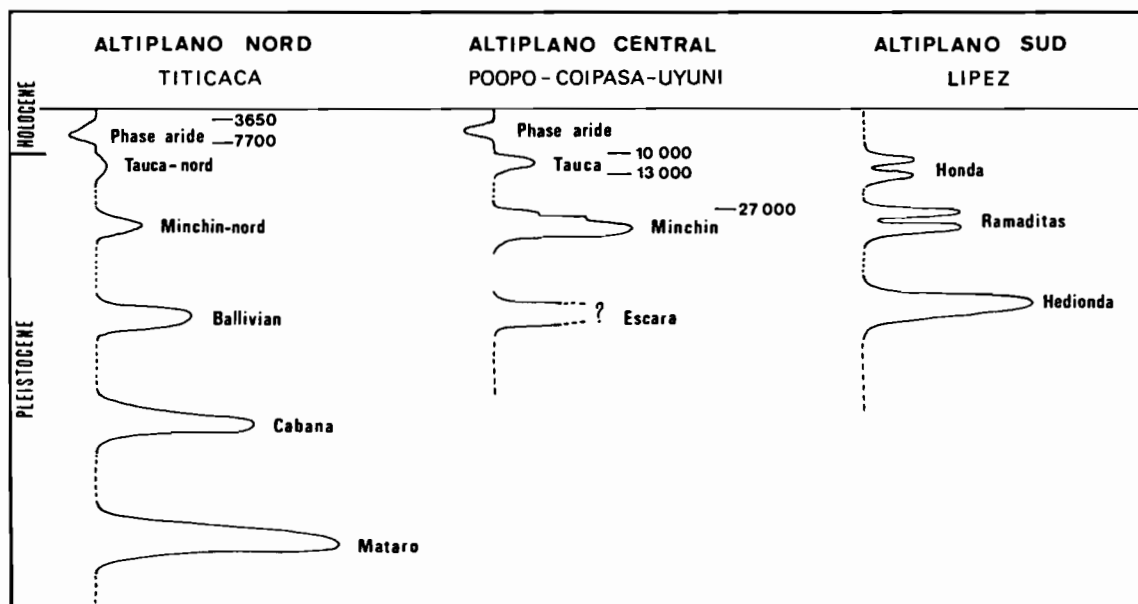
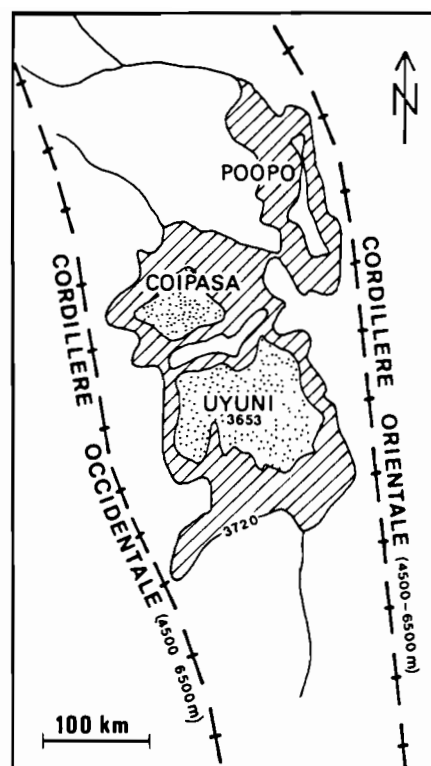


Fig.11 - Tentative de corrélation entre les phases lacustres des grands bassins de l'Altiplano. Attempt to correlate lacustrine episodes of the main Altiplano basins. Tentativa de correlación entre las fases lacustres de las grandes cuencas del Altiplano

REF. : SERVANT & FONTES, 1978 ; FERNANDEZ, 1980 ; LAVENU *et al.*, 1984 ; WIRRMANN & OLIVEIRA ALMEIDA, 1987.

## E - MORPHOLOGIE SIMPLIFIÉE DES SALARS DE L'ALTIPLANO

La classification climatique des systèmes évaporitiques ne décrit en fait que les traits majeurs des accumulations salines. La figure 12 présente une classification morphologique des salars de l'Altiplano bolivien. On peut distinguer quatre types principaux (Pl. I, 3 à 6) :

1. *Les lacs salés* correspondent exactement au modèle décrit précédemment. Les sels précipitent surtout en hiver (juin à août). La solubilité de certains d'entre eux décroît très fortement avec la température. Or le point de congélation d'une saumure peut être très nettement inférieur à 0°C. Les principaux sels qui cristallisent ainsi sont le natron ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), la mirabilite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) et peut-être l'hydrohalite ( $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).
2. *Les croûtes de sels* sont en général très poreuses et renferment une saumure interstitielle. Elles proviennent de l'assèchement d'un lac salé. Le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) et la halite ( $\text{NaCl}$ ) sont les sels dominants.
3. *Les lacs de type playa* sont un peu différents du modèle décrit ci-dessus. Le centre du bassin est occupé par une épaisse couche de sédiments lacustres renfermant une nappe captive de saumure à quelques décimètres ou quelques mètres de profondeur. En surface une petite mare salée alimentée par des sources recouvre une portion variable du salar. Les sels précipitent lors de la remontée capillaire des eaux de la nappe dans les sédiments lacustres où elles s'évaporent. Ils forment des lentilles aux contours irréguliers. Le gypse (RISACHER, 1978 b), la mirabilite et l'ulexite ( $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) cristallisent souvent de cette façon (Pl. I, 7). En surface, le salar s'inonde et s'assèche chaque année, mais les sels qui se déposent sont soit redissous dans la petite mare superficielle, soit, plus souvent, exportés par les vents violents qui règnent dans cette région.

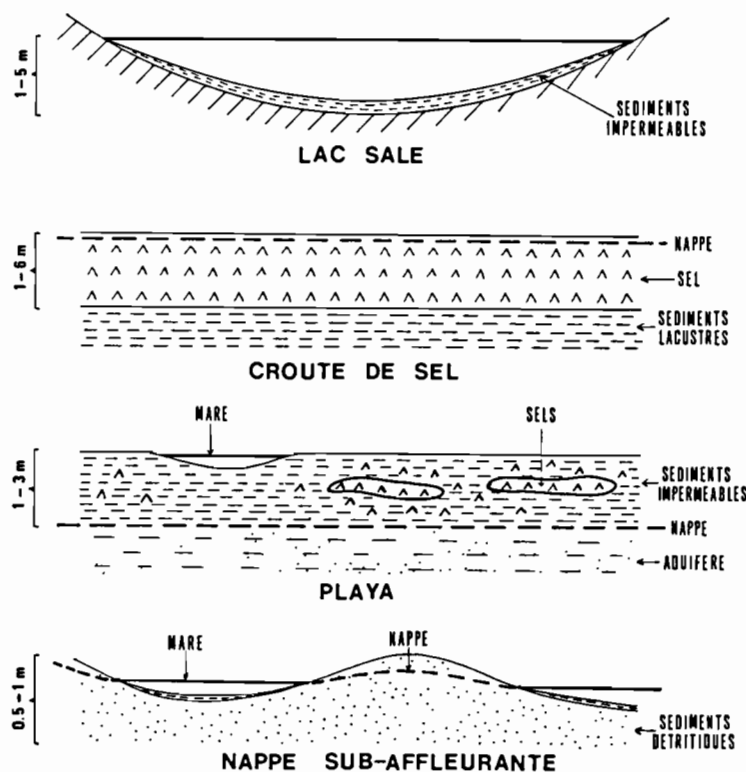


Fig.12 - Classification morphologique des salars boliviens. Morphology of Bolivian salars. Clasificación morfológica de los salares bolivianos

REF. : RISACHER & FRITZ, 1991 a RISACHER, 1992.

4. *Les nappes sub-affleurantes* s'observent lorsque le fond du bassin est constitué de sables ou de graviers. La nappe se trouve au niveau de la surface topographique, ce qui produit un système très complexe de petites mares et d'îlots. Le fond du bassin n'a pas été colmaté par des sédiments lacustres imperméables. Les sels se forment soit par baisse des températures, soit par évaporation directe de la saumure. Ici aussi les sels sont entraînés par les vents et ne s'accumulent pas massivement. Ce type de salar n'a pas été envisagé dans la classification climatique, car nous avons supposé le bassin théorique imperméable. Il est difficile à intégrer dans cette classification, car l'évaporation d'une nappe sub-affleurante est nettement plus faible que l'évaporation d'un plan d'eau libre.

Beaucoup de salars sont en fait des combinaisons de ces quatre types. En allant des bordures vers le centre on passe souvent du type nappe sub-affleurante au type lac ou playa. La croûte de halite du salar de Coipasa ne provient que partiellement de l'assèchement d'un lac salé. Une partie non négligeable du sel a vraisemblablement été apportée par le Rio Lauca depuis 10 000 ans. C'est donc un salar mixte : croûte-playa. Par contre, le salar d'Uyuni, bien que s'inondant et s'asséchant chaque année, ne peut pas être considéré comme un salar de type playa. En effet, ce sont surtout les pluies tombant directement sur la croûte qui sont à l'origine de la lame d'eau qui recouvre chaque année le salar. Elles n'apportent quasiment pas de sels dissous.

On peut distinguer deux grandes provinces de bassins à évaporites dans l'Altiplano : les petits salars du Lipez, dans la région volcanique du Sud, et les salars géants d'Uyuni et de Coipasa dans la dépression centrale de l'Altiplano. Ces deux ensembles de bassins présentent des différences notables :

- par la taille : le salar d'Uyuni est 50 fois plus étendu que le plus grand des salars du Lipez,
- par le climat, plus aride et plus froid au Sud,
- par leur bassin de drainage : ceux des petits salars du Sud sont exclusivement d'origine volcanique, alors que celui des salars d'Uyuni et de Coipasa est constitué pour moitié environ de roches sédimentaires, l'autre moitié étant d'origine volcanique,
- par le chimisme : les salars du Lipez présentent une plus grande variété de faciès chimiques que les salars géants du centre.

C'est pourquoi cette étude est divisée en deux parties : les petits salars du Lipez et les salars géants de la dépression centrale de l'Altiplano.

### III – LES PETITS SALARS DU LIPEZ : FONCTIONNEMENT ACTUEL DE SYSTÈMES INDÉPENDANTS

Celui qui visite cette splendide région du Sud de l'Altiplano ne peut qu'être surpris de la grande diversité des salars que l'on rencontre au fond de presque tous les bassins intravolcaniques (fig. 13). Non seulement ils diffèrent par leur morphologie, mais également par leur chimisme. On trouve des salars à carbonates de sodium, à chlorure de sodium, à sulfates de sodium, à borates de calcium et de sodium, à sulfates de calcium. Et pourtant les bassins versants paraissent tous semblables. Pourquoi donc une telle diversité de faciès chimiques ? Afin d'essayer de répondre à cette question, une trentaine de petits salars ont été étudiés (RISACHER, 1978 a ; RISACHER et FRITZ, 1991 a ; RISACHER, 1992).

#### A – L'ORIGINE DES SOLUTÉS

##### 1. Les solutés apportés par les précipitations

Les eaux de pluies qui ont été recueillies ont un pH variant de 4,4 à 7,9, avec une moyenne de 5,9. Leur alcalinité n'est jamais négative et est comprise entre 0 et 0,1 meq/l. Ces valeurs suggèrent que l'acide

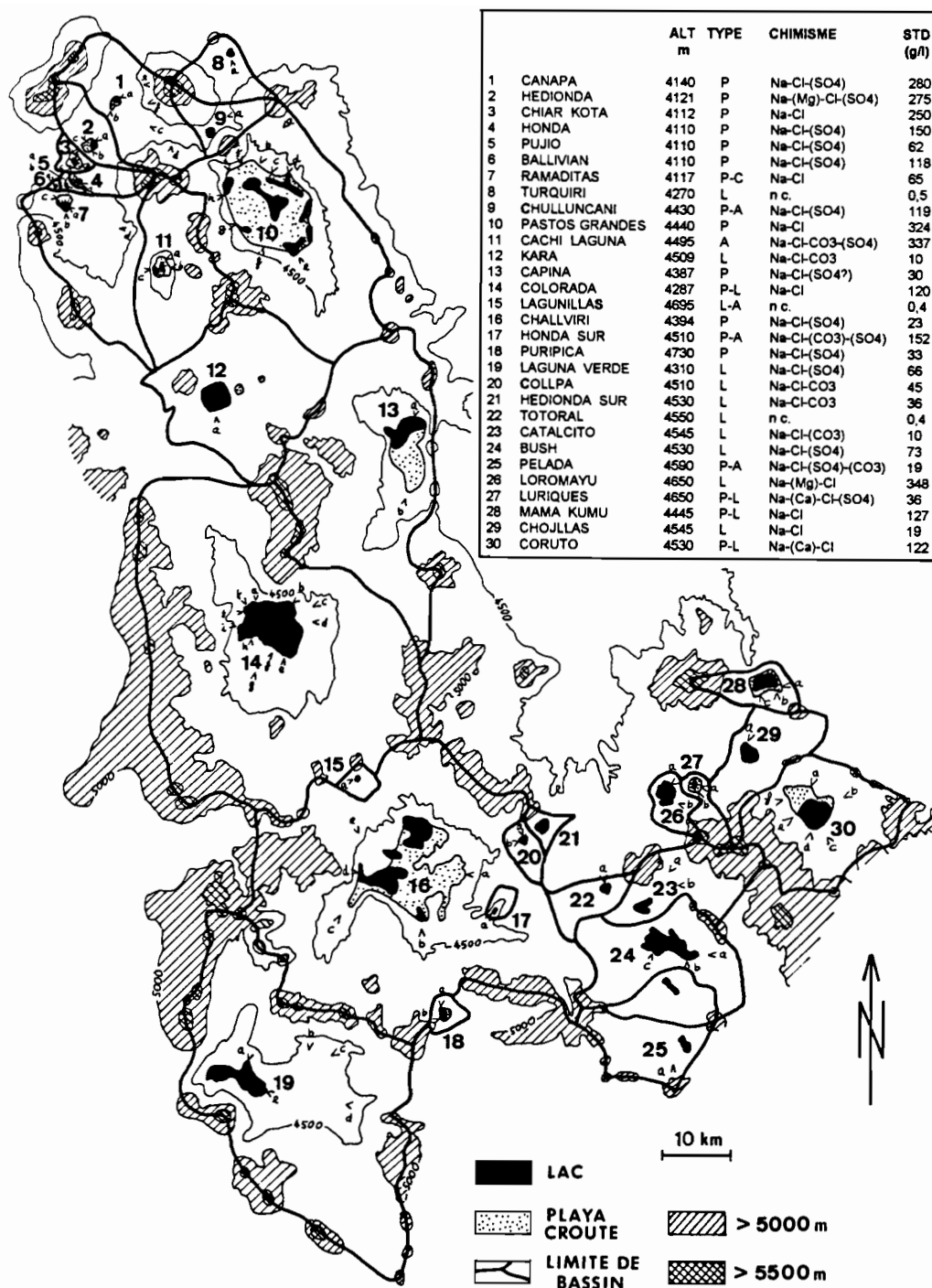


Fig.13 - Localisation et classification des salars du Lipez. Location and classification of Lipez salars. Ubicación y clasificación de los salares del Lipez

P = playa ; C = croûte ; L = lac ; A = nappe affleurante. STD = sels totaux dissous de la solution la plus concentrée échantillonnée dans le salar.

P = playa ; C = crust ; L = lake ; A = unconfined aquifer. STD = total dissolved solids of the most concentrated solution sampled in the salar.

P = playa ; C = costra ; L = lago ; A = napa sub-afflorante. STD = sales totales disueltos de la solución mas concentrada mostreada en el salar.

REF. : RISACHER & FRITZ, 1991 a.

carbonique est le principal acide apporté par les pluies. Des quantités appréciables d'acides forts comme l'acide sulfurique ou l'acide nitrique entraîneraient un pH nettement inférieur à 4 et une alcalinité négative.

Lorsqu'un lac permanent occupe le fond d'un bassin, il est possible d'estimer la proportion de sels dissous apportés par les pluies dans ce bassin par rapport aux quantités totales de sels qui entrent dans le lac central. En effet, l'application de la formule (3) donne le volume annuel d'eau qui entre dans le lac :

$$V_{ap} = S(E - P)$$

En multipliant ce volume par les concentrations moyennes des apports, on obtient la quantité de chaque constituant qui entre dans le lac chaque année. D'autre part, les quantités annuelles de matière apportées par les pluies s'obtiennent facilement en multipliant le volume des pluies par leur concentration en chaque soluté. On a ainsi pu établir que les eaux de pluie n'apportaient que très peu de matière dans les salars, à l'exception de l'acide carbonique et donc des bicarbonates : de 1 % pour Na et Cl à 10 % pour Ca et SO<sub>4</sub>. Ces proportions sont typiques des eaux du bassin amazonien, ce qui est en parfait accord avec la venue des pluies par l'Est, qui est une donnée climatique caractéristique de l'Altiplano bolivien (SERVANT et VILLARROEL, 1979).

## 2. Les solutés provenant de la dissolution d'anciennes évaporites

La figure 14 présente la relation entre le chlorure et le sodium dans les eaux d'apport, douces et saumâtres, des salars du Lipez. On distingue nettement deux groupes de points. Pour des teneurs en chlorure inférieures à 2 mmol/l (71 mg/l), les points sont dispersés et ne montrent pas de corrélation nette. Par contre, pour des teneurs en chlorure supérieures à 2 mmol/l, les points s'alignent le long de la droite d'équimolarité : [Na] = [Cl]. Lorsque la salinité des eaux d'apport augmente, leurs teneurs en chlorure et en sodium tendent à devenir égales (sur l'échelle molaire). Ce sont des eaux chlorurées sodiques. Cela suggère très fortement que l'augmentation de salinité de ces eaux d'apport est due à la redissolution de chlorure de sodium (NaCl). Comme les bassins versants de ces salars sont presque exclusivement constitués de roches volcaniques, on en déduit la présence d'évaporites anciennes enfouies sous les formations volcaniques. Ces évaporites fournissent une grande partie des composés dissous dans les eaux d'apport : Na, Cl, mais aussi K, Ca, Mg et SO<sub>4</sub>. Les faibles teneurs en bicarbonates indiquent que ces évaporites ne sont pas de faciès carbonaté sodique, mais de faciès neutre. Ce sont essentiellement des eaux chlorurées sodiques.

## 3. Les solutés liés à l'altération des roches volcaniques

On a comparé la moyenne des concentrations des principaux constituants des eaux d'apport de salinité inférieure à 2 mmol/l avec la moyenne des compositions des eaux d'altération typiques de roches volcaniques du même type (andésites - rhyodacites) des Etats-Unis (tabl. 3). La composition moyenne des eaux boliviennes est très semblable à celle des eaux américaines, ce qui permet de conclure que les eaux d'apport les plus diluées des salars du Lipez acquièrent leurs solutés par altération des roches volcaniques des bassins versants. Ce sont des eaux bicarbonatées sodiques.

## 4. Les solutés liés aux sources thermales

Environ 60 % de toutes les sources étudiées montrent une influence thermique. Les températures sont rarement très élevées, en général entre 10 et 40°C, ce qui est cependant nettement au-dessus de la température moyenne annuelle de l'air (6 à 7°C). Les proportions relatives des constituants dissous dans les eaux d'apport (rivières, sources non thermales, sources thermales) ne montrent aucune évolution lorsque la température augmente (fig. 15).

Une importante caractéristique des eaux continentales de Bolivie est leur grande richesse en lithium et en bore. La figure 16 présente les concentrations en ces deux éléments dans les eaux d'apport en fonction de

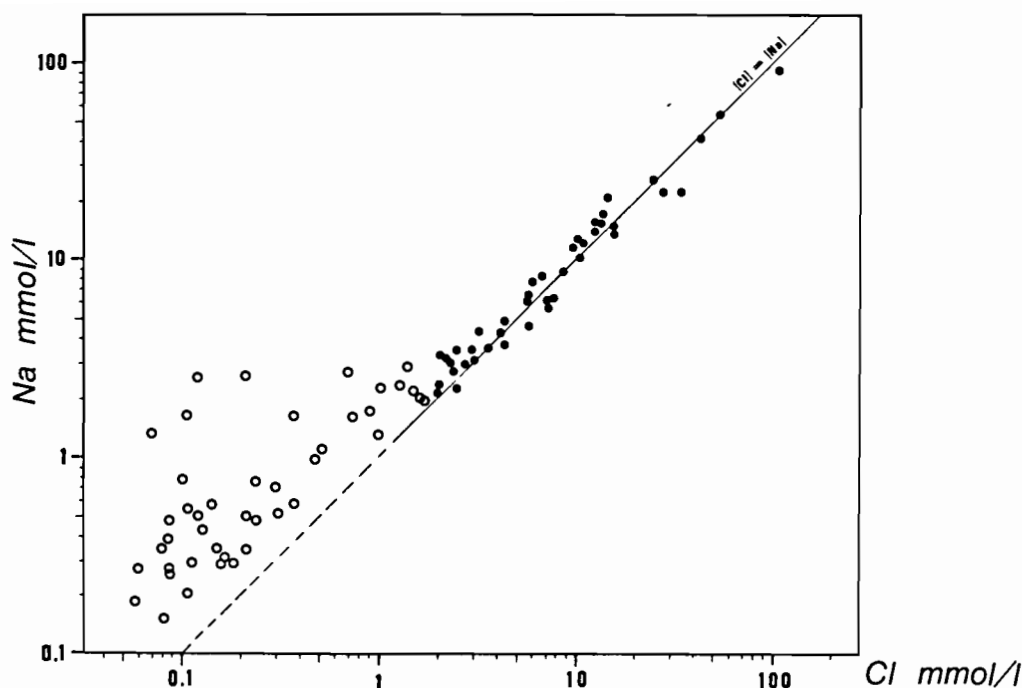


Fig.14 – Teneurs en Na et Cl des eaux d'apports des salars du Lipez. Na versus Cl concentration for inflow waters in Lipez salars. Concentración en Na y Cl de las aguas de aporte en los salares del Lipez

Cercles vides : eaux dont les solutés proviennent essentiellement de l'altération des roches volcaniques. Cercles pleins : eaux dont les solutés ont surtout pour origine la dissolution d'évaporites anciennes.

Open circles are waters whose solutes stems mostly from the alteration of volcanic rocks. Solid circles are waters whose solutes originate essentially from the leaching of ancient evaporites.

Círculos vacíos : aguas cuyos compuestos disueltos provienen sobre todo de la alteración de las rocas volcánicas. Círculos llenos : aguas cuyos compuestos provienen esencialmente de la lixiviación de antiguas evaporitas.

REF. : RISACHER & FRITZ, 1991 a ; RISACHER, 1992.

leur salinité totale et de leur température. On n'observe, dans ce contexte géologique particulier, aucun enrichissement en bore et en lithium lorsque la température des eaux s'élève à salinité constante, contrairement à ce qui est généralement observé dans les solutions thermales. Donc l'altération météorique et l'altération hydrothermale des roches volcaniques produisent des eaux de composition chimique voisine, notamment en lithium et en bore (RISACHER, 1984).

L'activité thermique a un effet spectaculaire sur le salar de Pastos Grandes. Des sources thermales salées émergent dans le salar lui-même, après avoir traversé une épaisse couche de sédiments lacustres et évaporitiques. Les eaux sont extrêmement chargées en gaz carbonique et saturées en calcite. Le dégazage très rapide du  $\text{CO}_2$  entraîne une très forte sursaturation des eaux par rapport à la calcite (jusqu'à 40 fois). Cette calcite précipite en pisolites et concrétions sphériques qui peuvent atteindre 20 cm de diamètre dans des mares autour des griffons (RISACHER et EUGSTER, 1979).

## B – L'ÉVOLUTION DES EAUX DU LIPEZ AU COURS DE L'ÉVAPORATION

### 1. Application du modèle de HARDIE et EUGSTER

Appliquons le modèle évolutif de HARDIE et EUGSTER (1970, voir ci-dessus : II,C), aux salars du Lipez. Les points représentatifs des eaux d'apport ont été reportés sur des diagrammes :  $\text{alc vs } 2[\text{Ca}^{++}]$  et  $\text{alc}$

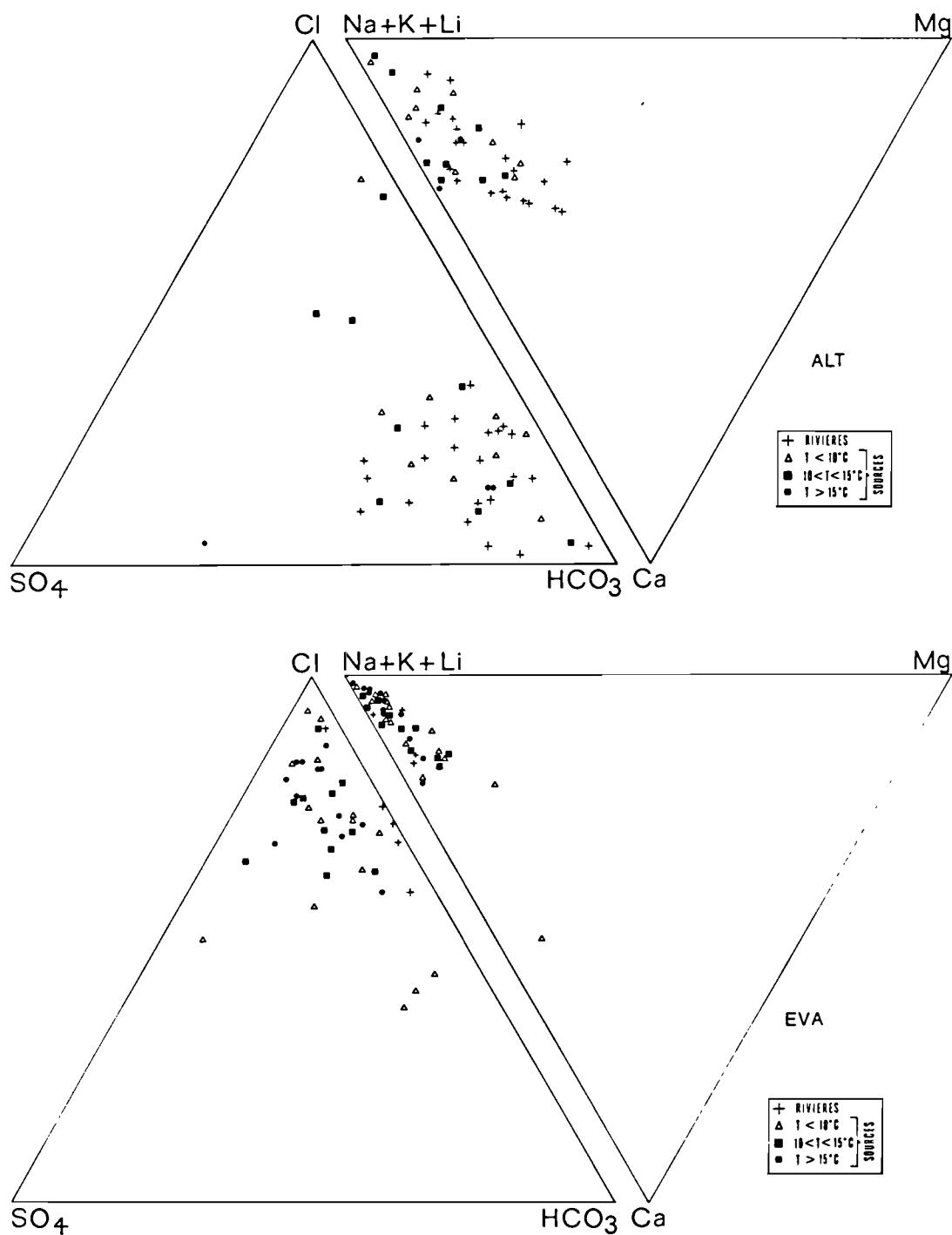


Fig.15 – *Composition des eaux d'apport des salars du Lipez (en moles %).* Chemical composition of inflow waters from Lipez (in mol %). *Composición química de las aguas de aporte del Lipez (en mol %)*

Croix = rivières ; triangles = sources,  $T < 10^{\circ}\text{C}$  ; carrés = sources,  $10 < T < 15^{\circ}\text{C}$  ; cercles = sources,  $T > 15^{\circ}\text{C}$ . ALT = altération des roches volcaniques. EVA = redissolution d'anciennes évaporites.

Crosses = rivers ; triangles = springs,  $T < 10^{\circ}\text{C}$  ; squares = springs,  $10 < T < 15^{\circ}\text{C}$  ; circles = springs,  $T > 15^{\circ}\text{C}$ . ALT = alteration of volcanic rocks. EVA = leaching of ancient evaporites.

Cruces = ríos ; triángulos = manantiales,  $T < 10^{\circ}\text{C}$  ; cuadrados = manantiales,  $10 < T < 15^{\circ}\text{C}$  ; círculos = manantiales,  $T > 15^{\circ}\text{C}$ . ALT = alteración de las rocas volcánicas. EVA = disolución de antiguas evaporitas.

REF. : RISACHER & FRITZ, 1991 a.

Tableau 3 – *Compositions moyennes des eaux d'apport des salars du Lipiez, comparées aux eaux d'altération des roches volcaniques acides d'Amérique du Nord.* Average composition of inflow waters in Lipiez salars compared to North-American waters from similar volcanic environment. *Composicion promedio de las aguas de aporte en los salares del Lipiez, comparadas con aguas de alteracion de rocas volcanicas similares de Norte-America*

|                  | USA    | BOLIVIE |       |
|------------------|--------|---------|-------|
|                  | altér. | altér.  | évap. |
| Cl               | 0,38   | 0,41    | 12,7  |
| SO <sub>4</sub>  | 0,21   | 0,27    | 1,52  |
| Na               | 1,33   | 1,02    | 12,5  |
| K                | 0,12   | 0,14    | 0,86  |
| Ca               | 0,24   | 0,29    | 1,33  |
| Mg               | 0,09   | 0,15    | 0,62  |
| Si               | 0,84   | 0,83    | 1,17  |
| HCO <sub>3</sub> | 1,30   | 1,10    | 1,70  |
| pH               | 7,5    | 8,1     | 7,5   |

En mmol/l. altér. = composition provenant de l'altération des roches volcaniques. évap. = composition provenant de la redissolution d'anciennes évaporites.

In mmol/l. altér. = composition due to the alteration of volcanic rocks. évap. = composition due to the leaching of ancient evaporites.

En mmol/l. altér. = composición resultando de la alteración de las rocas volcánicas. évap. = composición resultando de la disolución de antiguas evaporitas.

REF. (USA) : D.E. WHITE *et al.* (1963) ; A.F. WHITE *et al.* (1980).

vs  $2[Ca^{++}] + 2[Mg^{++}]$  (fig. 17). Chacun de ces diagrammes est divisé en deux domaines par les droites d'équation :

$$alc = 2[Ca^{++}] \quad (D1)$$

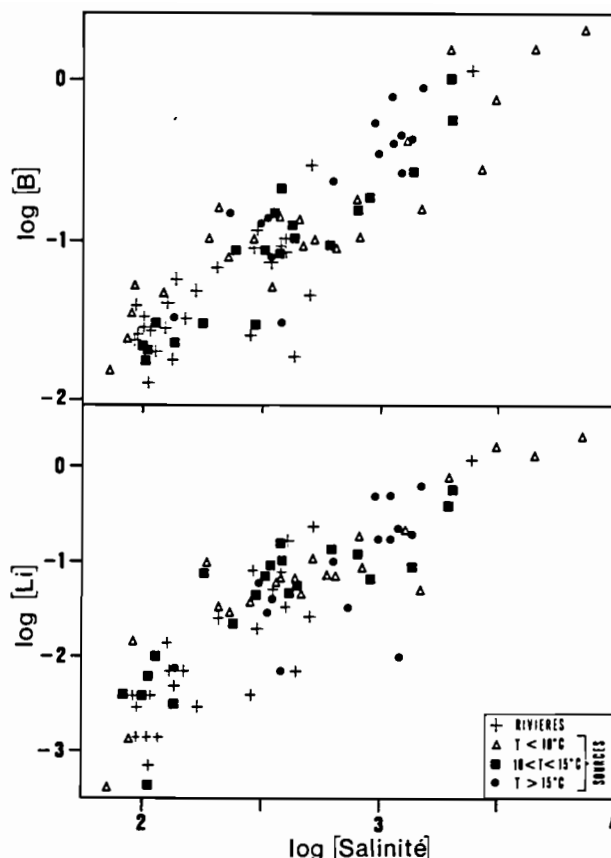
$$alc = 2[Ca^{++}] + 2[Mg^{++}] \quad (D2)$$

Les eaux dont les points sont situés en dessous de ces droites évoluent théoriquement vers des faciès alcalins, carbonatés sodiques. Celles dont les points sont situés au-dessus de ces droites évoluent au contraire vers des faciès neutres. Le diagramme  $alc$  vs  $2[Ca^{++}]$  suggère que la majorité des eaux d'apport devrait évoluer vers des saumures carbonatées sodiques, de pH élevé. Or, sur la trentaine de salars étudiés, seuls six présentent effectivement ce faciès alcalin (fig. 18). On peut donc se demander si les néoformations argileuses expliquent cette divergence. BADAUT *et al.* (1979) et BADAUT et RISACHER (1983) ont observé dans les sédiments de plusieurs de ces salars une argilisation, parfois très poussée, des frustules de diatomées (fig. 19). La silice est remplacée par un silicate magnésien de type stévensite. L'influence de ces néoformations sur l'évolution chimique des eaux peut être déduite du diagramme  $alc$  vs  $2[Ca^{++}] + 2[Mg^{++}]$ . Les points représentatifs des eaux d'apports situés sous la droite D2 de la figure 17 sont moins nombreux que ceux situés sous la droite D1 du diagramme inférieur. Il y a en contrepartie une augmentation correspondante des eaux évoluant vers la voie saline neutre. Ceci est dû au changement de l'évolution d'une partie des eaux par l'action des néoformations argileuses. Il subsiste cependant encore bien trop d'eaux dont les points sont situés dans le domaine de l'évolution alcaline, mais qui en réalité évoluent vers des faciès neutres. Seules les eaux dont les points sont marqués d'une flèche évoluent "normalement" vers un faciès carbonaté sodique. *La composition des apports laisse donc prévoir un nombre important de salars de type Na-CO<sub>3</sub>-Cl. En réalité, la plus grande partie est du type Na-Cl ou Na-Cl-SO<sub>4</sub>. Il y a très peu de salars carbonatés sodiques dans le Lipiez.*

On peut également présenter ce problème en reliant le chimisme des apports à la lithologie des bassins versants. Les eaux diluées qui drainent des formations volcaniques contenant du soufre natif sont dès le départ nettement enrichies en SO<sub>4</sub> et ont donc une alcalinité généralement inférieure à  $2(Ca + Mg)$ . Elles évoluent "normalement" vers la voie saline neutre. Il en va de même pour les eaux d'apport provenant de la redissolution d'anciennes évaporites, puisque celles-ci ont un faciès chimique neutre (Na - K - Ca - Mg - Cl

Fig.16 – Teneurs en Li et B (en mmol/l) des eaux d'apport des salars du Lipéz en fonction de la salinité (en mg/l) et de la température. Li and B concentration (in mmol/l) of inflow waters from Lipéz versus salinity (in mg/l) and temperature. Concentraciones en Li y B (en mmol/l) de las aguas de aporte de los salares del Lipéz en función de la salinidad (en mg/l) y de la temperatura

REF. : RISACHER, 1984 ; RISACHER & FRITZ, 1991 a.



-  $\text{SO}_4$ ). Par contre, les eaux diluées provenant uniquement de l'altération de roches volcaniques sans soufre ont très souvent au départ une alcalinité supérieure à  $2(\text{Ca} + \text{Mg})$ . Elles devraient donc évoluer vers la voie alcaline. Mais au cours de l'évaporation le rapport  $\text{alc}/2(\text{Ca} + \text{Mg})$  diminue au lieu d'augmenter comme le prévoit le modèle de HARDIE et EUGSTER (1970).

## 2. Le rôle du soufre éolien

La raison de cette différence majeure a été difficile à mettre en évidence. L'étude du comportement des espèces dissoutes, c'est-à-dire en se basant exclusivement sur la chimie des eaux, n'a pas permis de révéler les causes de l'anomalie. Il y a toujours plusieurs interprétations possibles aux données hydrochimiques. La réduction de l'alcalinité peut tout aussi bien être rattachée à la précipitation de zéolites qu'à l'oxydation de sulfures ou de soufre, ou à des échanges d'ions entre la solution et des argiles. Cela résulte de la loi d'électroneutralité qui lie tous les ions de la solution entre eux. Il faut absolument étudier les phases solides en contact avec les solutions.

C'est ainsi qu'a pu être mis en évidence le rôle du soufre natif (Pl. I, 8). Erodé par le vent, il se dépose sur les sols et les plans d'eau. Le soufre ( $\text{S}^0$ ) a été dosé dans neuf échantillons de colluvions provenant des bassins versants de divers salars. Trois fractions ont été analysées pour chacun d'entre eux : l'échantillon total, la fraction fine inférieure à  $63\mu\text{m}$  et les fragments de roches volcaniques de dimension supérieure à un millimètre, bien nettoyés aux ultrasons. Les particules d'origine éolienne appartiennent essentiellement à la fraction inférieure à  $63\mu\text{m}$  (limite conventionnelle granulométrique supérieure du loess). Les teneurs en soufre de l'échantillon total et de la fraction fine sont notablement supérieures à celles de la roche volcanique initiale (fig. 20). Les formations superficielles sont nettement enrichies en soufre, celui-ci se concentrant dans la fraction fine. En saison des pluies, celui-ci peut donc être facilement entraîné par les eaux de ruissellement vers la dépression centrale du bassin. Le soufre natif au contact de l'eau et de l'air s'oxyde en produisant de

Fig.17 - Concentrations ( $\times 2$ ) en Ca et Ca + Mg (en mmol/l) en fonction de l'alcalinité (en meq/l) dans les eaux d'apport des salars du Lipiez. Ca and Ca + Mg concentrations (in mmol/l) versus alkalinity (in meq/l) for inflow waters in Lipiez salars. Ca y Ca + Mg concentraciones (en mmol/l) en función de la alcalinidad (en meq/l) en las aguas de aporte del Lipiez.

Les flèches indiquent les eaux qui évoluent effectivement dans la voie carbonatée sodique. Arrows indicate those waters that actually become carbonate-rich. Las flechas señalan las aguas que efectivamente se vuelven alcalinas.

REF. : RISACHER & FRITZ, 1991 a.

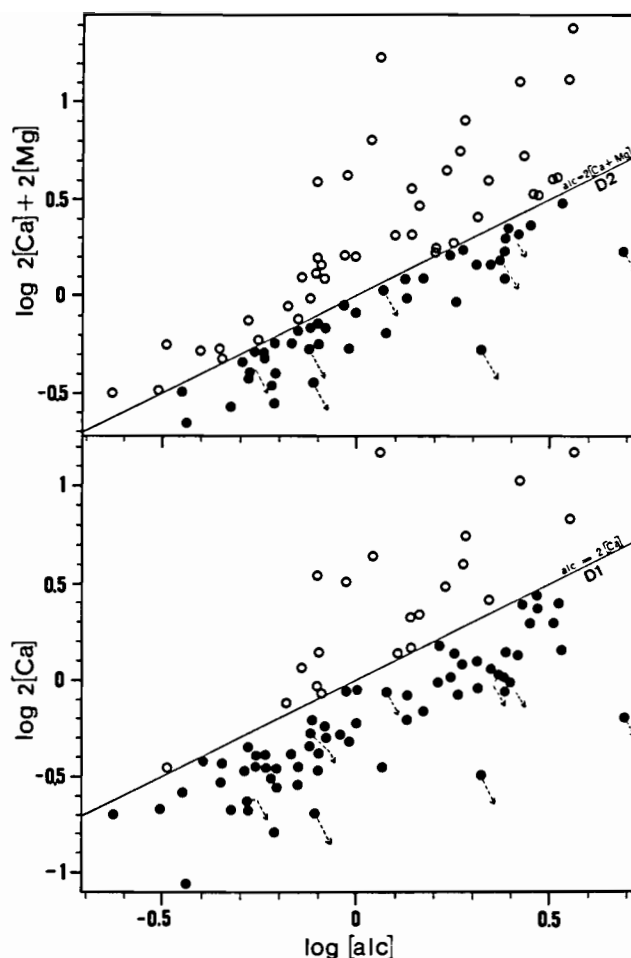


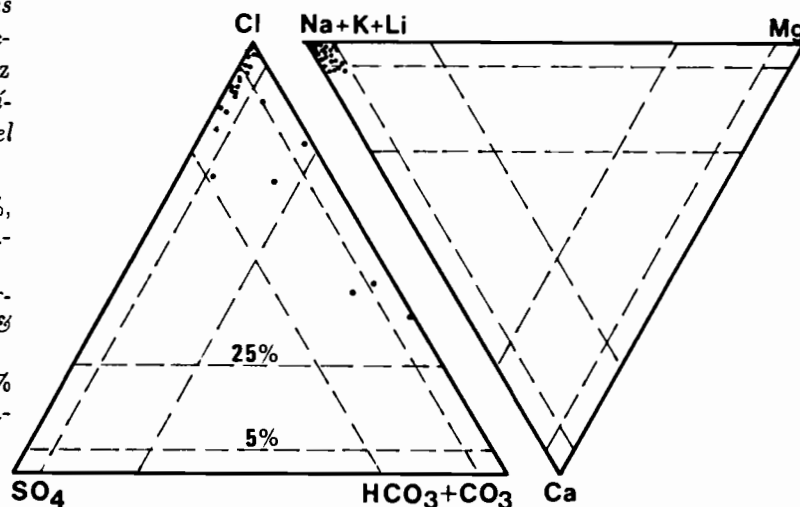
Fig.18 - Composition des saumures des salars du Lipiez (en moles %). Chemical composition of brines from Lipiez salars (in mol %). Composición química de las salmueras de los salares del Lipiez (en mol %)

Les subdivisions sont fixées à 5 et 25 %, selon la classification de EUGSTER & HARDIE, (1978).

Boundaries are fixed at 5 and 25 %, according to the classification of EUGSTER & HARDIE (1978).

Las subdivisiones son fijadas a 5 y 25 % según la clasificación de EUGSTER & HARDIE (1978).

REF. : RISACHER & FRITZ, 1991 a.



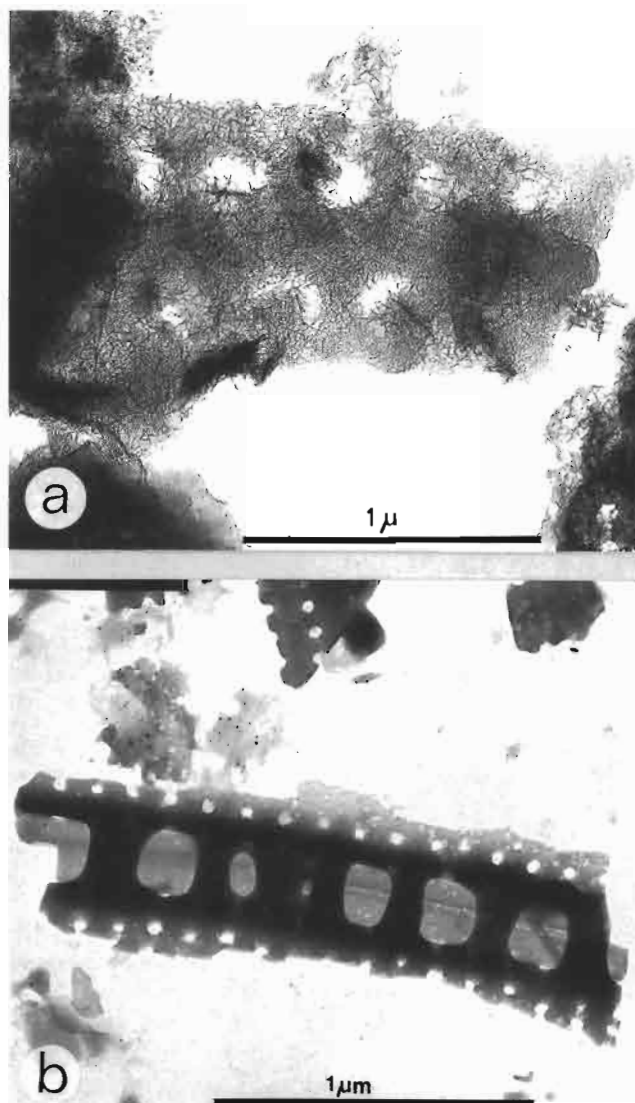


Fig.19 – (a) : *Frustule de diatomée presque entièrement transformé en smectite.* (b) : *Frustule non transformé.* (a) : *Diatom frustule almost completely replaced by authigenic smectite.* (b) : *Unaltered frustule.*  
 (a) : *Frustulo de diatomea casi enteramente transformado en esmectita.* (b) : *Frustulo no transformado*

REF. : BADAUT & RISACHER, 1983.

l'acide sulfurique qui neutralise une partie des carbonates et bicarbonates des eaux, ce qui favorise l'évolution vers la voie saline neutre :



Le lien entre la présence du soufre et l'acidification des eaux a pu être mis en évidence expérimentalement. Chacune des trois fractions des neuf échantillons de colluvions a été lixiviée dans de l'eau distillée (dix minutes pour la fraction fine et deux heures pour l'échantillon total et les fragments de roches nettoyés). Les solutions de lavage ont ensuite été analysées. Les eaux correspondant aux fractions fines et aux échantillons bruts sont nettement enrichies en sulfates et appauvries en bicarbonates par rapport à celles ayant été en contact avec les fragments de roches nettoyés (fig. 21). Les points représentatifs des eaux de lavage ont été reportés sur un diagramme  $\text{alc vs } 2[\text{Ca}] + 2[\text{Mg}]$  (fig. 22). Les points figuratifs des eaux ayant lessivé les roches volcaniques nettoyées sont presque tous situés dans le domaine d'évolution vers la voie alcaline. Par

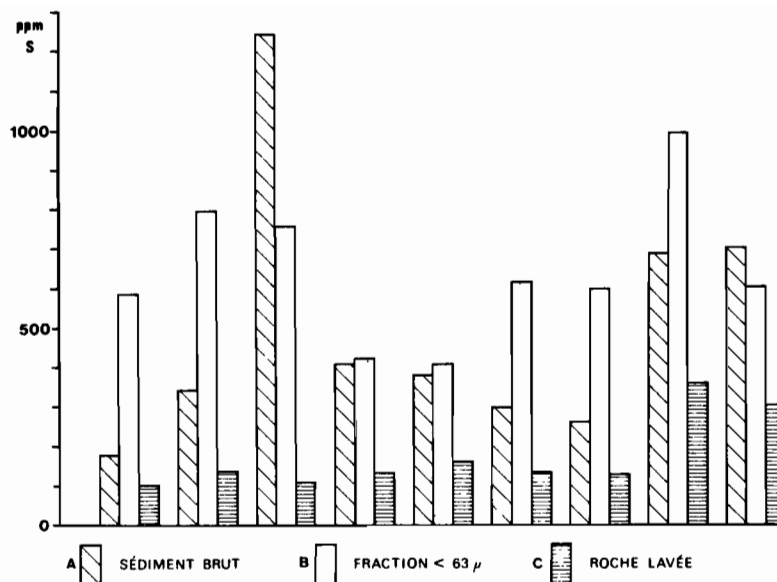


Fig.20 – Teneur en soufre des diverses fractions de sédiments superficiels (9 analyses). Sulfur content of surficial sediment fractions (9 analyses). Contenido en azufre de varias fracciones de sedimentos superficiales (9 analisis)

A : total sediment ; B : fraction size below 63  $\mu$  ; C : cleaned rock particles. A : sedimento total ; B : fracción inferior a 63  $\mu$  ; C : fragmentos de roca lavada.

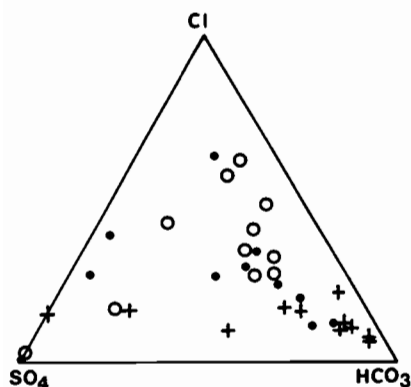


Fig.21 – Composition anionique des eaux de lavage des trois fractions des sédiments superficiels (en moles %). Anion proportion in leachates of three fraction of surficial sediments (in mol %). Composición aniónica de las aguas de liziviación de tres fracciones de sedimentos superficiales (en mol %)

Cercles vides = échantillons bruts ; cercles pleins = fraction < 63  $\mu$  ; croix = fragments de roches lavées.

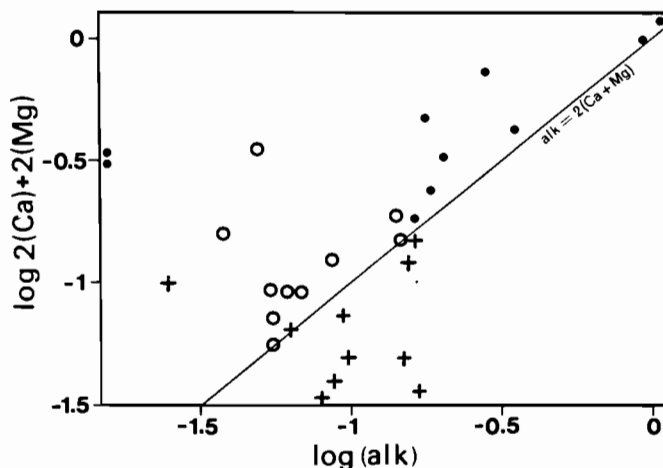
Open circles = total samples ; solid circles = fraction < 63  $\mu$  ; crosses = clean rock fragments.

Círculos vacíos = muestras totales ; círculos llenos = fracción < 63  $\mu$  ; cruces = fragmentos de rocas lavadas.

REF. : RISACHER & FRITZ, 1991 a.

Fig.22 – Concentrations ( $\times 2$ ) en Ca et Ca + Mg (en mmol/l) en fonction de l'alcalinité (en meq/l) des eaux de lavage des trois fractions de sédiments superficiels. Ca and Ca + Mg concentrations (en mmol/l) versus alkalinity (in meq/l) for leachate of three fractions of surficial sediments. Ca y Ca + Mg concentraciones (en mmol/l) en función de la alcalinidad (en meq/l) de aguas de liziviación de tres fracciones de sedimentos superficiales

REF. : RISACHER & FRITZ, 1991 a.



évaporation, ces eaux produiraient des saumures carbonatées sodiques. Par contre, les points des eaux ayant été en contact avec la fraction fine, ou avec l'échantillon total, sont tous situés dans le domaine d'évolution vers la voie saline neutre. Il semble donc bien que l'excès de soufre natif dans la fraction fine soit responsable de l'acidification, et par là de la réduction de l'alcalinité, des eaux de lavage.

## CONCLUSIONS SUR LES SALARS DU LIPEZ

Les constituants dissous dans les eaux d'alimentation des salars du Lipéz ont une double origine :

- l'altération, qu'elle soit météorique ou hydrothermale, des roches volcaniques du bassin versant produit des eaux bicarbonatées sodiques,
- la redissolution d'évaporites anciennes enfouies sous les formations volcaniques fournit des eaux chlorurées sodiques, de salinité plus élevée.

ALPERS et WHITEMORE (1990) ont également mis en évidence une origine mixte des solutés dans les eaux de certains salars du Chili.

La majorité des eaux diluées devrait théoriquement évoluer par évaporation vers des saumures carbonatées sodiques de pH élevé. Or on n'observe que très peu de salars de ce type. La plupart sont de faciès chloruré sodique ou chloro-sulfaté sodique. Cette anomalie est très vraisemblablement due au dépôt dans le bassin de soufre natif érodé par le vent depuis les sommets des volcans. L'oxydation de ce soufre au contact des eaux diluées bicarbonatées sodiques produit de l'acide sulfurique qui neutralise une grande partie des espèces carbonatées. Un mécanisme d'acidification similaire, basé sur l'oxydation des sulfures dans les sols, a été décrit dans le bassin du lac Tchad par CHEVERRY (1974) et EUGSTER et MAGLIONE (1979).

L'ajout de soufre dans les eaux diluées ne modifie que très peu leur composition chimique, mais cela est suffisant pour modifier radicalement la composition de la saumure finale et donc les sels qui en précipitent. L'évaporation joue le rôle d'amplificateur des interactions eaux-sédiments. De telles anomalies dans l'évolution des solutions permettent de détecter des processus qui autrement passeraient inaperçus.

L'hydrologie des bassins joue un rôle majeur dans l'évolution des eaux. Les rares lacs carbonatés sodiques du Lipéz sont alimentés par des sources situées tout en bordure des lacs. Les eaux diluées ne circulent pas sur les formations superficielles du bassin versant. Leur contact avec ces formations, et donc avec le soufre qu'elles contiennent, est très réduit. Par contre si les sources sont situées loin en amont du salar, alors leurs eaux diluées auront le temps de s'acidifier au contact des sols, ou même tout simplement par apport éolien direct de soufre. Le temps de contact des eaux diluées avec les matériaux superficiels joue un rôle important dans la composition des lacs salés (JONES & VAN DENBURGH, 1966).

Aujourd'hui le niveau de tous les lacs est très bas. Mais pendant le Quaternaire des lacs profonds ont occupé ces bassins. Les eaux de ruissellement avaient moins de trajet à faire pour pénétrer dans les lacs, ce qui réduisait leur contact avec le soufre des sols. D'autre part, le soufre déposé directement sur le lac n'était peut-être pas suffisant pour neutraliser assez d'espèces carbonatées dissoutes dans ces grands volumes d'eau. Il est donc possible que certains salars aient pu changer de chimisme au cours du Quaternaire. Des salars aujourd'hui de faciès neutres peuvent être les reliques d'anciens lacs carbonatés sodiques. Un processus similaire, très controversé, a été avancé pour les océans au Précambrien (KEMPE et DEGENS, 1985).

La variabilité des faciès chimiques des salars du Lipéz est donc essentiellement due à la combinaison de trois facteurs (fig. 23) :

- la double origine des constituants des eaux d'alimentation,
- la présence, ou l'absence, de soufre dans les volcans des bassins versants,
- l'hydrologie des bassins, en particulier la position des nappes dans les formations volcaniques.

Il est dommage que les lacs carbonatés sodiques soient si rares sur l'Altiplano. En effet, leurs saumures peuvent concentrer fortement certains éléments métalliques, ce qui en fait de précieux indicateurs métallogéniques. Par exemple, les saumures carbonatées sodiques de Cachi Laguna renferment les plus fortes teneurs connues au monde en molybdène (49 mg/l) ainsi que des teneurs très élevées en tungstène et arsenic. Cela indique la présence de gisements, peut-être exploitables, dans les bassins versants (RISACHER *et al.*, 1984).

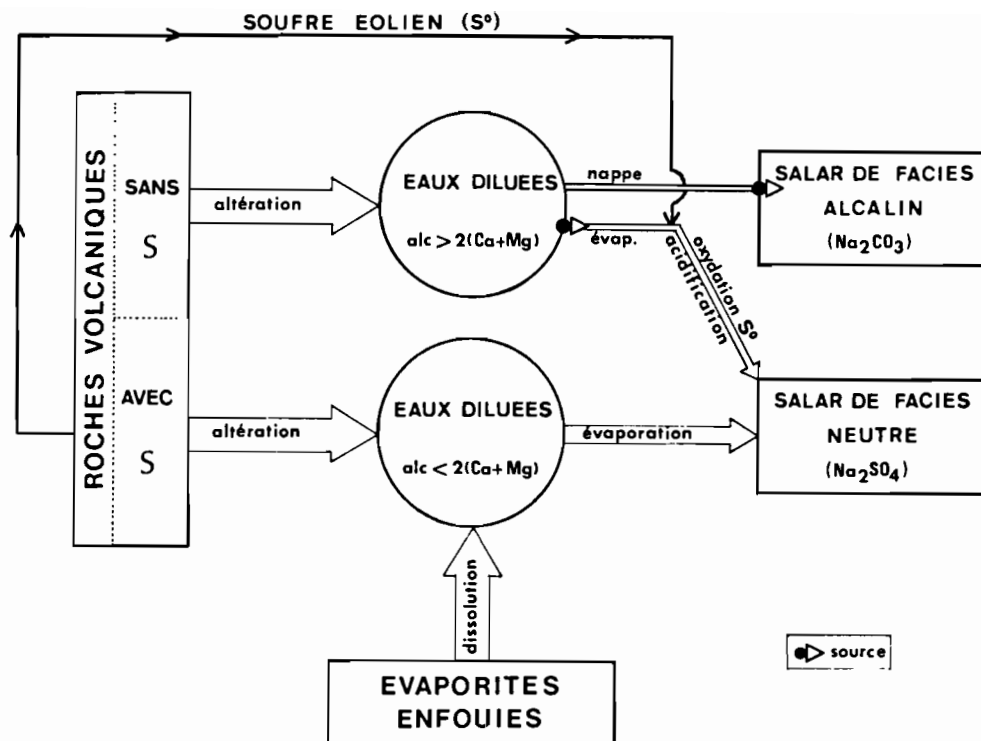


Fig.23 – Relation entre bassins versants, eaux diluées et faciès chimiques des salars du Lipez. Relation between drainage basins, dilute waters and chemical facies of Lipez salt lakes. Relación entre cuencas de drenaje, aguas diluidas y facies químico de los salares del Lipez

#### IV – LE SYSTÈME COUPLÉ DES SALARS D'UYUNI ET DE COIPASA : FONCTIONNEMENT ACTUEL ET QUATERNAIRE

La dépression centrale de l'Altiplano bolivien est recouverte par deux immenses croûtes de sel : le salar d'Uyuni, de 10 000 km<sup>2</sup> de surface à 3653 m d'altitude (Pl. II, 1,2,3) et le salar de Coipasa de 2500 km<sup>2</sup> de surface à 3656 m d'altitude. L'étude paléolimnologique de l'Altiplano central (II,D,2) a montré que ces croûtes proviennent vraisemblablement de l'assèchement, il y a 10 000 ans, d'un immense lac salé : le paléolac Tauca. Ces salars ne présentent pas d'affleurement au sens géologique du terme. Ils sont rigoureusement plats, sans aucune entaille ou ravinement qui permettrait de les étudier en profondeur. C'est pourquoi l'ORSTOM a acquis en 1985 une petite sondeuse-carotteuse. L'étude des salars se base sur quarante puits à Uyuni, dont un jusqu'à 121 m de profondeur, et trois puits à Coipasa jusqu'à 14 m de profondeur (fig. 24). Le sondage profond à Uyuni a traversé 12 croûtes de sel séparées par des sédiments lacustres. A Coipasa aucune autre croûte de sel n'a été rencontrée sous la croûte superficielle. Celle-ci repose également sur des sédiments lacustres. Nous allons tout d'abord étudier les croûtes superficielles qui sont *sensu stricto* les salars d'Uyuni et de Coipasa. Puis nous nous intéresserons aux croûtes de sel en profondeur à Uyuni.

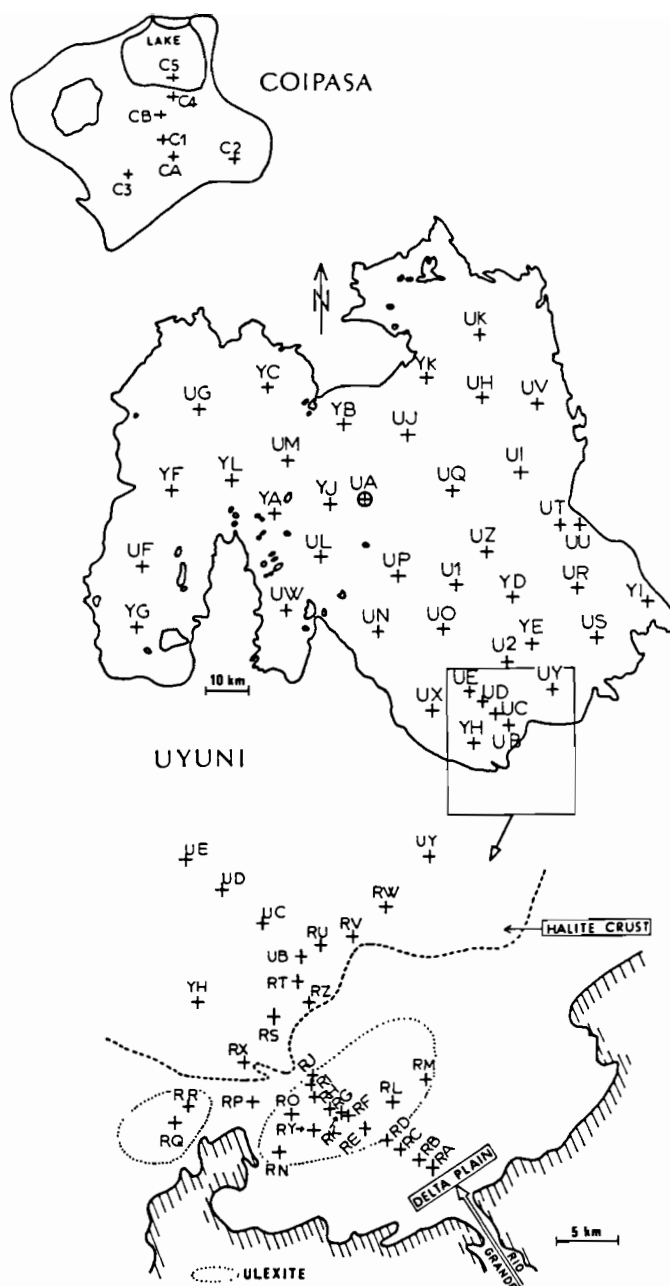
Les premières études des salars d'Uyuni et de Coipasa sont celles de ERICKSEN *et al.* (1978), RETTIG *et al.* (1980) et BALLIVIAN et RISACHER (1981). Les résultats présentés ici sont principalement tirés de l'étude de RISACHER et FRITZ (1991 b).

Fig.24 – Localisation des sondages. Location of the wells. *Ubicación de los sondeos*

Les puits dont le code commence par U ou Y ont été réalisés avec la sondeuse-carotteuse. Ceux dont le code commence par un R sont des sondages à la tarière à main (dans le delta du Rio Grande). Le puits UA est le sondage profond (121 m).  
*U and Y series are drilled holes. R series are hand-dug holes (in the Rio Grande delta). UA is the deep well (121 m).*

Los códigos U y Y corresponden a sondeos rotativos. El código R indica pozos manuales (en el delta del Rio Grande). UA es el sondeo profundo (121 m).

REF. : RISACHER & FRITZ, 1991 b.



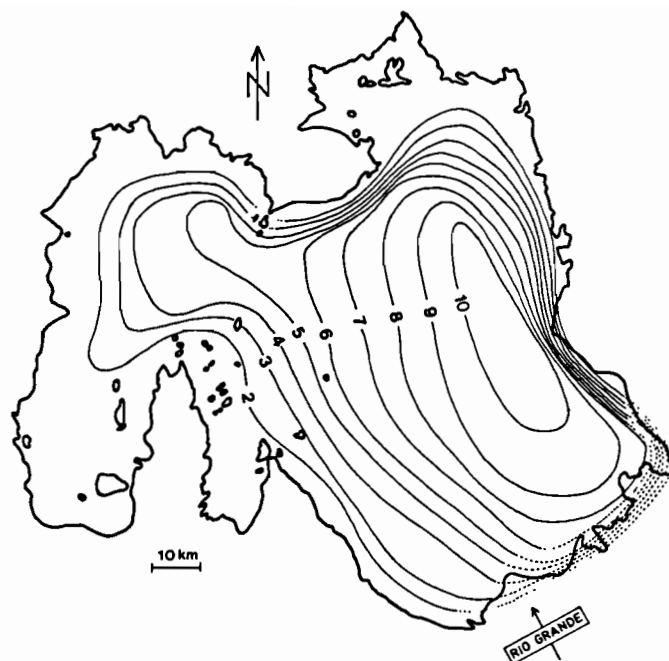
## A – LA CROÛTE DE SEL DU SALAR D'UYUNI

### 1. Morphologie

Les courbes d'iso-épaisseur de la croûte du salar d'Uyuni sont représentées sur la figure 25. L'épaisseur maximale est de 11 m à l'Est du salar. La bordure SE, au contact du delta du Rio Grande, a un aspect irrégulier dû à l'intercalation de niveaux fluviodeltaïques dans la croûte de sel. La croûte repose sur des sédiments lacustres constitués de gypse, de calcite, de détritiques d'origine volcanique et de coprolites d'*Artemia*

Fig.25 - Courbes d'iso-épaisseur en mètres de la croûte de sel du salar d'Uyuni. Isopachs of Uyuni salt crust (in meters). Curvas de iso-espesor de la costra de sal del salar de Uyuni (en metros)

REF. : RISACHER & FRITZ, 1991 b.



(fig. 26). Ce petit crustacé branchiopode est caractéristique des eaux sursalées. La présence de ses coprolites, généralement bien conservés et facilement identifiables, est un excellent critère d'existence d'anciens lacs salés. Le sel est constitué à 95 % de halite ( $\text{NaCl}$ ), le reste étant surtout du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Une saumure intracrustale chlorurée sodique remplit une porosité assez élevée d'environ 35 % (Pl. II, 4). En saison sèche (mars à décembre) la saumure se trouve à 10-20 cm sous la surface, sauf au SE du salar, à l'embouchure du Rio Grande, où elle est sub-affleurante, ce qui produit de nombreuses petites mares hypersalines chlorurées magnésiennes. En saison des pluies (janvier-février) le niveau de la nappe remonte et le salar est entièrement inondé (fig. 27). *C'est dans la saumure intracrustale que se trouvent dissous les éléments économiquement intéressants que sont le lithium (Li), le potassium (K), le magnésium (Mg) et le bore (B).*

## 2. Les réserves du salar d'Uyuni

Environ 200 analyses de saumures dans tout le salar ont permis de tracer les courbes d'isoconcentration à diverses profondeurs pour tous les constituants dissous dans la saumure. La figure 28 présente les courbes d'isoconcentration du lithium dans la saumure intracrustale. Les concentrations en K, Mg et B suivent de très près celles de Li. On observe une brutale augmentation des teneurs en Li, K, Mg, B un peu en aval de l'embouchure du Rio Grande, principal tributaire du salar. Il s'agit là d'une véritable anomalie géochimique. Les concentrations maximales en Li (4,7 g/l), K (30 g/l), Mg (78 g/l) et B (4,3 g/l) sont parmi les plus élevées du monde.

La grande quantité d'analyses disponibles nous permet d'estimer (tabl. 4) les masses de tous les composants aussi bien en phase solide (les sels) qu'en phase liquide (les constituants dissous dans les saumures). Les masses totales de halite et de gypse sont respectivement de 63 et de 5 milliards de tonnes. Les impuretés dans la halite ont également été analysées et leurs masses estimées. On a évalué à part les quantités de Li, K, Mg, B dans le gisement de Rio Grande. *Le point le plus remarquable concerne les réserves en lithium dans l'ensemble du salar. Elles sont estimées à 9 millions de tonnes dans les saumures. En 1978 la totalité des réserves connues du monde occidental n'atteignaient que 4,1 millions de tonnes (USGS, 1978).* Les réserves totales en potassium, environ 200 millions de tonnes, sont le double de celles des Etats-Unis (SEARLS, 1983).

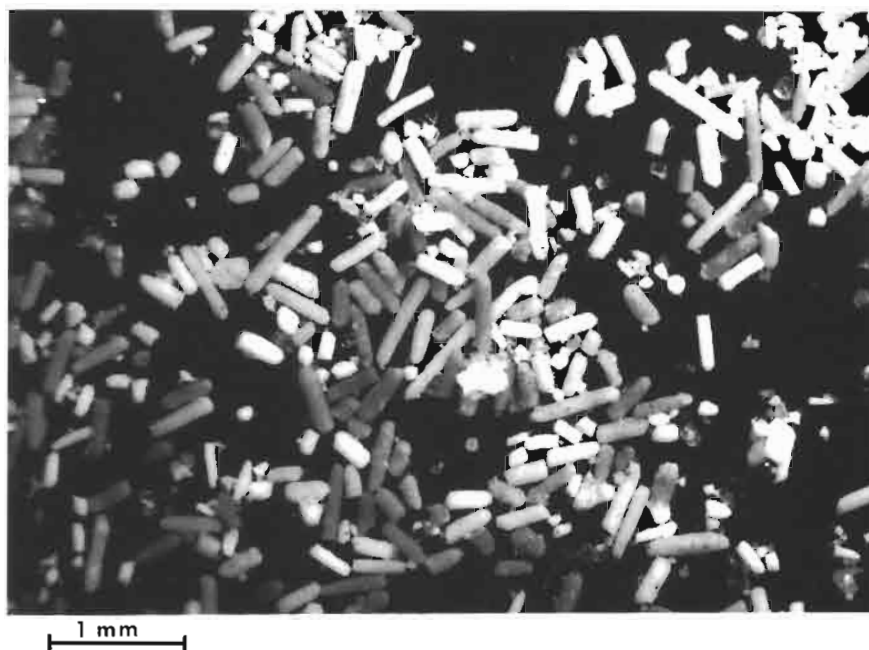


Fig.26 – *Copro-lites d'Artemia*. *Artemia faecal pellets*. *Copro-litos de Artemia*

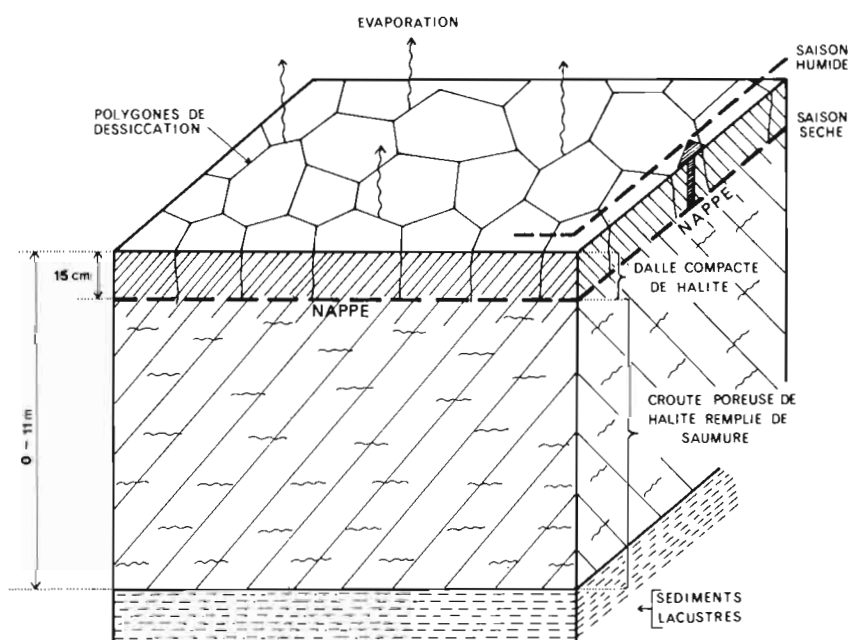


Fig.27 – *Bloc-diagramme dans la croûte de sel du salar d'Uyuni*. *Block-diagram of Uyuni salt crust*. *Diagrama de la costra de sal del salar de Uyuni*

En saison sèche la nappe s'évapore à travers les centimètres superficiels de la croûte en précipitant de la halite secondaire. Celle-ci cimente la partie superficielle de la croûte en une dalle compacte.

*In the dry season the brine evaporates through the top of the crust, precipitating secondary halite which cements the topmost centimeters of the crust into a very hard pavement.*

En época seca la salmuera intersticial se evapora a través de la parte superior de la sal, cementandola en una costra muy compacta.

REF. : RISACHER, 1992.

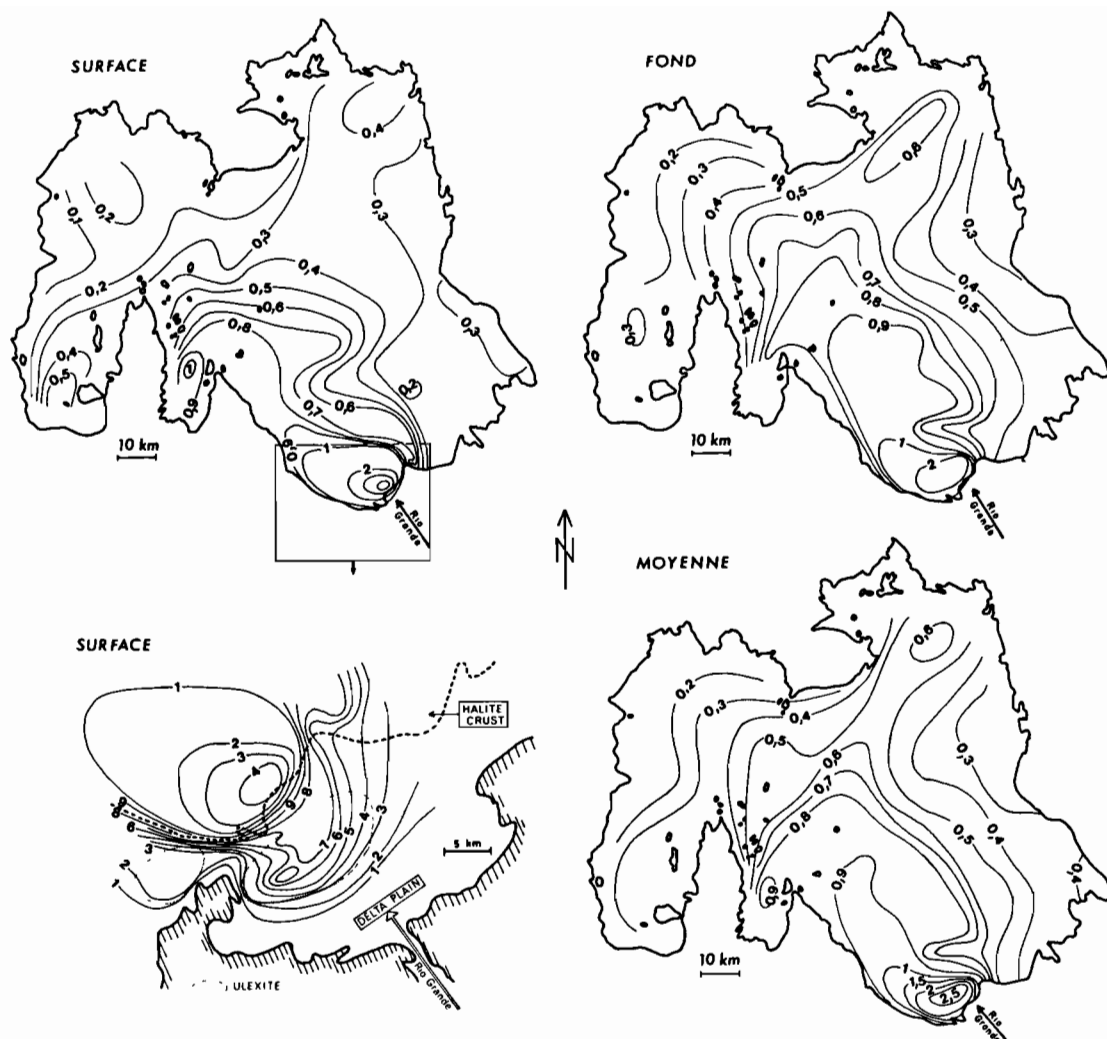


Fig.28 – Courbes d'isoconcentration moyennes (en g/l) du lithium dans la saumure intracrustale du salar d'Uyuni. Average lithium iso-concentration curves of Uyuni intracrustal brine (in g/l). Concentraciones promedias en litio de la salmuera intersticial del salar de Uyuni (en g/l)

REF. : RISACHER & FRITZ, 1991 b.

### 3. Le gisement de Rio Grande

Le Rio Grande est le principal tributaire du salar d'Uyuni. Son bassin versant, de 12500 km<sup>2</sup> de surface, comprend des formations volcaniques et sédimentaires, ce qui le différencie de la région voisine des salars du Lipéz qui est entièrement volcanique (fig. 5). Le delta du Rio Grande est un ensemble complexe de lits et de lentilles d'argiles, de silts et de sables. Il repose sur les mêmes sédiments lacustres que ceux que l'on observe sous la croûte de sel (fig. 29). Le delta est donc d'âge post-Tauca, c'est-à-dire Holocène. Le gisement du Rio Grande est délimité par la courbe d'isoconcentration de 1 g/l du lithium (fig. 28). En effet, on observe sur la figure 29 une brutale augmentation des concentrations en Li (et aussi en Mg, K, B) à l'intérieur de cette zone. On a tenté d'estimer les ordres de grandeur des quantités de constituants dissous apportés par le Rio Grande depuis l'assèchement du lac Tauca, il y a 10 000 ans, en extrapolant les débits et les concentrations actuelles. Bien sûr, ces valeurs sont grevées d'imprécisions sur les débits, sur la distribution des précipitations et sur l'état d'altération des sols du bassin versant pendant 10 000 ans. On ne peut comparer que de très

Tableau 4 – *Masses des constituants du salar d'Uyuni et ordres de grandeur des apports par le Rio Grande depuis 10 000 ans.* Total amounts of components in the salar of Uyuni, and order of magnitude of Rio Grande inputs for the last 10,000 years. *Cantidades totales de componentes en el salar de Uyuni y ordenes de magnitud de los aportes por el Río Grande desde hace 10,000 años*

|                 | SAUMURES                        |                                  | SELS                     |                                 | ENSEMBLE<br>DU SALAR<br>(5) | APPORTS PAR<br>LE RIO GRANDE<br>(6) |
|-----------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
|                 | ENSEMBLE<br>DES SAUMURES<br>(1) | GISEMENT DU<br>RIO GRANDE<br>(2) | HALITE<br>+ GYPSE<br>(3) | TRACES DANS<br>LA HALITE<br>(4) |                             |                                     |
| Li              | 9                               | 0,5                              |                          | 0,9                             | 10                          | 1                                   |
| K               | 194                             | 5                                |                          | 91                              | 285                         | 10                                  |
| Mg              | 211                             | 10                               |                          | 45                              | 256                         | 16                                  |
| B               | 8                               | 0,4                              |                          | 1,7                             | 10                          | 4                                   |
| Ca              | 8                               | 0,04                             | 550                      | 77                              | 635                         | 60                                  |
| SO <sub>4</sub> | 278                             | 7                                | 1300                     | 430                             | 2000                        | 100                                 |
| Na              | 1600                            | 12                               | 24800                    |                                 | 26400                       | 200                                 |
| Cl              | 3100                            | 48                               | 38200                    |                                 | 41300                       | 300                                 |

En millions de tonnes ( $10^{12}$  g). Les masses totales pour l'ensemble du salar sont obtenues en faisant la somme des colonnes 1, 3 et 4. Les quantités contenues dans le gisement du Rio Grande sont incluses dans la colonne 1.

*In million tons ( $10^{12}$  g). The total amounts for the whole salar are obtained by summing columns 1, 3 and 4. Rio Grande amounts are included in column 1.*

En millones de toneladas ( $10^{12}$  g). Las cantidades totales presentes en el salar se obtienen sumando las columnas 1, 3 y 4. Las reservas del yacimiento de Río Grande estan incluidas en la columna 1.

larges ordres de grandeur. Ainsi les quantités de Li, K, Mg, B dans le gisement du Rio Grande sont du même ordre de grandeur que les quantités apportées en 10 000 ans par le Rio Grande (tabl. 4). Par ailleurs, la quantité de halite dissoute (NaCl) apportée par le Rio Grande en 10 000 ans correspond à environ 1 % de la masse totale de halite du salar. Même en tenant compte d'une très grande marge d'erreur, un pareil écart semble bien être significatif et suggère que *la croûte de sel ne provient pas, pour l'essentiel, de l'accumulation d'apports annuels de sel dans le bassin, mais bien de l'assèchement rapide d'un ancien et immense lac salé.*

Les plus fortes concentrations en Li, K, Mg, B se trouvent exactement dans l'axe du Rio Grande, à l'extrême bordure sud de la croûte de sel (fig. 28). En saison sèche, pendant la plus grande partie de l'année (mars à décembre), la rivière s'infiltre à une vingtaine de kilomètres en amont du delta et alimente une nappe souterraine qui s'écoule lentement vers le salar tout en s'évaporant à travers les sédiments deltaïques. Cette nappe se concentre progressivement d'amont en aval et précipite de la calcite, du gypse et de l'ulexite, un borate de sodium et de calcium ( $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ), dans les sédiments du delta. C'est là que se trouve le plus important gisement de borates de Bolivie. La nappe alimente ensuite la saumure intracrustale sub-affleurante dont elle compense les pertes dues à l'évaporation à la surface de la croûte de sel. *Le bilan global de ce cycle hydrologique est une augmentation progressive des masses de constituants dissous apportés par le Rio Grande dans un volume restreint et constant de saumure intracrustale, juste en bordure du salar.*

Ce mécanisme qui a débuté après l'assèchement du lac Tauca, il y a 10 000 ans, et qui se poursuit actuellement, est donc à l'origine d'un gisement exceptionnellement riche et facilement exploitable de Li, K, Mg, B. Notons que les teneurs de ces éléments dans le reste du salar sont parfaitement suffisantes pour justifier une exploitation n'importe où dans le salar. Mais bien entendu la zone la plus favorable est celle où les concentrations sont les plus élevées, c'est-à-dire à l'embouchure du Rio Grande. Signalons que le lithium est exploité à des teneurs de l'ordre de 0,08 g/l dans les saumures de Searles Valley, USA (RYKKEN, 1976), ce qui est 50 fois inférieur aux teneurs des saumures les plus concentrées du salar d'Uyuni.

*On peut faire une curieuse observation quant à la probabilité d'existence d'un tel gisement juste à l'embouchure d'une rivière. Si le Rio Grande avait un débit moyen un peu plus élevé, un lac permanent s'établirait au SE du salar, exactement comme pour le Rio Lauca à son embouchure dans le salar de Coipasa (fig. 2). Dans ce cas les sels apportés par la rivière se répandraient dans une grande partie du salar, notamment*

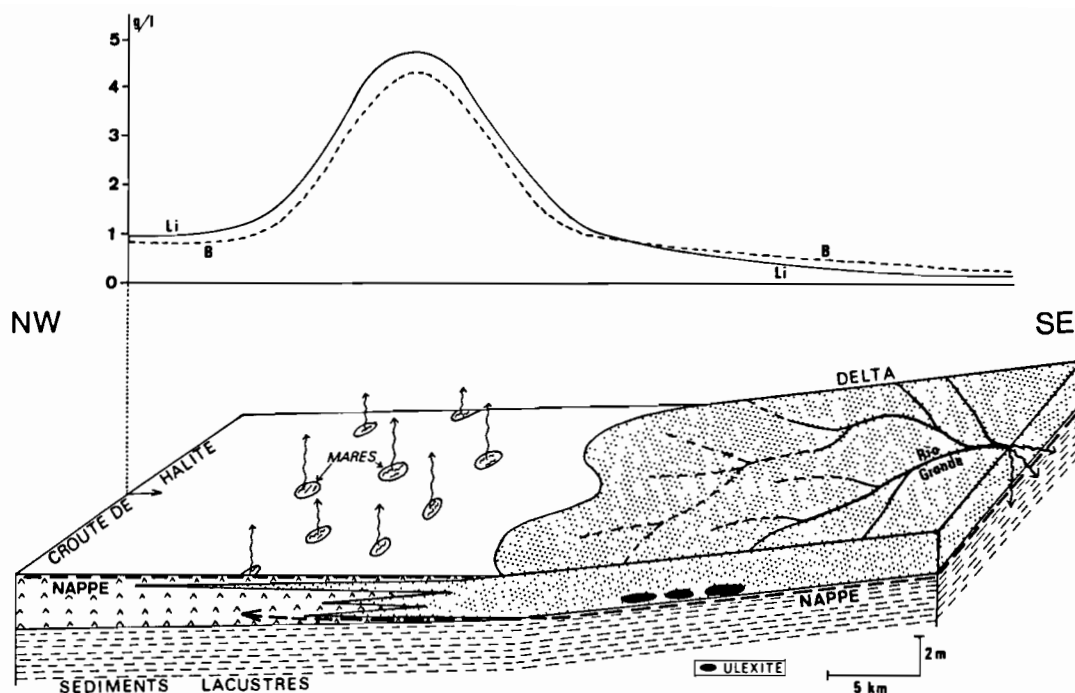


Fig.29 – Bordure SE du salar d'Uyuni, à l'embouchure du Rio Grande. Southeastern shore of the salar de Uyuni, close to the Rio Grande mouth. Orilla sudeste del salar de Uyuni, cerca de la desembocadura del Río Grande

REF. : RISACHER & FRITZ, 1991 b ; RISACHER, 1992.

pendant la saison des pluies, et il n'y aurait pas de concentration notable à l'embouchure. Si par contre le Rio Grande avait un débit plus faible, il s'infiltrerait bien en amont de la croûte de sel, et les éléments dissous se disperseraient dans des nappes diluées loin du salar. Là encore aucune concentration dans un volume très réduit de la croûte ne serait possible. C'est ce qui se produit pour plusieurs autres rivières du bassin versant. Ainsi donc, si le gisement de Rio Grande existe, c'est parce que la rivière a juste le bon débit, ni trop fort, ni trop faible. C'est vraisemblablement une situation exceptionnelle.

## B – LE SALAR DE COIPASA

On dispose de beaucoup moins de données sur le salar de Coipasa que sur le salar d'Uyuni. La croûte de sel a une épaisseur maximum de 2,5 m. Elle est constituée, dans la partie supérieure, de halite qui passe progressivement à de la mirabilite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), de plus en plus abondante, à la base. Comme à Uyuni cette croûte repose sur des sédiments lacustres. Le Rio Lauca draine un bassin essentiellement volcanique de 10 200 km<sup>2</sup> et alimente un lac permanent de saumure au Nord du salar. Dans le reste du salar la saumure intracrustale arrive juste au niveau de la croûte. C'est une saumure chloro-sulfatée sodique riche en Li, K, Mg, B.

Seuls peuvent être donnés des ordres de grandeur des masses des constituants du salar (tabl. 5). Les masses de Li, K, Mg, B apportés par le Rio Lauca depuis l'assèchement du lac Tauca sont environ quatre fois plus élevés que les réserves actuellement présentes dans le salar. Cela suggère que ces éléments ne sont pas conservés dans la saumure intracrustale, mais qu'ils diffusent ou s'infiltrent avec la saumure dans les sédiments lacustres sous-jacents. Le salar de Coipasa serait donc drainé. En ce qui concerne la halite, les 3 milliards de tonnes présentes à Coipasa ne correspondent qu'à 4 % à peine de la masse totale de halite du salar d'Uyuni.

Tableau 5 – *Masses des constituants du salar de Coipasa et ordres de grandeur des apports par le Rio Lauca depuis 10 000 ans ( $10^{12}$  g).* Total amounts of components of Coipasa salar and orders of magnitude of Rio Lauca inputs for the last 10,000 years ( $10^{12}$  g). *Cantidades de componentes en el salar de Coipasa y estimación de los aportes por el Río Grande en los 10,000 últimos años ( $10^{12}$  g)*

|                 | SAUMURES | SELS | APPORTS PAR LE RIO LAUCA |
|-----------------|----------|------|--------------------------|
| Li              | 0,2      |      | 0,7                      |
| K               | 7        |      | 27                       |
| Mg              | 13       |      | 37                       |
| B               | 0,7      |      | 4                        |
| Ca              | 0,2      |      | 44                       |
| SO <sub>4</sub> | 30       | 100  | 190                      |
| Na              | 70       | 1200 | 220                      |
| Cl              | 120      | 1700 | 330                      |

Millions de tonnes. Million tons. Millones de toneladas.

## C – LE PALÉOLAC TAUCA

### 1. Reconstitution de la composition obtenue par dissolution de la croûte

Puisque l'on connaît approximativement les quantités totales de tous les constituants stockés dans les salars d'Uyuni et de Coipasa, ainsi que l'ancien niveau du paléolac (fig. 10), on peut essayer de reconstituer la composition chimique de l'ancien lac salé qui a déposé les croûtes de sel. *A priori* il suffit de redissoudre les masses de tous les constituants des deux salars dans le volume d'eau de l'ancien lac. Mais cette approche, apparemment simple, présente quelques difficultés.

Tout d'abord nous savons que le lac Tauca était saturé en gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), puisque ce minéral est présent dans les sédiments lacustres finement lités, sous la croûte de sel. Donc, dès que le lac a commencé à s'assécher, et à se concentrer, le gypse a continué à précipiter, mais beaucoup plus massivement. La croûte de sel ne s'est déposée que plus tard lorsque les eaux du lac ont atteint la saturation en halite, minéral beaucoup plus soluble que le gypse. Donc sous la croûte de sel doit se trouver un niveau de gypse qui n'a pas été pris en compte dans les masses des constituants du salar et qui correspond à la précipitation précoce de ce minéral entre le début de l'assèchement du lac et le début de la précipitation de la halite. Les concentrations en Ca et SO<sub>4</sub> obtenues en dissolvant les croûtes des salars seront donc vraisemblablement trop faibles.

Un autre problème concerne les pertes de sel pendant l'assèchement du lac. Tous les lacs salés dont on a pu suivre l'assèchement ont perdu une quantité non négligeable, de 10 à 50 %, de leurs constituants dissous que l'on ne retrouve pas dans les croûtes de sel résiduelles (SWENSON et COLBY, 1955 ; BONYTHON, 1955 ; LANGBEIN, 1961 ; ALDERMAN, 1985). Cette perte est due à l'action du vent qui entraîne les sels déposés sur les bordures du lac, à l'infiltration des eaux piégées dans des petites mares qui se séparent du lac principal et à la diffusion des constituants dans les eaux interstitielles des sédiments du lac (LANGBEIN, 1961 ; JONES et VAN DENBURGH, 1966 ; ALDERMAN, 1985 ; SPENCER *et al.*, 1985). Les pertes sont les plus élevées lorsque le lac est très étendu et de faible épaisseur. Par contre lorsque le lac est profond, comme c'était le cas du paléolac Tauca (70 m environ), les sels, même les plus solubles, précipitent dans la masse d'eau du lac, ce qui les protège du vent. Peu de sels sont perdus sur les bords. Lorsque l'assèchement arrive à sa phase finale, les sels sont déjà accumulés en une croûte épaisse et assez dure sur laquelle l'action du vent n'a que peu d'effet. Les pertes de sels lors de l'assèchement du lac Tauca n'ont donc pas dû être très élevées. Nous allons envisager une valeur arbitraire, mais raisonnable, de 20 %. Nous augmenterons donc de ce pourcentage les teneurs obtenues en dissolvant la croûte de sel dans le volume d'eau de l'ancien lac. En fait, les valeurs absolues des paléoconcentrations ne sont pas d'une importance capitale. Bien plus importantes sont les proportions relatives de ces constituants, les uns par rapport aux autres, dans l'eau du lac. Or ces proportions ne dépendent pas du facteur de correction choisi.

Une autre difficulté provient de la subdivision du paléolac Tauca en trois lacs séparés par des détroits : les lacs Uyuni, Coipasa et Poopo (fig. 10). Le seuil entre les bassins des lacs Poopo et Coipasa est situé à

environ 3700 m d'altitude, à peine en dessous du niveau du lac qui oscillait entre 3700 et 3720 m. Le paléolac Poopo a donc été séparé très tôt du paléolac Coipasa lorsque le niveau de l'eau a commencé à baisser. Nous ne tiendrons donc pas compte du lac Poopo pour les reconstitutions paléochimiques. Par contre le seuil entre les bassins de Coipasa et d'Uyuni est à 3657 m, soit un mètre seulement au-dessus de l'actuelle croûte de sel de Coipasa (3656 m) et quatre mètres au-dessus de celle du salar d'Uyuni (3653 m). Les deux paléolacs ont donc été en connexion jusqu'aux phases ultimes de l'assèchement. Rien n'indique *a priori* que les masses de sel de chaque salar correspondent aux masses dissoutes qui se trouvaient dans chaque paléolac. Il a très bien pu se produire des transferts de sels d'un bassin à l'autre lors de l'assèchement du lac. Les volumes des paléolacs Coipasa et Uyuni étaient respectivement d'environ 350 et 850 km<sup>3</sup>. Si l'on dissout les masses totales des constituants de chaque croûte de sel dans le volume d'eau correspondant, on obtient une paléosalinité de 85 g/l pour le lac Uyuni et de 9 g/l pour le lac Coipasa. Cette dernière valeur est manifestement fautive. Les diatomées des sédiments lacustres ainsi que la présence de coprolites d'*Artemia* indiquent sans équivoque que les deux paléolacs avaient des salinités voisines comprises entre 40 et 100 g/l. Donc la plus grande partie des sels dissous dans le lac Coipasa a été transférée au cours de l'assèchement dans le bassin topographiquement plus bas du lac d'Uyuni.

Il faut donc dissoudre la somme des masses des constituants des deux salars dans le volume total des deux paléolacs, soit 1200 km<sup>3</sup>. En principe il faut déduire les quantités apportées depuis 10 000 ans dans les deux salars. Or on a vu que l'essentiel des apports du Rio Lauca dans le salar de Coipasa n'a pas été conservé, mais s'est infiltré dans le fond du bassin. Quant aux apports du Rio Grande pendant 10 000 ans dans le salar d'Uyuni, ils sont minimes en regard des masses totales présentes dans le salar. On peut les négliger en première approximation. La phase suivante consiste à augmenter de 20 % ces teneurs pour tenir compte très approximativement des pertes par érosion éolienne lors de l'assèchement. Le degré de saturation du gypse dans cette solution a été ensuite calculé. Comme prévu, cette solution est nettement désaturée en gypse, ce qui confirme que les concentrations obtenues en Ca et SO<sub>4</sub> sont trop faibles. Il est possible de remonter aux concentrations initiales en ces deux constituants. Pour cela on augmente progressivement et en quantités égales (en moles/litre) les concentrations de Ca et SO<sub>4</sub> jusqu'à arriver à la saturation en gypse. La différence entre les nouvelles et les anciennes concentrations permet d'estimer la masse de gypse précipitée au début de l'assèchement du lac : environ 4 milliards de tonnes, ce qui correspond à une couche de gypse d'environ 15 cm d'épaisseur sous la croûte de sel. Cette couche n'a jamais pu être carottée pour des raisons techniques. Il aurait d'ailleurs été bien difficile de la différencier des sédiments lacustres Tauca très gypseux avec laquelle elle se confond. La composition chimique finale du paléolac Tauca, une fois tous les ajustements réalisés, est donnée dans le tableau 6. La salinité totale est de 80 g/l. On peut estimer approximativement l'incertitude à  $\pm 20$  g/l.

## 2. Reconstitution de la composition obtenue par évaporation des apports

La plupart des lacs salés continentaux sont le résultat de l'évaporation d'eaux diluées apportées dans un bassin fermé. La composition des principales eaux diluées de l'Altiplano – lac Titicaca, Rio Lauca et Rio Grande – provient de l'altération des roches du bassin et n'était probablement pas très différente il y a 10 000 ans de ce qu'elle est aujourd'hui. En effet, la géologie de l'Altiplano ne s'est pas fondamentalement modifiée pendant l'Holocène. Aucune glaciation, aucun épisode volcanique majeur n'a été identifié pendant les 10 000 dernières années. Une démarche analogue a été adoptée par BRADLEY et EUGSTER (1969) et SURDAM et WOLFBAUER (1975) pour la Green River Formation, et par FONTES *et al.* (1991) pour la paléohydrologie du Nord Mali. On peut donc vérifier si en simulant l'évaporation des apports actuels on obtient bien une composition du paléolac Tauca voisine de celle que l'on a obtenue en dissolvant les croûtes de sel.

La simulation de l'évaporation a été faite par ordinateur en utilisant le programme de RISACHER et FRITZ (1984 a). Ce code calcule les compositions chimiques des eaux qui s'évaporent et détermine la séquence des minéraux qui précipitent. La simulation a été arrêtée pour chaque eau d'apport lorsque la salinité totale de la saumure calculée égalait celle du paléolac Tauca obtenue par dissolution des croûtes, soit 80 g/l. On peut donc comparer à salinité totale égale les concentrations de chaque constituant. Les compositions chimiques calculées des saumures provenant de la simulation de l'évaporation des eaux du lac Titicaca, du Rio Lauca et du Rio Grande sont indiquées dans le tableau 6 où se trouve également la composition du paléolac Tauca

Tableau 6 – *Reconstitution de la chimie du paléolac Tauca (g/l).* Estimation of the chemical composition of Paleolake Tauca. *Reconstitución de la composición química del paleolago Tauca*

|                 | SAUMURES OBTENUES<br>PAR EVAPORATION<br>A PARTIR DES EAUX DU<br>RIO GRANDE LAUCA TITICACA |       |       | SAUMURE<br>OBTENUE<br>PAR<br>DISSOLUTION | COMPOSITION<br>POSSIBLE<br>DU<br>LAC TAUCA | SOURCE SALEE<br>DU DIAPIR<br>DE<br>TARCAMAYA |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                 | (1)                                                                                       | (2)   | (3)   | (4)                                      | (5)                                        | (6)                                          |
| Li              | 0,18                                                                                      | 0,073 | 0,042 | 0,009                                    | 0,01                                       | 0,0025                                       |
| K               | 1,33                                                                                      | 2,96  | 1,83  | 0,24                                     | 0,29                                       | 0,0508                                       |
| Mg              | 2,02                                                                                      | 2,23  | 3,86  | 0,22                                     | 0,27                                       | 0,282                                        |
| B               | 0,51                                                                                      | 0,40  | 0,16  | 0,008                                    | 0,01                                       | 0,0079                                       |
| Ca              | 1,04                                                                                      | 0,23  | 0,366 | 0,53                                     | 1,7                                        | 2,19                                         |
| SO <sub>4</sub> | 5,83                                                                                      | 20,7  | 22,0  | 1,8                                      | 4,4                                        | 3,98                                         |
| Na              | 25,1                                                                                      | 23,3  | 21,4  | 23,2                                     | 28,4                                       | 26,2                                         |
| Cl              | 44,0                                                                                      | 30,1  | 30,4  | 36,7                                     | 44,9                                       | 43,7                                         |
| TDS             | 80                                                                                        | 80    | 80    | 62,7                                     | 80                                         | 76,4                                         |

Les colonnes 1, 2, 3 sont les saumures obtenues en simulant l'évaporation des principales eaux diluées. La colonne 4 est la composition obtenue en dissolvant dans le volume d'eau du lac tous les constituants des salars d'Uyuni et Coipasa. Les concentrations de la colonne 5 sont celles de la colonne 4 augmentées d'environ 20 %, sauf pour Ca et SO<sub>4</sub> dont les concentrations ont été augmentées jusqu'à obtenir la saturation en gypse.

*Columns 1, 2, 3 are brine compositions obtained by simulating the evaporation of the major dilute waters of the Altiplano. Column 4 is the composition obtained by dissolving all components of Uyuni and Coipasa salars in the paleolake volume. Concentrations of column 5 are those of column 4 increased by 20 %, except for Ca and SO<sub>4</sub> whose concentrations were increased up to reach saturation with respect to gypsum. Column 6 is a typical composition of a Tarcamaya saline spring.*

Las columnas 1, 2, 3 son salmueras obtenidas simulando la evaporación de las principales aguas diluidas del Altiplano. La columna 4 es la composición obtenida disolviendo los salares de Uyuni y Coipasa en el volumen de agua del paleolago Tauca. Las concentraciones de la columna 5 son las de la columna 4 aumentadas de 20 %, excepto para Ca y SO<sub>4</sub> cuyas concentraciones han sido aumentadas hasta llegar a la saturación en yeso. La columna 6 es una composición de un manantial salado del diapiro de Tarcamaya.

obtenue par dissolution des croûtes.

*On constate que les compositions obtenues par évaporation des apports sont très différentes de celle que l'on obtient en dissolvant les salars d'Uyuni et de Coipasa dans le volume d'eau du lac Tauca. Si les teneurs en Na et Cl sont à peu près du même ordre de grandeur, celles en Li, K, Mg, B sont 5 à 50 fois plus faibles dans l'eau obtenue par dissolution des croûtes que dans celles obtenues par évaporation des apports. On a reporté sur la figure 30 les concentrations en Li, K, Mg, B en fonction de la salinité totale pour un grand nombre d'eaux de rivières et de lacs de l'Altiplano. Les points représentatifs des compositions du paléolac Tauca obtenues par dissolution des croûtes et par évaporation des apports y ont également été reportées. Il apparaît que la composition obtenue par dissolution des croûtes est tout à fait anormale dans le contexte hydrochimique de l'Altiplano. Par contre, la composition obtenue par évaporation des apports est parfaitement cohérente avec celles des autres eaux de cette région.*

Ceci est une différence majeure. Elle peut s'interpréter de deux façons. La première réaction a été d'imaginer une perte de Li, K, Mg, B par infiltration de la saumure résiduelle intracrustale dans les sédiments lacustres sous-jacents, après l'assèchement du lac. Il manquerait ainsi 90 % environ de Li, K, Mg, B dans la saumure actuelle. L'autre hypothèse consiste à envisager un fort excès de chlorure de sodium dans les eaux du paléolac dû à la redissolution, partielle ou totale, d'une ancienne croûte de sel déposée par le lac précédent, c'est-à-dire le lac Minchin.

En effet, imaginons qu'un nouveau lac s'établisse aujourd'hui sur l'Altiplano. Il redissoudrait une partie du salar d'Uyuni, et se trouverait ainsi fortement enrichi en NaCl et appauvri en Li, K, Mg, B par rapport à ses eaux d'alimentation. Evidemment un pareil processus ne fait que repousser le problème dans le temps.

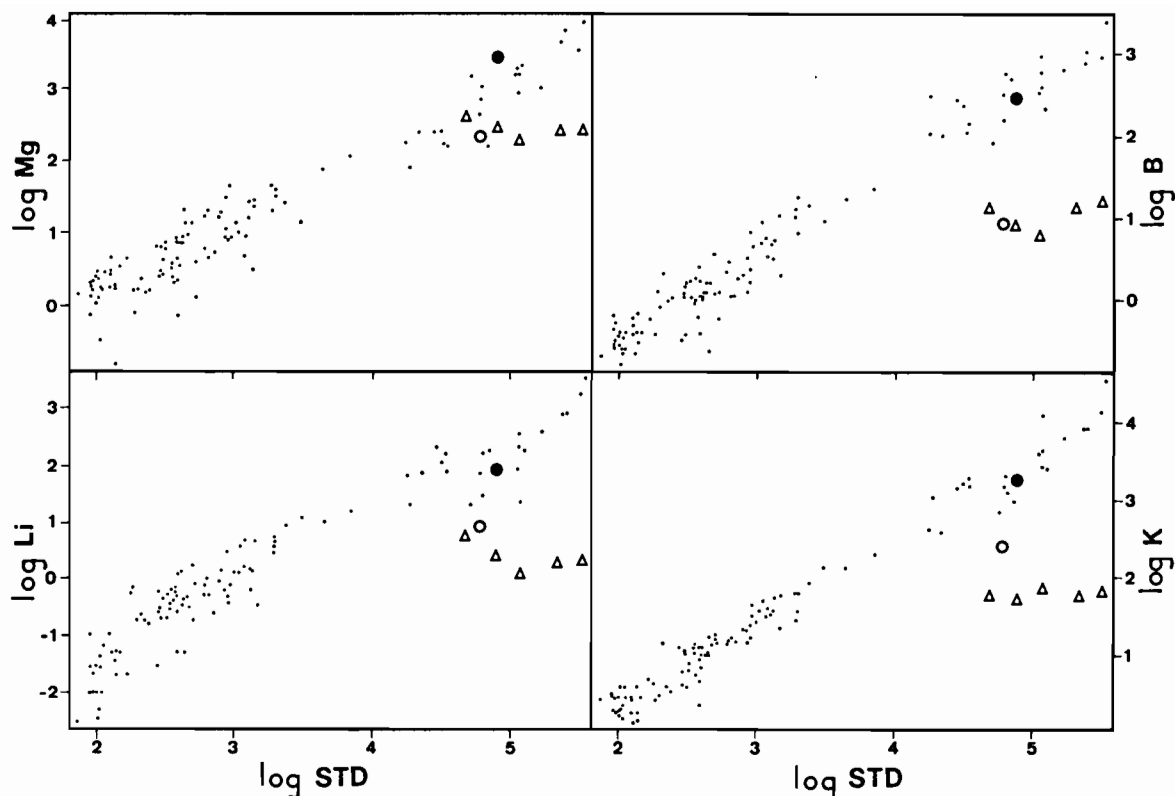


Fig.30 – Concentrations en Li, K, Mg, B des eaux du paléolac Tauca (en mg/l) Li, K, Mg, B concentrations of Paleolake Tauca brine (in mg/l). Concentraciones en Li, K, Mg, B de las aguas del paleo-lago Tauca (en mg/l)

STD = sels totaux dissous en mg/l. La composition du paléolac obtenue par évaporation des apports est représentée par un cercle plein, et celle obtenue par dissolution de la croûte est figurée par un cercle vide. Les triangles sont des sources salées du diapir de Tarcamaya. Les points correspondent aux rivières et aux lacs de l'ensemble de l'Altiplano. STD = total dissolved solids in mg/l. The paleolake composition derived by evaporation of the present inflows is shown by a solid circle, and that obtained by dissolution of the crust is shown by an open circle. Triangles are saline springs of the Tarcamaya diapir. Points correspond to rivers and lakes of the whole Altiplano.

STD = sales totales disueltos en mg/l. La composición del lago obtenida por evaporación de los aportes actuales esta representada por un círculo lleno. La composición obtenida por disolución de la costra es figurada por un círculo vacío. Los triángulos son manantiales salinos del diapir de Tarcamaya. Los puntos correspondan a los ríos y lagos del Altiplano.

REF. : RISACHER & FRITZ, 1991 b ; RISACHER, 1992.

Pourquoi le paléolac Minchin aurait-il eu une composition anormalement enrichie en NaCl ? L'hypothèse de l'enrichissement du paléolac Tauca en NaCl est sérieusement étayée par l'étude de la géochimie du brome dans la croûte de sel du salar d'Uyuni.

## D – ORIGINE DU SEL : UTILISATION DE LA GÉOCHIMIE DU BROME DANS LE SALAR D'UYUNI

### 1. Principes de la géochimie du brome

Lorsqu'un minéral chloruré précipite à partir d'une solution contenant du brome, celui-ci se substitue partiellement au chlore dans le réseau cristallin du minéral. La teneur en brome du minéral dépend de la

concentration en brome de la solution. Le coefficient de distribution du brome entre la solution et le minéral est défini par  $q$  (BOECKE, 1908 ; BRAITSCH, 1971) :

$$q = \frac{\text{pourcentage pondéral de Br dans le sel}}{\text{pourcentage pondéral de Br dans la solution}} \quad (13)$$

On en déduit aisément que :

$$q = D \cdot [\text{Br}]_{\text{sel}} / [\text{Br}]_{\text{aq}}$$

$[\text{Br}]_{\text{sel}}$  est la teneur en ppm du brome dans le sel,  $[\text{Br}]_{\text{aq}}$  est la concentration en mg/l du brome dans la solution,  $D$  est la masse volumique en g/cm<sup>3</sup> de la solution.

On peut donc écrire :

$$[\text{Br}]_{\text{sel}} = (q/D) \cdot [\text{Br}]_{\text{aq}} \quad (14)$$

Le seul minéral chloruré qui nous intéresse ici est la halite. La valeur communément admise du coefficient de partage ( $q$ ) du brome est de 0,14 (VALYASHKO, 1956 ; BRAITSCH, 1971). Elle est, en première approximation, constante au cours de la précipitation massive de la halite. Elle décroît jusque vers 0,07 lorsque la concentration en magnésium de la solution devient importante (BRAITSCH et HERMANN, 1963), ce qui est le cas lorsque la halite n'est plus le sel dominant (paragenèses à sylvite, carnallite, kainite...). Comme la masse volumique d'une saumure précipitant essentiellement de la halite est à peu près constante (1,20 à 1,25 g/cm<sup>3</sup>), on peut considérer que la teneur en brome de la halite qui précipite est quasiment proportionnelle à la concentration en brome de la solution.

La valeur de 0,14 du coefficient de distribution a été discutée. Elle semblerait dépendre de la vitesse de cristallisation de la halite. Des valeurs plus faibles, de l'ordre de 0,06, ont été proposées (HOLSER, 1979). En fait ce ne sont pas tant les valeurs absolues des teneurs en brome de la halite qui sont importantes, mais leurs variations dans les profils. L'interprétation de ces variations ne dépend pas de la valeur du coefficient de partage dans la mesure où l'on suppose celui-ci constant tout au long du profil.

Au cours du fractionnement la majeure partie du brome reste en solution. Seule une petite quantité est incorporée dans la halite. La faible valeur du coefficient de partage (0,14) en est la cause. *Cela permet d'utiliser les variations des teneurs en brome de la halite comme des enregistreurs de la variation de la salinité du milieu de dépôt.*

La teneur en brome peut également servir à préciser l'origine marine ou continentale du sel. La concentration en brome de l'eau de mer est d'environ 60 mg/l. Il faut la concentrer environ 9 fois pour atteindre la saturation en halite. La concentration du brome est alors de 540 mg/l et la masse volumique de la solution de 1,2. La formule (14) donne une teneur en brome de la halite en début de précipitation de 70 ppm. Il s'agit donc là de la teneur minimale en brome de la halite primaire d'origine marine. En général les halites primaires marines ont des teneurs en brome comprises entre 70 et 200 ppm. Cependant on observe souvent des formations salifères présentant des teneurs en brome bien inférieures. Il y a plusieurs raisons à cela.

Tout d'abord il peut s'agir de halite d'origine continentale. Sa teneur en brome dépend des concentrations relatives en brome et en chlore des eaux diluées. En général on caractérise ces eaux par leur rapport Br/Cl. Si ce rapport est inférieur à celui de l'eau de mer, la halite, qui précipitera après évaporation de ces eaux continentales diluées, aura des teneurs en brome inférieures à celles de la halite d'origine marine.

Il est cependant possible de trouver des dépôts de sel dont l'origine marine ne fait aucun doute et qui présentent des teneurs nettement inférieures à la valeur théorique de 70 ppm. Il peut s'agir de niveaux de sel marin primaire redissous par de l'eau de mer et reprécipités ensuite. Le rapport Br/Cl de la solution résultante est très nettement plus faible que celui de l'eau de mer puisque s'y trouve dissous beaucoup de chlorure de sodium et très peu de brome. La halite secondaire qui précipite à partir de cette solution est très appauvrie en brome, mais jamais à moins de 8 ppm à cause de la contribution en brome par l'eau de mer elle-même, et ceci même après plusieurs cycles de dissolution-précipitation (HOLSER, 1966). On peut envisager le même processus, mais avec des eaux continentales. Il n'y a alors plus de limite inférieure à 8 ppm. La recristallisation de la halite est un autre mécanisme qui peut entraîner une réduction de la teneur en brome, ainsi que de la porosité.

Les profils de distribution du brome dans les couches de halite sont souvent d'une grande complexité. Leur interprétation est délicate et souvent très hypothétique. Cela est d'abord dû à l'extrême sensibilité du brome comme enregistreur des variations du milieu de dépôt. Il faut souvent lisser les profils ou ne considérer que les moyennes des teneurs sur une certaine épaisseur. D'autre part la halite est un sel très soluble, donc très mobile. Il est particulièrement sensible aux réactions diagénétiques, lesquelles modifient les teneurs en brome. Dans la mesure du possible il faut associer d'autres observations à la géochimie du brome.

## 2. Distribution et teneurs du brome dans le salar d'Uyuni

Le brome a été analysé dans 140 saumures intracrustales et dans 33 échantillons de halite du salar d'Uyuni. Neuf saumures et trois sels ont également été analysés à Coipasa. La figure 31 présente six profils

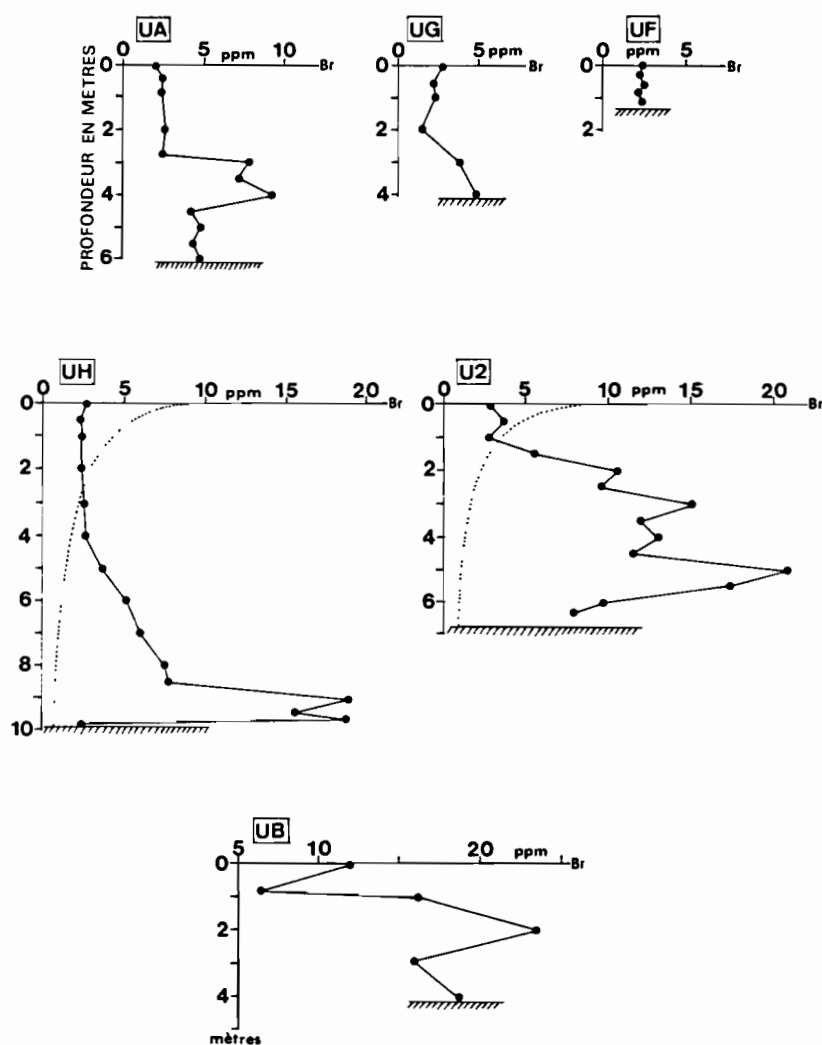


Fig.31 – Teneur en brome de la halite dans six profils à travers la croûte du salar d'Uyuni (localisation des puits dans la figure 15). Bromine content of halite in six profiles through Uyuni crust (well locations in fig. 15). Contenido en bromo de la halita en seis perfiles en el salar de Uyuni (ubicación de los pozos en la fig. 15)

En traits continus : les teneurs réelles ; en pointillés : les profils calculés. Solid lines : actual contents ; dashed lines : calculated contents. Líneas continuas : contenidos reales ; líneas punteadas : contenidos calculados.

de teneurs en brome dans la croûte du salar d'Uyuni (localisation des puits dans la figure 24). Comme pour les autres solutés, Li, K, Mg, B, la concentration en brome dans les saumures du salar d'Uyuni augmente fortement au SE du salar, près de l'embouchure du Rio Grande. La teneur en brome du sel y atteint 20 ppm. Comme pour Li, K, Mg, B, il est très probable que le brome s'est concentré dans cette zone grâce aux apports du Rio Grande depuis 10 000 ans.

Les teneurs en brome de la halite du salar d'Uyuni sont comprises entre 1,6 et 23,4 ppm, avec une moyenne de 6,6 ppm. Les teneurs inférieures à 2 ppm sont parmi les plus faibles reportées dans le monde (HOLSER, 1966 ; EATON *et al.*, 1972 ; HOLSER *et al.*, 1972 ; HOLDOWAY, 1978). Le rapport Br/Cl moyen des principales eaux diluées de l'Altiplano (Titicaca, Mauri, Lauca, Rio Grande, voir fig. 2) est de 1,4 mg/g. La concentration en chlorure des saumures au début de la précipitation de la halite est presque toujours (et pour ces eaux en particulier) de 190 g/l, ce qui correspond à 310 g/l de NaCl. Il suffit de multiplier cette valeur de 190 g/l par 1,4 pour obtenir la teneur en brome (en mg/l) de la solution au début de la précipitation de la halite, soit 266 mg/l. Appliquons la formule (14) :

$$[\text{Br}]_{\text{sel}} = (q/D)[\text{Br}]_{\text{aq}}$$

On obtient une teneur en brome de la halite initiale de 31 ppm pour un coefficient de partage ( $q$ ) de 0,14 et une masse volumique ( $D$ ) de 1,2 g/cm<sup>3</sup>. Ceci est une valeur limite inférieure. Elle peut augmenter notablement au cours de la précipitation ultérieure de la halite, lorsque la saumure se concentre. On peut approximativement estimer qu'une couche de halite provenant de l'assèchement d'un lac exclusivement alimenté par les eaux diluées actuelles de l'Altiplano auraient une teneur moyenne en brome comprise entre 50 et 100 ppm. *Il est donc clair que la halite de la croûte de sel du salar d'Uyuni ne peut pas avoir précipité à partir de la simple évaporation des eaux diluées de l'Altiplano.* Notons que si l'on prend pour coefficient de partage la valeur la plus faible reportée dans la littérature (0,06), la teneur initiale en brome de la halite est de 13 ppm, ce qui conduit à une teneur moyenne encore bien trop élevée, entre 25 et 50 ppm.

Examinons à présent en détail la répartition du brome dans le sel. Nous allons comparer les profils verticaux du brome dans la croûte avec le profil théorique d'une couche de halite provenant de l'assèchement d'un lac salé.

### 3. Modélisation de la distribution verticale du brome dans le salar d'Uyuni

Les masses totales de brome dans les salars d'Uyuni et de Coipasa sont indiquées dans le tableau 7. A partir de ces valeurs la concentration en brome du paléolac Tauca a pu être estimée à 1,6 mg/l. On a utilisé la même approche que pour les autres constituants (voir ci-dessus la reconstitution de la composition chimique du lac Tauca). On a ensuite modélisé, en partant de la formule (14), la répartition théorique du brome dans la halite lors de l'assèchement du paléolac par évaporation. Les courbes théoriques des teneurs en brome sont présentées sur la figure 31 en regard des profils réels des puits UH et U2. *On constate immédiatement que profils réels et profils théoriques du brome dans la halite sont totalement différents. Les profils réels montrent une distribution inverse dans le sel (comme si le salar avait été retourné !).*

D'autre part la modélisation a également permis d'estimer les teneurs moyennes théoriques du brome dans la saumure et le sel. Celles-ci sont respectivement de 86 mg/l et 2,2 ppm. Les valeurs réelles sont de 71 mg/l et 6,6 ppm. Pour les saumures, la différence n'est pas concluante, vu l'incertitude sur ces valeurs (environ  $\pm 15\%$ ). Par contre l'écart entre les teneurs théorique et réelle du brome dans le sel sont, elles, significatives. Il se confirme bien que le brome a une distribution tout à fait anormale dans le salar d'Uyuni.

En examinant attentivement les profils de la figure 31, on remarque que la croûte semble être divisée en deux parties : une couche supérieure où la teneur en brome du sel est assez uniforme et constante d'un puits à l'autre (2-3 ppm), et une couche inférieure où les teneurs sont nettement plus élevées et irrégulières. La teneur en brome du sel de la couche supérieure ne semble pas dépendre de la concentration en brome de la saumure intracrustale. La couche inférieure semble absente au niveau du puits UF. Quant au puits UB, il ne répond pas à cette description, probablement parce qu'il est fortement enrichi en brome par les apports récents du Rio Grande depuis 10 000 ans.

Tableau 7 – *Masses de brome dans les salars d'Uyuni et de Coipasa ( $10^6$  g).* Total bromine in the salars of Uyuni and Coipasa ( $10^6$  g). *Cantidades de bromo en los salares de Uyuni y Coipasa ( $10^6$  g)*

|          | UYUNI       |         | COIPASA |
|----------|-------------|---------|---------|
|          | SALAR TOTAL | SUD-EST |         |
| SAUMURES | 1350000     | 170000  | 70000   |
| HALITE   | 420000      | 8000    | 20000   |
| TOTAL    | 1770000     | 178000  | 90000   |

Les masses au SE du salar d'Uyuni correspondent en ordre de grandeur aux apports récents par le Rio Grande depuis 10 000 ans.

*Amounts at southeastern Uyuni are of the same magnitude than the recent inputs by the Rio Grande for the last 10,000 years.*

Las reservas en el sudeste del salar de Uyuni son del mismo orden de magnitud que los aportes por el Río Grande desde hace 10,000 años.

#### 4. Le brome dans la partie supérieure de la croûte de sel

Nous avons déjà observé une distribution uniforme du brome dans les croûtes profondes, lesquelles avaient été interprétées comme des dépôts de type playa. Aucun des autres mécanismes que nous avons envisagé alors ne peut s'appliquer à la couche supérieure. Mais on sait également que le salar d'Uyuni provient de l'assèchement, sans doute rapide, d'un ancien lac salé. Les apports ultérieurs en sel sont négligeables. Comment concilier un processus d'assèchement avec un dépôt de type playa? Le paléolac Tauca avait un volume de  $1200 \text{ km}^3$  et une teneur en NaCl d'environ 73 g/l. Au cours de l'assèchement du lac, la halite a commencé à précipiter lorsque l'eau du lac a atteint une concentration de 300 g/l, ce qui correspond à un facteur de concentration de 4,1 (300/73) et à un volume de saumure de  $293 \text{ km}^3$  ( $1200/4,1$ ). Le volume  $V$  ( $\text{km}^3$ ) du paléolac Tauca en fonction de sa profondeur maximale  $H$  (m) a été établi à partir des cartes topographiques :

$$V = 1,13.H^{3/2} + 0,81.(H - 12)^{3/2} + 4,023.H - 37,642$$

Pour  $V = 293 \text{ km}^3$ , la profondeur  $H$  du paléolac était de 28 m, ce qui correspond à un plan d'eau à 3670 m, soit 17 m au-dessus de la surface actuelle, parfaitement plate, du salar d'Uyuni. Le dépôt initial de sel recouvrait alors une surface beaucoup plus étendue que la croûte actuelle, surtout dans le bassin de Coipasa (fig. 32). Puis les pluies ont rapidement lessivé le sel des bordures, topographiquement plus élevé, et l'ont redistribué dans le fond du bassin. Très temporairement, le salar d'Uyuni s'est comporté comme un lac de type playa. Le sel des bordures a précipité au tout début de la saturation en halite. Il contenait donc les plus faibles teneurs en brome. Un tel mécanisme rend bien compte des teneurs faibles et uniformes en brome du sel de la couche supérieure, aussi bien verticalement qu'horizontalement. Le profil UF, très proche de la bordure du salar, pourrait représenter la base du dépôt initial de halite (bordure de la croûte actuelle sur la figure 32). Le profil théorique de distribution du brome dans la croûte finale horizontale est représentée sur la figure 32. Le contact entre sel primaire et sel redistribué est souligné par une discontinuité bien marquée. On observe une discontinuité très similaire dans le profil du puits UA (fig. 31).

#### 5. Le brome dans la partie inférieure de la croûte de sel

Nous avons vu que la teneur moyenne réelle de la halite (6,6 ppm) était trois fois supérieure à la teneur calculée (2,2 ppm). Une quantité importante de brome secondaire semble donc avoir été incorporée dans la halite, et plus précisément dans la couche inférieure. Des saumures beaucoup plus concentrées en brome ont précipité de la halite enrichie en brome dans la couche inférieure du salar d'Uyuni.

Une phase climatique extrêmement aride a affecté l'Altiplano nord (WIRRMANN et OLIVEIRA ALMEIDA, 1987) et l'Altiplano central (RISACHER et FRITZ, 1992) pendant l'Holocène, c'est-à-dire après le dépôt de la croûte de sel du salar d'Uyuni. Le niveau de la saumure intracrustale du salar, qui se trouve actuellement

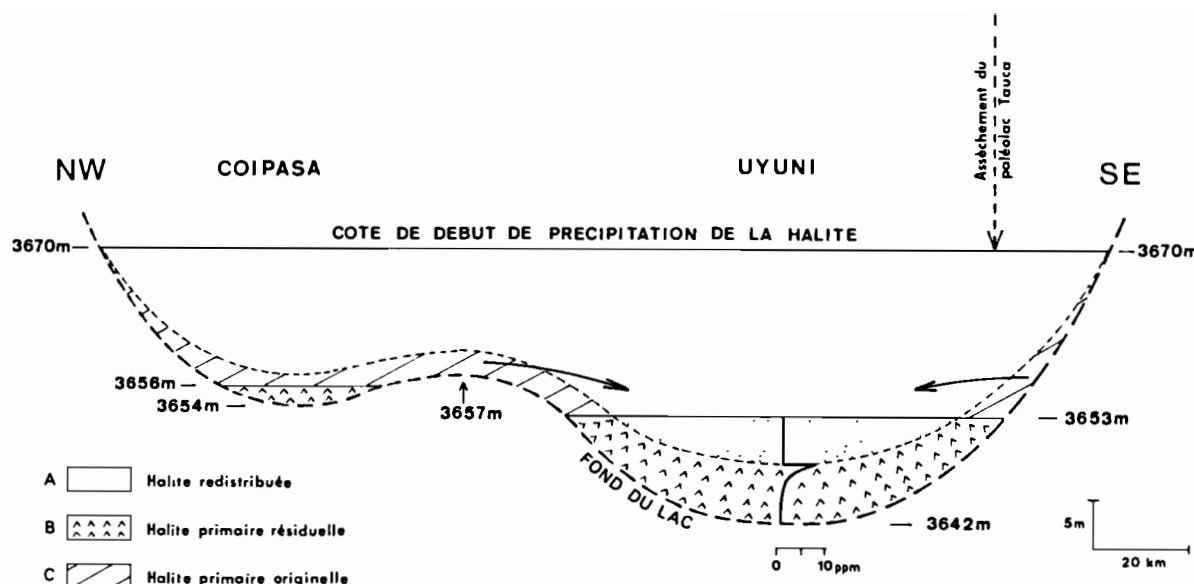


Fig.32 – Répartition initiale du sel au cours de l'assèchement du paléolac Tauca. Initial distribution of salt as Paleolake Tauca dried up. Repartición inicial de la sal durante el secamiento del paleolago Tauca

Un profil théorique de distribution verticale du brome est indiqué au centre du salar d'Uyuni.

A : redistributed halite ; B : primary residual halite ; C : vanished primary halite. At 370 m : salting level. A theoretical bromine content profile in halite is shown at central Uyuni.

A : halita redistribuida ; B : halita primaria residual ; C : halita primaria redisuelta. Un perfil teórico del bromo en la halita es representado en el centro del salar de Uyuni.

à 10–20 cm sous la surface, a dû s'abaisser lentement par évaporation, ce qui a permis à certaines espèces, dont le brome, de se concentrer fortement dans une lame profonde de saumure résiduelle. De la halite secondaire, très enrichie en brome, a pu précipiter dans la partie profonde de la croûte par un mécanisme de dissolution–recristallisation activé par les variations de température (SCHREIBER et WALKER, 1992). Lorsque la température augmente, la halite primaire, de faible teneur en brome, se dissout. Par contre, lorsque la température diminue, de la halite secondaire riche en brome précipite à partir de la saumure résiduelle. Des variations successives de température de la saumure résiduelle, même de faibles amplitudes, ne peuvent qu'entraîner une augmentation de la teneur moyenne en brome de la halite en contact avec cette saumure.

Des traces de polyhalite ( $K_2MgCa_2(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$ ) ont été détectées aux rayons X et au microscope électronique à balayage dans les niveaux les plus riches en brome des puits UH, U1 et U2 (RISACHER et FRITZ, 1992). Or les saumures de ces régions du salar sont sous-saturées par rapport à ce minéral. Il faudrait concentrer environ trois à quatre fois les saumures actuelles pour atteindre la saturation en polyhalite. Cela confirme que des saumures beaucoup plus concentrées en Li, K, Mg, B, et Br ont été autrefois en contact avec le sel.

Nous venons d'étudier la croûte superficielle du salar d'Uyuni. La géochimie du brome a montré que le sel du salar ne pouvait pas provenir des eaux diluées qui drainent les formations actuelles de l'Altiplano. Il semble donc bien que l'essentiel de la halite dissoute dans le paléolac Tauca provient de la redissolution d'une croûte de sel plus ancienne. Afin d'éclaircir l'origine du possible excès de sel, ou, au contraire, du déficit en Li, K, Mg, B dans le bassin central de l'Altiplano, un sondage de 121 m de profondeur a été réalisé dans la zone centale du salar (Pl. II, 5 ; localisation sur la figure 24).

## E – ÉVOLUTION QUATERNAIRE DE L'ALTIPLANO CENTRAL : LE SONDAGE PROFOND

### 1. Excès de sel dans le système

Onze autres croûtes de sel séparées par des sédiments fins ont été traversées (fig. 33 et Pl. II, 6). A la base, d'épaisses croûtes de sel alternent avec de minces niveaux de sédiments fins. L'épaisseur de ces sédiments augmente vers le haut, alors que celle des croûtes de sel diminue notablement. Ces niveaux fins sont essentiellement constitués de gypse, de calcite et de matériel détritique d'origine volcanique. Malgré leur consistance argileuse, ils ne contiennent que très peu d'argile. La présence de coprolites d'*Artemia* dans presque tous ces niveaux indique que ceux-ci sont d'origine lacustre. Seuls les deux derniers et minces niveaux de sédiments fins à la base du profil ne présentent pas de caractères lacustres. Les croûtes de sel sont très semblables à la croûte superficielle. Elles sont poreuses, très perméables et renferment une saumure intracrustale. Les sédiments lacustres intercalaires sont également poreux (50 % en moyenne) mais très imperméables. L'ensemble du profil est donc saturé de saumure. La friabilité et la porosité élevée des croûtes de sel suggère qu'elles n'ont pas été substantiellement recristallisées (CASAS et LOEWENSTEIN, 1989).

Nous avons reporté sur la figure 33 la concentration en lithium des saumures interstitielles de l'ensemble du profil. Le potassium, le magnésium et le bore présentent des distributions similaires. La concentration de ces éléments n'augmente pas avec la profondeur. Chaque croûte renferme une saumure dont les teneurs en Li, K, Mg, B sont du même ordre de grandeur que celles de la croûte superficielle. Il semble bien que chaque ancien lac avait des teneurs également très faibles en Li, K, Mg, B. Si 90 % de ces éléments ont disparu de la saumure superficielle, on ne les retrouve apparemment pas en profondeur, au moins jusqu'à 121 m.

On peut envisager la possibilité d'une incorporation de ces éléments dans des phases argileuses néoformées au sein des sédiments lacustres (BADAUT et RISACHER, 1983). Cependant les bilans montrent que les quantités de Li, K, Mg, B qui ont pu être ainsi consommées par les faibles quantités d'argiles des sédiments sont parfaitement négligeables en regard des masses apparemment perdues.

Fig.33 – Le sondage profond dans le salar d'Uyuni.  
The deep well in central Uyuni. *El sondeo profundo en el salar de Uyuni*

En blanc : les croûtes de sel ; en hachuré : les niveaux lacustres. La croûte de sel superficielle est, *sensu stricto*, le salar d'Uyuni. Les teneurs en lithium sont figurées par des cercles pleins dans les saumures intracrustales et par des croix dans les saumures interstitielles des sédiments lacustres.

*Salt crusts are shown in white and lacustrine levels as stripes. The surficial crust is sensu stricto the salar of Uyuni. Lithium concentrations are figured by solid circles in crustal brines and by crosses in interstitial brines from lacustrine sediments.*

En blanco : las costras de sal ; con rayas : los niveles lacustres. La costra superficial es *sensu stricto* el salar de Uyuni. Las concentraciones de litio son figuradas por círculos llenos para las salmueras asociadas a las costras salinas y por cruces para las salmueras intersticiales de los sedimentos lacustres.

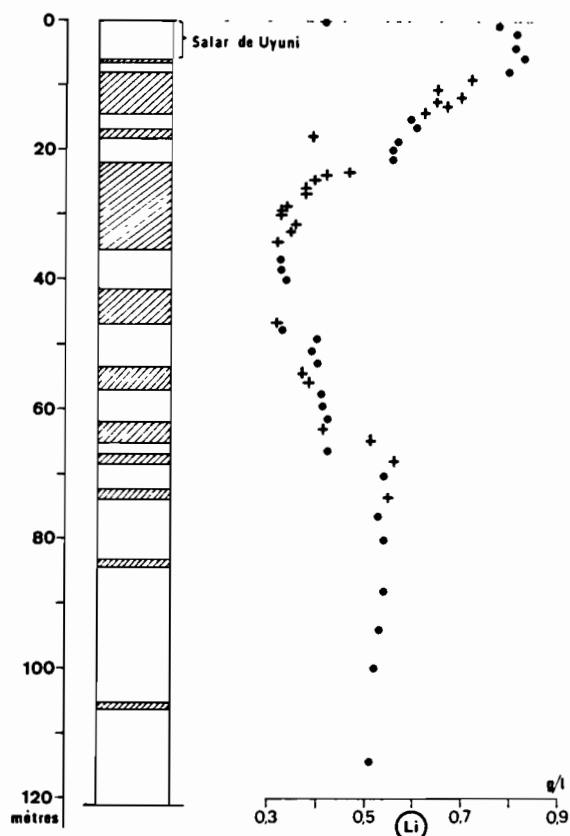
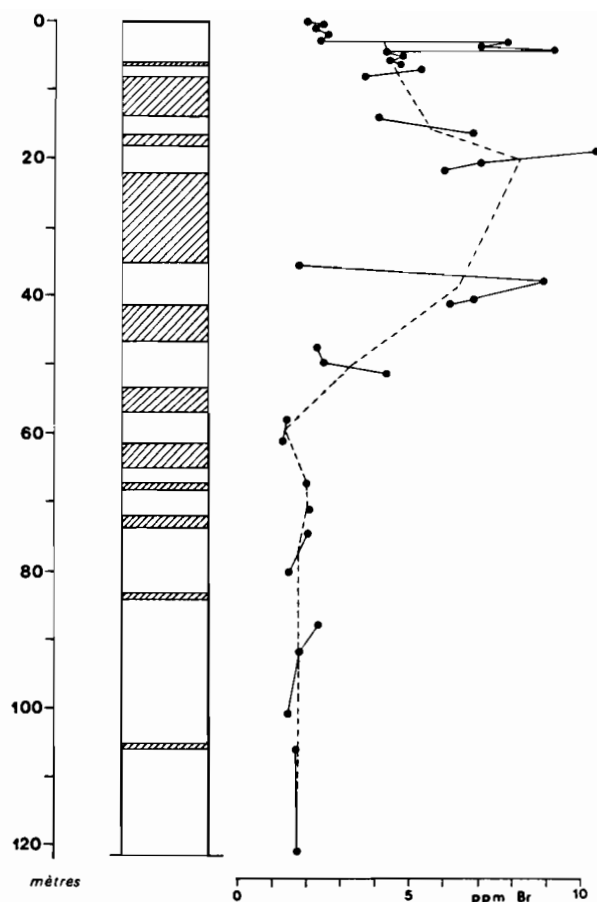


Fig.34 - Teneur en brome de la halite des croûtes de sel du sondage profond. Bromine content of halite crusts in the deep well. El contenido en bromo de las costras de halita en el sondeo profundo

La teneur moyenne est figurée en pointillé. The dashed line shows average contents. El contenido promedio es marcado por una línea punteada.



La figure 34 présente les teneurs en brome de la halite dans le sondage profond. Elles sont comprises entre 1,3 et 10,4 ppm. Comme cela a déjà été souligné pour la croûte superficielle du salar d'Uyuni, des teneurs aussi faibles impliquent que la halite de toutes les croûtes de sel de l'Altiplano central ne peut pas avoir précipité à partir de la simple évaporation des eaux diluées de l'Altiplano.

L'hypothèse d'une perte des constituants dissous dans les saumures par infiltration à travers les sédiments lacustres semble donc peu vraisemblable. *Par contre, l'hypothèse d'un enrichissement en NaCl prend corps. En effet, chaque lac, en s'établissant dans le bassin, devait redissoudre une partie de la croûte de sel déposée par le lac précédent. Le recyclage des croûtes de sel transmettait l'excès de sel d'un lac à l'autre. Il y a manifestement dans l'Altiplano central d'énormes masses de sel qui ne proviennent pas de l'évaporation d'eaux diluées qui auraient drainé les formations géologiques actuelles du bassin. D'où peut donc bien provenir tout ce sel? La clé du problème de l'origine du sel se trouve vraisemblablement dans les diapirs de gypse de l'Altiplano.*

## 2. Origine possible du sel : les diapirs de gypse de l'Altiplano

Dans un diapir de gypse d'âge tertiaire, le diapir de Tarcamaya (fig. 2), émergent des sources de saumures de concentration variable, certaines saturées en halite (300 g/l). Le sel qui n'affleure nulle part est lessivé dans le coeur du diapir par des eaux très diluées (Pl. II, 8). Une composition typique de l'une de ces sources est donnée dans le tableau 6. On constate immédiatement une forte similitude entre la composition de cette source et celle du paléolac Tauca obtenue par dissolution des croûtes de sel. Les deux solutions sont extrêmement pauvres en Li, K, Mg, B. Les points représentatifs de quelques sources du diapir de Tarcamaya

ont été également reportées sur les diagrammes de la figure 30. La composition de ces sources salées présente la même anomalie que celle du paléolac Tauca obtenue par dissolution des croûtes de sel.

Aujourd'hui seul subsiste un peu de halite dans le salar de Tarcamaya. Les nombreux autres diapirs de l'Altiplano ne contiennent apparemment que du gypse (Pl. II, 7). Mais il est très possible qu'au début de l'histoire lacustre du bassin, à la fin du Tertiaire ou au début du Pléistocène, de grandes quantités de halite se trouvaient associées au gypse dans ces diapirs. Leur lessivage a pu enrichir en chlorure de sodium les paléolacs de l'Altiplano. Signalons l'existence d'énormes masses d'évaporites dans les Andes Centrales du Chili (DINGMAN, 1962) et d'Argentine (ALONSO *et al.*, 1991). D'épaisses couches de halite ont ainsi pu se déposer dans le fond de la dépression centrale de l'Altiplano. Le sondage profond révèle effectivement l'existence d'épais niveaux de sel, notamment à la base du profil. Là aussi, la géochimie du brome s'est révélée un bon outil pour l'étude de cette séquence évaporitique de 12 croûtes de sel.

### 3. Les croûtes profondes

Les épaisses croûtes de sel à la base du profil présentent des teneurs en brome à peu près constantes, entre 1,5 et 2,3 ppm. Plusieurs mécanismes peuvent rendre compte de la constance des teneurs en brome dans d'épaisses couches de sel primaire. En milieu marin, la précipitation de sel dans une lagune avec apport continu d'eau de mer, et le reflux des saumures concentrées vers l'océan, établissent un régime stationnaire qui maintient constante la concentration du brome dans les solutions qui déposent le sel. Ceci ne concerne pas les bassins de l'Altiplano.

Un autre mécanisme, plus subtil, consiste à envisager un apport continu de solution dans un lac saturé en halite, mais sans départ des saumures concentrées. Si la quantité de brome incluse dans la halite qui précipite est égale à celle qui arrive régulièrement dans le bassin, alors la concentration en brome dans la solution sera constante, et donc aussi sa teneur dans le sel (TUCKER et CANN, 1986). Cependant, ce mécanisme est basé sur un équilibre entrée/sortie très instable. Il peut difficilement rendre compte de la répartition uniforme du brome sur de fortes épaisseurs de sel. Par contre, le sel qui se dépose dans un lac de type playa peut présenter des teneurs en brome assez constantes sur de fortes épaisseurs.

D'autres observations sont nécessaires pour trancher entre ces divers mécanismes. On peut tout d'abord noter la très faible épaisseur des deux niveaux de sédiments fins à la base du profil. Si les épaisses croûtes de sel associées s'étaient déposées à partir d'un lac salé, celui-ci aurait dû avoir un très grand volume. Or il y a une certaine proportionnalité entre le volume d'un lac profond et sa durée d'existence (LANGBEIN, 1961). Les sédiments déposés par un tel lac seraient vraisemblablement plus épais que les minces niveaux observés à la base du profil. Rappelons aussi que ces niveaux ne présentent pas de caractéristiques lacustres.

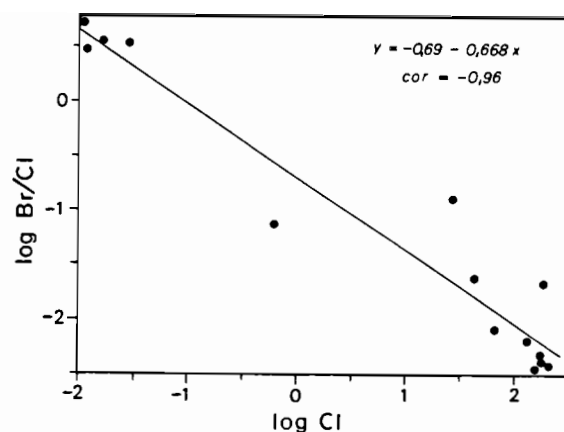
D'autre part on a mesuré de fortes teneurs en particules détritiques dans les épaisses croûtes de sel à la base du profil : de 3 à 11 % (tabl. 8). En comparaison, la croûte superficielle (le salar d'Uyuni *sensu stricto*)

Tableau 8 – *Composition minéralogique des croûtes de sel profondes (en % du total).* Mineralogical composition of the deep salt crusts (in % of total). *Composicion mineralogica de las costras profundas (en % del total)*

| COTE<br>(cm) | HALITE | DETRITIQUES |           | GYPSE<br>YESO |
|--------------|--------|-------------|-----------|---------------|
|              |        | TOTAL       | MAGNETITE |               |
| 7670         | 81     | 11          | 0,6       | (8)           |
| 8430         | 60     | 13          | 0,4       | (27)          |
| 9184         | 81     | 4           | 0,04      | (15)          |
| 10128        | 75     | 5           | 0,3       | (20)          |
| 11880        | 85     | 3           | 0,15      | (12)          |

Les teneurs en gypse ont été obtenues par différence. *Gypsum contents were obtained by difference.* Los contenidos de yeso fueron obtenidos por diferencias.

Fig.35 – Rapport Br/Cl en fonction de Cl des eaux et saumures des sources du diapir de Tarcamaya (Cl en g/l et Br en mg/l). Br/Cl ratio versus Cl of waters and brines from the Tarcamaya diapir (Cl in g/l and Br in mg/l). Br/Cl en función de Cl de las aguas y salmueras del diapir de Tarcamaya (Cl en g/l y Br en mg/l)



n'en contient que 1 % en moyenne. Le point surprenant est la présence de magnétite dans cette fraction détritique : entre 400 et 6000 ppm dans le sel. Halite et magnétite sont des minéraux rarement associés. Leurs milieux de dépôt sont très différents. La halite précipite en général dans des solutions évaporantes calmes, peu – ou pas – alimentées. La magnétite, par contre, ne peut être mobilisée que dans des environnements de haute énergie. Vu sa densité élevée, il faut des apports violents pour l'entraîner jusqu'au fond des bassins.

Un lac de type playa est le milieu de dépôt qui rend le mieux compte à la fois de la répartition du brome dans le sel et de l'abondance des détritiques, y compris de la magnétite. On est amené à envisager des apports périodiques et violents de solutions salées entraînant beaucoup de matières en suspension dans le fond du bassin. Le sel dissous dans ces eaux d'apport provient très certainement du lessivage des nombreux diapirs d'âge tertiaire et crétacé de l'Altiplano. Nous avons déjà vu qu'il subsistait encore de la halite au coeur de l'un de ces diapirs, à Tarcamaya. Il n'a pas pu être échantillonné directement. On ne dispose que des solutions de sources de salinité variable, depuis des eaux douces jusqu'à des saumures saturées en halite. La figure 35 présente le rapport Br/Cl des eaux diluées et des saumures des sources en fonction de leur concentration en chlore. On constate que le rapport Br/Cl décroît lorsque la salinité des eaux augmente. Cela traduit la dissolution de halite de très faible teneur en brome dans des eaux diluées de rapport Br/Cl élevé. Plus on dissout de sel pauvre en brome et plus le rapport Br/Cl de la solution résultante diminue. Une aussi faible teneur en brome dans la halite de Tarcamaya est parfaitement cohérente avec l'hypothèse d'un apport massif de sel par lessivage des anciennes formations évaporitiques.

Les teneurs en brome du sel reprécipité dans les épaisses croûtes de la base du profil (1,5–2,3 ppm) sont voisines de celles de la halite du diapir de Tarcamaya (2 ppm). Si l'on évapore les saumures les plus concentrées ( $\text{Br/Cl} = 0,004$ ) qui sortent du diapir, les premiers cristaux de halite qui précipiteront auront une teneur en brome de 0,1 ppm. Par contre, la halite produite après évaporation des eaux de sources les plus diluées du diapir ( $\text{Br/Cl} = 3,8$ ) aura une teneur en brome, en début de précipitation, de l'ordre de 80 ppm.

Pour reprécipiter de la halite avec une teneur en brome de l'ordre de 2 ppm, il faut donc partir d'une solution intermédiaire entre ces deux pôles. Mais ces valeurs voisines de 2 ppm sont des moyennes. Elles ne correspondent pas à la teneur en brome de la halite au tout début de la précipitation, seule valeur qui nous intéresse ici. On a calculé plusieurs profils théoriques de distribution du brome dans des couches de halite provenant de l'assèchement direct d'une saumure chlorurée sodique. On a constaté que la teneur moyenne en brome d'une telle couche de halite était en général double de la teneur initiale en brome au tout début de la précipitation. On peut donc raisonnablement envisager une teneur initiale en brome de l'ordre de 1 ppm dans la halite des croûtes profondes.

La solution intermédiaire pouvant reprécipiter de la halite avec 1 ppm de brome devrait avoir un rapport Br/Cl de l'ordre de 0,045 (la formule (14) donne la valeur de  $[\text{Br}]_{\text{aq}}$  et l'on prend  $[\text{Cl}]_{\text{aq}} = 190 \text{ g/l}$ ). On peut en déduire, grâce à la figure 35, la concentration en chlore de la solution intermédiaire, soit environ 10 g/l, ce qui correspond à une concentration en NaCl de 16 g/l. Les paléosalinités ainsi estimées ne doivent être considérées, au mieux, que comme des ordres de grandeur. Elles ne reposent que sur le seul diapir de

Tarcamaya d'âge tertiaire. Or il y en a bien d'autres sur l'Altiplano. On peut raisonnablement supposer que la halite des autres diapirs du Tertiaire ne devait pas être très différente. Par contre nous ne pouvons rien dire des anciennes formations évaporitiques crétacées, sauf qu'elles contenaient peut-être moins de sel, celui-ci ayant eu davantage de temps pour être lessivé bien avant l'individualisation du bassin de l'Altiplano. Mais, quoi qu'il en soit, le lac de type playa qui occupait alors la dépression centrale de l'Altiplano était alimenté par des solutions salées, très enrichies en chlorure de sodium. La composition de ces anciens apports n'avait rien à voir avec celle des eaux diluées actuelles de l'Altiplano.

Il est possible d'estimer l'ordre de grandeur des apports annuels en eau dans le bassin. Nous avons vu que le volume des apports dans un lac permanent en climat aride est donné par la formule (3) :

$$V_{ap} = S(E - P)$$

Cette formule ne s'applique pas à un lac de type playa. Mais elle permet d'estimer la limite supérieure des apports dans ce type de lac. L'Altiplano central ayant la forme d'un ellipsoïde aplati, on peut prendre pour S une surface de 8000 km<sup>2</sup>, légèrement inférieure à celle du salar actuel. La valeur actuelle de E - P au niveau du salar d'Uyuni est estimée à 700 mm/an pour une saumure chlorurée sodique. Prenons une paléovaleur légèrement inférieure de 500 mm/an, ce qui traduit une augmentation des précipitations. On obtient ainsi un volume annuel des apports de 4 × 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>. Théoriquement un tel volume est juste suffisant pour maintenir un lac permanent ayant exactement la même surface que la playa. Cela signifie qu'un volume légèrement inférieur produit un lac de type playa. Ce volume ne devait pas être de beaucoup inférieur à la limite d'existence d'un lac permanent. L'abondance des détritiques suggère des apports non seulement violents, mais également assez élevés. D'autre part, les minces niveaux de sédiments à la base du profil correspondent probablement à un accroissement temporaire de ces apports violents, lesquels ont entraîné l'établissement de brefs plans d'eau permanents, sursalés et peu profonds.

En multipliant le volume des apports et leur paléosalinité, on obtient un ordre de grandeur de la masse de sel qui se déposait chaque année dans le fond du bassin, soit 7 × 10<sup>7</sup> tonnes. Cela correspond à une couche de sel d'environ 6 mm/an. *On en déduit que les 45 m de sel profond se sont déposés en 7500 ans, ou sans doute un peu plus, puisque cette valeur est basée sur un volume limite supérieur des apports. Quoi qu'il en soit, ce qu'il faut retenir de ce calcul très approximatif, c'est que les épaisses croûtes de sel à la base du profil se sont probablement déposées en un temps très court à l'échelle géologique.* Des vitesses aussi élevées de dépôts d'évaporites ne sont pas inhabituelles (BORCHERT et MUIR, 1964 ; EUGSTER, 1970 ; DEAN et ANDERSON, 1978 ; SMITH, 1979 ; BUSSON, 1980).

#### 4. Les croûtes intermédiaires et supérieures

Les niveaux de sédiments fins associés aux croûtes intermédiaires et supérieures présentent de très nettes caractéristiques lacustres : litage, et, surtout, présence souvent abondante de coprolites d'*Artemia*. L'épaisseur de ces niveaux lacustres augmente d'abord assez régulièrement du bas vers le haut du profil, puis diminue pour les trois derniers. La teneur moyenne en brome des croûtes associées à ces niveaux lacustres suit la même tendance. La teneur maximale en brome s'observe dans la croûte associée au niveau le plus épais. Si l'on admet que la durée d'existence des paléolacs est fonction de l'épaisseur des niveaux lacustres, on en déduit une relation directe entre la durée d'existence des paléolacs et le rapport Br/Cl de leurs eaux. En effet, plus ce rapport est élevé, et plus forte est la teneur en brome de la halite qui précipite lors de l'assèchement du paléolac.

L'augmentation du rapport Br/Cl dans les eaux des paléolacs intermédiaires au cours du temps est très certainement liée à l'accroissement des apports en eaux diluées de l'Altiplano de rapport Br/Cl élevé, ainsi qu'à l'épuisement progressif de la halite des diapirs de très faible teneur en brome. Plus la durée d'existence des lacs augmentait, et plus il y entrait d'eaux diluées. En théorie un tel mécanisme devrait entraîner une augmentation régulière du rapport Br/Cl des eaux des lacs jusqu'à atteindre une valeur correspondant à la moyenne des eaux diluées de l'Altiplano. La teneur en brome de la halite qui en dériverait atteindrait alors des valeurs théoriques de plusieurs dizaines de ppm. En réalité, l'augmentation du rapport Br/Cl des eaux des paléolacs est limitée par la redissolution d'une partie de la croûte de halite, très pauvre en brome,

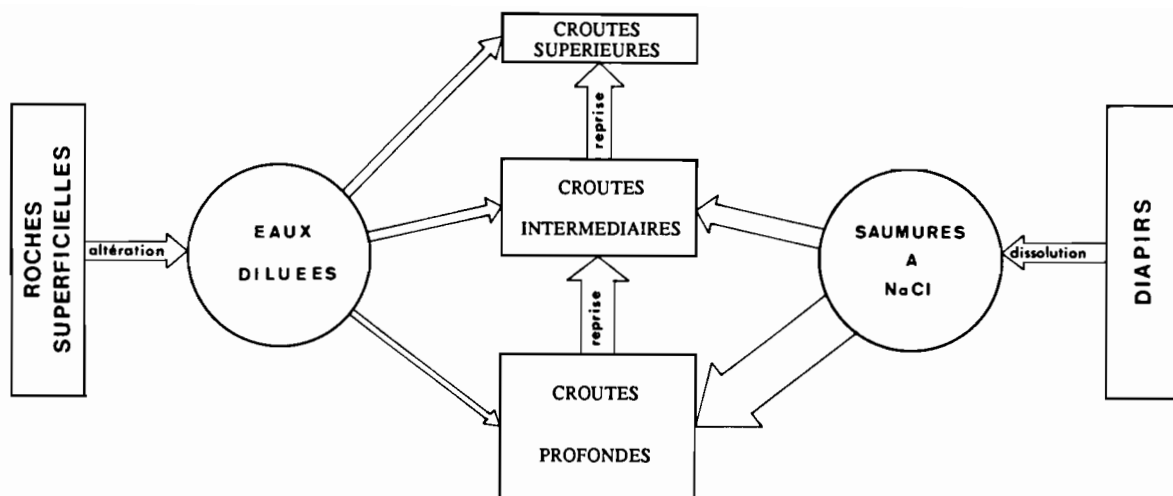


Fig.36 – L'origine du sel dans les croûtes de la dépression centrale de l'Altiplano. Origin of the salt stored in the crusts of the central Altiplano. Origen de la sal acumulada en las costras de la depresión central del Altiplano

L'épaisseur des flèches indique approximativement l'importance du transfert du sel. Arrow thickness approximately shows the magnitude of salt transfer. El espesor de las flechas sugiere aproximadamente la importancia de las transferencias de sal.

déposée par le lac précédent. Le fort excès initial de halite dans les anciens dépôts de type playa a été ainsi transmis de lac en lac jusqu'à la dernière croûte de sel, déposée par le lac Taucá : le salar d'Uyuni. La halite des trois dernières croûtes présente une diminution des teneurs en brome. Cela peut être lié à la réduction des apports en eaux diluées suggéré par l'amincissement des trois niveaux lacustres supérieurs. L'essentiel de la halite dissoute dans les eaux de ces paléolacs provient de la redissolution de la croûte sous-jacente. La figure 36 résume la discussion sur l'origine du sel de l'ensemble du profil.

## CONCLUSIONS SUR LES ÉVAPORITES DE L'ALTIPLANO CENTRAL

La séquence évaporitique étudiée n'est malheureusement pas complète. Le sondage s'est arrêté dans une croûte de sel. Qu'y a-t-il en dessous ? D'autre part on ne dispose que d'un seul profil pour tout le bassin. Enfin, aucune étude pétrographique du sel n'a pu être entreprise, car celui-ci était le plus souvent désagrégré dans le carottier. Malgré ces limitations, il est possible de tenter une reconstitution vraisemblable de l'histoire lacustre de l'Altiplano.

Les épais niveaux de sel à la base du profil ont vraisemblablement été déposés par des eaux très salées dans un lac de type playa. Le bassin s'inondait et s'asséchait chaque année en déposant une mince couche de sel riche en particules détritiques et d'une teneur à peu près constante. Il n'y avait pas de lac permanent. La quasi-totalité du sel provient du lessivage des diapirs d'âge tertiaire et peut-être crétacé du bassin de drainage. Ces épais croûtes ont été déposées en un temps très court à l'échelle géologique : quelques milliers d'années. Le recyclage de formations salifères a été souvent décrit dans d'autres bassins évaporitiques. Mentionnons les travaux de NEEV et EMERY (1967) sur la mer Morte, de BRADBURY (1971) au New Mexico, de KRINSLEY (1972) en Iran, de EATON *et al.* (1972) en Arizona, d'ANTSIFEROV (1978) en Union Soviétique, de LINDSEY *et al.* (1981) en Utah et de MATRAY et FONTES (1990) dans le bassin de Paris.

Par la suite, des lacs salés permanents s'établirent dans l'Altiplano central. Leur durée augmentait d'une phase lacustre à la suivante. L'augmentation des apports d'eaux diluées de rapport Br/Cl élevé, associée à l'épuisement de la halite des diapirs de très faible teneur en brome, a eu pour conséquence d'augmenter à la fois l'épaisseur des niveaux lacustres et la teneur en brome des croûtes de sel déposées lors de l'assèchement

des anciens lacs. Cela explique la corrélation entre l'épaisseur des niveaux lacustres et la teneur en brome des croûtes de sel associées. Le sel de ces niveaux intermédiaires a une triple origine : les diapirs, la redissolution de la croûte précédente et les eaux diluées de l'Altiplano.

Les croûtes supérieures présentent à la fois une réduction de leur teneur en brome et une diminution de l'épaisseur des niveaux lacustres associés. Cela indique une réduction des apports en eau. La halite provient essentiellement de la redissolution de la croûte de sel précédente.

La croûte de sel du salar d'Uyuni déposée par le dernier lac (Tauca), il y a 10 000 ans, montre une surprenante distribution inverse des teneurs en brome. Lorsque le lac s'est asséché, la croûte de sel était primitivement répartie sur une surface bien plus grande, moulant la topographie, jusqu'à une cote correspondant au début de la précipitation de la halite dans le lac, à 17 m au-dessus de la surface actuelle du salar. Rapidement les pluies ont redistribué le sel des bordures vers le centre du bassin jusqu'à ne laisser qu'une surface de sel parfaitement plate. Par la suite, une phase très aride a affecté l'Altiplano pendant l'Holocène. Le niveau de la saumure intracrustale, aujourd'hui à une quinzaine de centimètres sous la surface de la croûte, s'est considérablement abaissé, ne laissant qu'une lame de saumure résiduelle très concentrée à la base de la croûte. De la halite secondaire, beaucoup plus riche en brome, a précipité dans la partie inférieure de la croûte.

Tous les paléolacs avaient une composition chimique très particulière, que l'on ne retrouve dans aucun des très nombreux lacs actuels de l'Altiplano. C'étaient des solutions presque pures de chlorure de sodium. Les solutés Li, K, Mg, B s'y trouvaient à l'état de traces. Seuls Ca et SO<sub>4</sub> devaient avoir des concentrations relativement importantes, puisque ces lacs étaient apparemment saturés en gypse.

L'origine du calcium et du sulfate se trouve bien évidemment dans les nombreux diapirs de gypse de l'Altiplano. L'origine des éléments économiquement intéressants (Li, K, Mg, B) est plus difficile à préciser. Elle est probablement mixte. En effet, les concentrations de ces éléments dans les sources salées du diapir de Tarcamaya sont du même ordre de grandeur que leurs concentrations théoriques dans les eaux du paléolac Tauca. Une grande partie de ces constituants pourraient donc être liés aux formations salifères d'âge tertiaire. Mais le gisement au SE du salar provient manifestement des apports récents (Holocène) par le Rio Grande. Là, c'est l'altération des roches volcaniques de l'Altiplano méridional (Lipez) qui est à l'origine du Li, K, Mg, B (RISACHER, 1984 ; RISACHER et FRITZ, 1991b). D'autre part, toutes les eaux diluées de l'Altiplano contiennent également des teneurs notables en ces éléments qui proviennent de l'altération des roches sédimentaires, volcano-sédimentaires et volcaniques de tout l'Altiplano.

Le profil stratigraphique du sondage profond montre que l'épaisseur des sédiments lacustres, et donc la durée d'existence des paléolacs, augmentait d'une phase lacustre à la suivante (sauf pour les trois derniers). Il entraînait de plus en plus d'eau dans l'Altiplano central au cours du Quaternaire, ce qui devait avoir pour conséquence d'élever progressivement le niveau des lacs successifs. On peut se demander si cela correspond à une augmentation des précipitations dans l'Altiplano central, d'une phase lacustre à la suivante. Cette tendance est opposée à celle détectée dans l'Altiplano nord où le niveau des paléolacs s'abaissait progressivement au cours du temps (LAVENU *et al.*, 1984 ; voir ci-dessus : "Paléolimnologie de l'Altiplano"). Au début de l'histoire lacustre de l'Altiplano, un seuil élevé séparait le bassin du Titicaca, au Nord, du bassin central (fig. 9). Peu d'eau pénétrait dans l'Altiplano central depuis le Nord. C'est l'époque des lacs de type playa à la base du profil révélé par le sondage profond. Puis l'érosion entaillant le seuil, de plus en plus d'eau pénétrait dans le bassin central où s'établirent des lacs permanents. Les niveaux des lacs de l'Altiplano nord, définis par le seuil, s'abaissaient progressivement, alors que s'élevaient les niveaux des lacs de l'Altiplano central. Ce n'est donc pas une évolution climatique d'une phase lacustre à la suivante qui serait responsable de l'augmentation des masses d'eau dans l'Altiplano central, mais un processus géomorphologique : l'érosion active du seuil de déversement des lacs de l'Altiplano nord.

Terminons par quelques spéculations sur la halite des diapirs. Les proportions relatives de chaque constituant dans les sources salées du diapir de Tarcamaya et dans le paléolac Tauca, qui a déposé le salar d'Uyuni, sont très voisines. Le sel et les saumures du diapir d'âge tertiaire de Tarcamaya font irrésistiblement penser à un ancien salar. Ce sel présente une autre caractéristique remarquable. Il est extraordinairement pauvre en brome. Sa teneur est d'environ 2 ppm. Seuls trois ou quatre dépôts de halite présentant des teneurs aussi faibles sont connus dans le monde (EATON *et al.*, 1972 ; HOLSER *et al.*, 1972 ; HOLDOWAY, 1978). Le sel

marin a des teneurs en brome comprises entre 70 et 200 ppm. Le sel d'âge tertiaire de Tarcamaya n'est donc pas d'origine marine. Cela n'est pas un fait nouveau, puisqu'il est bien connu que le Tertiaire de l'Altiplano est constitué de sédiments continentaux. Mais cela pose un problème génétique. L'excès de halite dans le salar d'Uyuni a été expliqué en repoussant le problème dans le temps, de croûtes en croûtes, jusqu'à celles de type playa à la base du profil. Or ces croûtes elles-mêmes doivent leur excès de halite au lessivage de ce qui paraît bien être des salars d'âge tertiaire, dont il ne reste plus aujourd'hui qu'une relique dans le diapir de gypse de Tarcamaya. Là aussi on ne fait que repousser dans le temps le problème de l'excès de halite. La lithologie des bassins versants des salars du Tertiaire était-elle tellement différente de celle de l'Altiplano actuel? La tentation est forte de repousser encore le problème dans le temps. On connaît des évaporites au Crétacé, peut-être au Permo-Trias et même au Cambrien (AHLFELD, 1972). Peut-être y-a-il eu là aussi recyclage des sels, mais à une échelle de temps beaucoup plus grande. La très faible teneur en brome de la halite de Tarcamaya suggère très fortement que ce sel d'âge tertiaire a été recyclé. En effet, aucune eau drainant les formations de l'Altiplano actuel – sauf les évaporites – ne peut précipiter, après évaporation, de la halite avec une aussi basse teneur en brome. La réponse au problème de l'origine du sel dans les anciens bassins évaporitiques de cette région des Andes ne pourra venir que de l'étude conjointe de la géodynamique de ces bassins et de la géochimie des anciennes formations salifères.

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Nous venons d'étudier les deux principaux groupes de salars de l'Altiplano :

- les petits salars du Lipez,
- les salars géants de l'Altiplano central.

Ces deux groupes présentent à la fois des similitudes et certaines différences. L'origine d'une grande partie des sels à partir du recyclage d'anciennes formations évaporitiques est un point commun à presque tous les salars de l'Altiplano. La mise en évidence de ce processus n'est pas évidente. A l'exception remarquable, et très locale, des sources de saumures du diapir de Tarcamaya, il ne subsiste plus nulle part dans les bassins versants la moindre trace de sels plus solubles que le gypse. Dans l'Altiplano central ils ont tous été lessivés, et dans le Lipez ils ont été enfouis sous les formations volcaniques. Signalons qu'au Chili il subsiste d'importantes masses de halite dans le bassin versant du grand salar d'Atacama. Cela est bien évidemment dû à l'extrême aridité qui règne depuis fort longtemps dans cette région.

La principale méthode d'étude utilisée pour déchiffrer l'histoire géochimique de ces milieux a consisté à simuler l'évaporation des eaux diluées qui alimentent aujourd'hui les salars. Cette évolution théorique des eaux est celle que l'on obtient lorsque la solution se concentre sans aucune interaction avec l'environnement géologique, comme dans un bac évaporatoire. Toute divergence entre l'évolution réelle et l'évolution calculée des solutions traduit un phénomène géochimique non prévu par le modèle, et souvent difficile à détecter directement. Cette différence doit être examinée de près. Elle est souvent le point de départ de fructueux développements.

*La divergence peut être qualitative.* C'est le cas des salars du Lipez. Les saumures reconstituées par le calcul sont fréquemment de faciès carbonaté sodique, en opposition fondamentale avec les saumures réelles, qui sont, elles, chlorurées ou chloro-sulfatées sodiques. Le processus géochimique responsable de cette différence est l'oxydation du soufre natif érodé par le vent depuis les volcans et déposé sur les formations superficielles des bassins. Cette oxydation produit de l'acide sulfurique qui neutralise une grande partie des espèces carbonatées des eaux diluées.

*La divergence peut aussi être quantitative.* C'est le cas du salar d'Uyuni. On a pu reconstituer la composition chimique du paléolac qui a déposé la croûte de sel. On a redissous la totalité des masses des constituants des sels et des saumures du salar dans le volume d'eau de l'ancien lac. L'évaporation simulée des eaux d'apport actuelles conduit à des solutions neutres chlorurées sodiques, un faciès chimique qualitativement analogue à celui de la saumure du paléolac. Mais les proportions des constituants sont totalement différentes. Les

saumures du paléolac contenaient beaucoup plus de chlorure de sodium et beaucoup moins de Li, K, Mg, B que les saumures théoriques calculées à partir des eaux diluées actuelles. Cela a permis de mettre en évidence un apport massif de chlorure de sodium dans le bassin central de l'Altiplano par lessivage d'anciennes formations salifères.

Les salars de l'Altiplano central et ceux du Lipez présentent cependant quelques différences. Si dans les deux groupes une grande partie des sels provient du lessivage d'évaporites anciennes, ce mécanisme n'est plus actif pour le salar d'Uyuni, alors qu'il se poursuit aujourd'hui dans les salars du Lipez. Le salar d'Uyuni peut être considéré comme un salar "inactif" (sauf à l'embouchure du Rio Grande). Il s'est formé il y a 10 000 ans par assèchement d'un immense lac salé. Les quantités de sel qui se déposent actuellement dans le bassin sont négligeables en regard des masses présentes dans la croûte. Par contre, les salars du Lipez sont encore bien "actifs". Les sels s'y déposent actuellement et leurs mécanismes de dépôt peuvent être observés en détail. Cela n'est pas le cas au Chili et en Argentine où l'on rencontre de nombreux salars fossiles sans aucun apport actuel, ce qui rend leur étude beaucoup plus délicate. C'est là un des intérêts majeurs des salars de Bolivie. Ils peuvent servir de modèles pour l'interprétation de milieux analogues plus anciens.

REMERCIEMENTS – L'auteur remercie les principaux organismes et leurs responsables qui ont permis de développer ce programme : l'Université Majeure de San Andrés à La Paz (MM. L.A. Rodrigo et O. Ballivian), le Ministère des Mines de Bolivie (M. M. Arduz), l'ORSTOM (MM. M. Servant, J.M. Wackermann, G. Laubacher, R. Marocco) et le Centre de Géochimie de la Surface (MM. G. Millot, J. Lucas, B. Fritz). Je suis également reconnaissant à MM. J.C. Fontes, G. Pedro et A. Lerman pour leur soutien et leurs critiques. Je remercie vivement M. M. Meybeck qui a eu la charge de la révision finale du texte et l'a considérablement amélioré par ses observations. Enfin, j'exprime à tous les personnels des sections techniques du CGS et des services généraux de l'Institut de Géologie ma plus profonde gratitude pour leur appui, jamais mesuré.

## BIBLIOGRAPHIE

- AHLFELD F. (1972) – Geología de Bolivia. Los Amigos del Libro, La Paz, Bolivia, 190 p.
- ALDERMAN S.S. (1985) – Geology of the Owens Lake evaporite deposit. In Schreiber B.C. & Harner H.L. (eds.), Int. Symp. on Salt, 6th, The Salt Institute, vol. 1, p. 75–83.
- AL-DROUBI A., FRITZ B., GAC J.Y. & TARDY Y. (1980) – Generalized residual alkalinity concept. Application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. *Amer. J. Sci.*, 280, p. 560–572.
- ALONSO R.N., JORDAN T.E., TABBUTT K.T. & VANDERVOORT D.S. (1991) – Giant evaporite belts of the Neogene central Andes. *Geology*, 19, p. 401–404.
- ALPERS C.N. & WHITEMORE D.O. (1990) – Hydrogeochemistry and stable isotopes of ground and surface waters from two adjacent closed basins, Atacama Desert, northern Chile. *Appl. Geochem.*, 5, p. 719–734.
- ANTSIFEROV A.S. (1979) – Genesis of Jurassic basins in the Sayan region. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 244, (2) p. 421–424. English translation in *Dokl., Amer. Geol. Inst.*, 244, p. 76–78.
- BADAUT D., RISACHER F., PAQUET H., EBERHART J.P. & WEBER F. (1979) – Néof ormation de minéraux argileux à partir de frustules de diatomées : le cas des lacs de l'Altiplano bolivien. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 289, (D), p. 1191–1193.
- BADAUT D. & RISACHER F. (1983) – Authigenic smectite on diatom frustules in Bolivian saline lakes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, p. 363–375.
- BALLIVIAN O. & RISACHER F. (1981) – Los salares del Altiplano boliviano. Métodos de estudio y estimación económica. ORSTOM, Paris, 246 p.
- BOEKE H.E. (1908) – Über das Kristallisationschema der Chloride, Bromide, Jodide, von Natrium, Kalium und Magnesium, sowie über das Vorkommen des Broms und das Fehlen von Jod in den Kalisalzlagern. *Z. für Kristallographie*, 45, p. 346–391.
- BONYTHON C.W. (1955) – Lake Eyre, South Australia : The great flooding of 1949–50. Cited in LANGBEIN (1961) : Salinity and hydrology of closed lakes, *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 412, 20 p.

- BORCHERT H. & MUIR R.O. (1964) – Salt deposits. Their origin, metamorphism and deformation of evaporites. Van Nostrand, 338 p.
- BOULANGÉ B. & AQUIZE JAEN E. (1981) – Morphologie, hydrographie et climatologie du lac Titicaca et de son bassin versant. *Rev. Hydrobiol. trop.*, (14), 4, p. 269–287.
- BRADBURY J.P. (1971) – Limnology of Zuni Salt Lake, New Mexico. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 82, p. 379–398.
- BRADLEY W.H. & EUGSTER H.P. (1969) – Geochemistry and paleolimnology of the trona deposits and associated authigenic minerals of the Green River Formation of Wyoming. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 496-B, 71 p.
- BRAITSCH O. (1971) – Salt deposits. Their origin and composition. Springer-Verlag, 297 p.
- BRAITSCH O. & HERMANN A.G. (1963) – Zur Geochemie des Broms in salinaren Sedimenten. Teil I : Experimentelle Bestimmung der Br-Verteilung in verschiedenen natürlichen Salzsystem. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 27, p. 361–391.
- BUSSON G. (1980) – Les grandes cuvettes évaporitiques en milieu détritique : comment elles se creusent, comment elles se remplissent. *Bull. Centre Rech. Explor. Prod. Elf-Aquitaine*, 4, (1), p. 557–588.
- CARMOUZE J.P. & AQUIZE JAEN E. (1981) – La régulation hydrique du lac Titicaca et l'hydrologie de ses tributaires. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14, (4), p. 311–328.
- CARMOUZE J.P. & PEDRO G. (1977) – The contribution to the salt regulation of a lacustrine system by geographical and sedimentological factors. *Proc. Second Symp. on Water-Rock Interaction*, Strasbourg, (H. Paquet & Y. Tardy, eds), 1977, vol. 2, p. 73–84.
- CARMOUZE J.P. & PEDRO G. (1981) – Principes de la régulation hydrochimique d'un système lacustre (une approche par bilans de matières). *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14, (3), p. 171–190.
- CARMOUZE J.P., ARZE C. & QUINTANILLA J. (1978) – Circulación de materia (agua-sales disueltas) a través del sistema fluvio-lacustre del Altiplano : la regulación hídrica e hidrodinámica de los lagos Titicaca y Poopo. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, 10, (1), p. 49–68.
- CARMOUZE J.P., ARZE C. & QUINTANILLA J. (1981) – Régulation hydrochimique du lac Titicaca et l'hydrochimie de ses tributaires. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14, (4), p. 329–348.
- CASAS E. & LOWENSTEIN T.K. (1989) – Diagenesis of saline pan halite : Comparison of petrographic features of modern, Quaternary and Permian halites. *J. Sedim. Petrol.*, 59, (5), p. 724–739.
- CHEVERRY C. (1974) – Contribution à l'étude pédologique du lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride dans des sédiments argileux et organiques. Thèse Sci., Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- DEAN W.E. & ANDERSON R.Y. (1978) – Salinity cycles : Evidence for subaqueous deposition of Castile Formation and lower part of Salado Formation, Delaware Basin, Texas and New Mexico. New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Circular, 159, p. 15–20.
- DINGMAN R.J. (1962) – Tertiary salt domes near San Pedro de Atacama, Chile. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 450-D, p. 92–94.
- EATON G.P., PETERSON D.L. & SCHUMANN H.H. (1972) – Geophysical, geohydrological and geochemical reconnaissance of the Luke Salt Body, Central Arizona. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 753, 28 p.
- ERICKSEN G.E., VINE J.D. & BALLON R. (1978) – Chemical composition and distribution of lithium-rich brines in salar de Uyuni and nearby salars in Southwestern Bolivia. *Energy*, 3, p. 355–363.
- EUGSTER H.P. (1970) – Chemistry and origin of the brines of Lake Magadi, Kenya. *Mineral. Soc. Amer. Spec. Paper*, 3, p. 213–235.
- EUGSTER H.P. & HARDIE L.A. (1978) – Saline lakes. In "Lakes, Chemistry, Geology, Physics" (A. Lerman, ed.), Springer-Verlag, p. 237–293.
- EUGSTER H.P. & MAGLIONE G. (1979) – Brines and evaporites of the Lake Chad basin, Africa. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, p. 973–981.
- FERNANDEZ A., HORMANN P.K., KUSSMAUL S., MEAVE J., PICHLER H. & SUBIETA T. (1973) – First petrologic data on young volcanic rocks of SW-Bolivia. *Tschermaks Mineral. Petrol. Mitt.*, 19, p. 149–172.
- FERNANDEZ G. (1980) – Evolución cuaternaria de las cuencas lacustres del sud-oeste Boliviano, en la región de Mina Corina. Thèse Univ. La Paz (Bolivie), 139 p.
- FONTES J.CH., ANDREWS J.N., EDMUNDS W.M., GUERRE A. & TRAVI Y. (1991) – Paleorecharge by the Niger River (Mali) deduced from groundwater geochemistry. *Water Resour. Res.*, 27, 2, p. 199–214.

- FRITZ B. (1975) – Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. *Sci. Géol., Mém.*, 41, 152 p.
- GARRELS R.M. & MACKENZIE F.T. (1967) – Origin of the chemical composition of some springs and lakes. In "Equilibrium concepts in natural water systems", *Amer. Chem. Soc.*, p. 222–242.
- GUEDDARI M. (1984) – Géochimie et thermodynamique des évaporites continentales. Etude du lac Natron en Tanzanie et du Chott el Jerid en Tunisie. *Sci. Géol., Mém.*, 76, 143 p.
- HALLEY E. (1715) – On the cause of the saltness of the ocean, and of the several lakes that emit no rivers. *Royal Soc. London Philos. Trans.*, 6, p. 169.
- HAMMER U.T. (1986) – Saline lake ecosystems of the world. *Monographiae Biologicae*, 59, Kluwer Academic Publishers, 614 p.
- HARDIE L.A. & EUGSTER H.P. (1970) – The evolution of closed-basin brines. *Mineral. Soc. Amer. Spec. Paper*, 3, p. 273–290.
- HAWKINS D.B. (1985) – Geochemistry of saline lakes of the northern Yukon flats, east central Alaska. N.T.I.S. Report PB 85 214708, 30 p.
- HOLDOWAY K. (1978) – Deposition of evaporites and red beds of the Nipperwalla Group, Permian, Western Kansas. *Kansas Geol. Surv. Bull.*, 215, 43 p.
- HOLSER W.T. (1966) – Bromide geochemistry of salt rocks. Second Symp. on Salt, Northern Ohio Geol. Soc., 2, p. 248–275.
- HOLSER W.T. (1979) – Trace elements and isotopes in evaporites. *Rev. Mineral.*, 6, p. 295–346.
- HOLSER W.T., WARDLAW N.C. & WATSON D.W. (1972) – Bromide in salt rocks : Extraordinarily low content in the Lower Elk Point salt, Canada. In "Geology of saline deposits" (Richter–Bernburg G., ed.), Proc. Hanover Symposium, UNESCO, Paris, p. 69–75.
- HUTCHINSON G.E. (1957) – A treatise on limnology, vol. 1, Geography, Physics and Chemistry, J. Wiley & Sons, 1015 p.
- I.G.M. (1972) – Carta Nacional, Bolivia 1:50 000, Hoja 6333 III (Estancia Ollería), Instituto Geográfico Militar, La Paz, Bolivia.
- JONES B.F. & VAN DENBURGH A.S. (1966) – Geochemical influences on the chemical character of closed lakes. *Int. Ass. Sci. Hydrol. Publ.*, 7, p. 435–446.
- KEMPE S. & DEGENS E.T. (1985) – An early soda ocean ? *Chem. Geol.*, 53, p. 95–108.
- KRINSLEY D.B. (1972) – Dynamic processes in the morphogenesis of salt crusts within the Great Kavir, north-central Iran. In Gill J.E. (ed.), Proc. Int. Geological Congr., 24th (Montreal), Sect. 12 (Quaternary Geology), p. 167–174.
- LANGBEIN N.B. (1961) – Salinity and hydrology of closed lakes. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 412, 20 p.
- LAUVEN A., FORNARI M. & SEBRIER M. (1984) – Existence de deux nouveaux épisodes lacustres quaternaires dans l'Altiplano péruvo-bolivien. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, 14, (1), p. 103–114.
- LINDSEY D.A., GLANZMAN R.K., NAESER C.W. & NICHOLS D.J. (1981) – Upper Oligocene evaporites in basin fill of Sevier Desert Region, Western Utah. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 65, (2), p. 251–260.
- MAGLIONE G. (1976) – Géochimie des évaporites et silicates néoformés en milieux continental confiné. *Travaux et documents de l'ORSTOM*, 50, 341 p.
- MARIACA J.J. (1985) – Balance hídrica superficial de la cuenca del lago Poopo y de los salares de Uyuni y Coipasa, Bolivia. Thèse Univ. La Paz, ORSTOM-PHICAB, 203 p.
- MARTINEZ C. & TOMASI P. (1978) – Carte structurale des Andes septentrionales de Bolivie à 1/1 000 000. ORSTOM, Paris, carte et notice explicative, 48 p.
- MATRAY J.M. & FONTES J.C. (1990) – Origin of the oil-field brines in the Paris basin. *Geology*, 18, p. 501–504.
- MATSUBAYA O., SAKAI H., TORII T., BURTON H. & KERRY K. (1979) – Antarctic saline lakes – stable isotopic ratios, chemical compositions and evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, p. 7–25.
- MEYBECK M. (1970) – Bilan hydrochimique et géochimique du lac Léman. Thèse Fac. Sci., Paris, 246 p.
- MINISTERIO DE TRANSPORTE (1975) – Anuario 1975, Departamento de Meteorología, Ministerio de Transporte, Comunicaciones y aeronáutica civil, La Paz, Bolivia.
- NEEV D. & EMERY K.O. (1967) – The Dead Sea. Depositional processes and environments of evaporites. *Israel Geol. Surv. Bull.*, 41, 147 p.

- PACES T. (1984) – Mass-balance approach to the understanding of geochemical processes in aqueous systems. In "Hydrochemical balances of freshwater systems". International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Publication n°150, (E. Eriksson, ed.), p. 223–235.
- RAMIREZ J. (1985) – Evaporación en salares altiplánicos desérticos. Proposición de un modelo de medición. II Región, Chile. Universidad de Antofagasta (Chile), Departamento de Ing. en Geomensura, 18 p.
- RETTIG S.L., JONES B.F. & RISACHER F. (1980) – Geochemical evolution of brines in the salar of Uyuni, Bolivia. *Chem. Geol.*, 30, p. 57–79.
- RISACHER F. (1978 a) – Le cadre géochimique des bassins à évaporites des Andes boliviennes. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, X, (1), p. 37–48.
- RISACHER F. (1978 b) – Genèse d'une croûte de sel dans un bassin de l'Altiplano bolivien. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, X, (1), p. 91–100.
- RISACHER F. (1984) – Origine des concentrations extrême en bore et en lithium dans les saumures de l'Altiplano bolivien. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 299, II, p. 701–706.
- RISACHER F. (1992) – Lacs salés et croûtes de sel de Bolivie. *La vie des Sciences, Comptes Rendus, série générale*, 9, (1), p. 39–62.
- RISACHER F. & EUGSTER H.P. (1979) – Holocene pisoliths and encrustations associated with spring-fed surface pools, Pastos Grandes, Bolivia. *Sedimentology*, 26, p. 253–270.
- RISACHER F. & FRITZ B. (1984 a) – Simulation de l'évaporation sur micro-ordinateur. *Sci. Géol., Bull.*, 37, (3), p. 239–251.
- RISACHER F. & FRITZ B. (1984 b) – Estimation des variations en fonction de la température des produits de solubilité des principaux sels des milieux évaporitiques. *Sci. Géol., Bull.*, 37, (3), p. 229–237.
- RISACHER F. & FRITZ B. (1991 a) – Geochemistry of Bolivian salars, Lipez, southern Altiplano : Origin of solutes and brine evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, p. 687–705.
- RISACHER F. & FRITZ B. (1991 b) – Quaternary geochemical evolution of the salars of Uyuni and Coipasa, Central Altiplano, Bolivia. *Chem. Geol.*, 90, p. 211–231.
- RISACHER F. & FRITZ B. (1992) – Mise en évidence d'une phase climatique holocène extrêmement aride dans l'Altiplano central, par la présence de la polyhalite dans le salar de Uyuni (Bolivie). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 314, II, p. 1371–1377.
- RISACHER F., SAMUEL J. & KREMPP G. (1984) – Concentrations extrêmes en molybdène, tungstène et arsenic dans les saumures d'un lac de l'Altiplano bolivien. Indication métallogénique. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 299, II, p. 1325–1328.
- RYKKEN L.E. (1976) – Lithium production from Searles Valley. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 1005, p. 33–34.
- SCHREIBER B.C. & WALKER D. (1992) – Halite pseudomorphs after gypsum : A suggested mechanism. *J. Sedim. Petrol.*, 62, 1, p. 61–70.
- SEARLS J.P. (1983) – Potash. Mineral Commodity Profiles. *Bur. Mines, U.S. Dept. Inter.*, 10 p.
- SERVANT M. & FONTES J.CH. (1978) – Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, 10, (1), p. 9–23.
- SERVANT M. & VILLARROEL R. (1979) – Le problème paléoclimatique des Andes boliviennes et de leurs piedmonts amazoniens au Quaternaire. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 288, (D), p. 665–668.
- SERVANT-VILDARY S. (1978) – Les diatomées des dépôts lacustres quaternaires de l'Altiplano bolivien. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, 10, (1), p. 25–35.
- SMITH G.I. (1979) – Subsurface stratigraphy and geochemistry of late Quaternary evaporites, Searles Lake, California. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 1043, 130 p.
- SPENCER R.J., EUGSTER H.P. & JONES B.F. (1985) – Geochemistry of Great Salt Lake, Utah. II : Pleistocene–Holocene evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, p. 739–747.
- SURDAM R.C. & WOLFBAUER C.A. (1975) – Green River Formation, Wyoming : A playa–lake complex. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 86, p. 335–345.
- SWENSON H.A. & COLBY B.R. (1955) – Chemical quality of surface waters in Devils Lake basin, North Dakota. *U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper*, 1295, 82 p.
- TUCKER R.M. & CANN J.R. (1986) – A model to estimate the depositional brine depth of ancient salt rocks : Implications for ancient subaqueous evaporite depositional environments. *Sedimentology*, 33, p. 401–412.
- U.S.G.S. (1978) – Lithium, nature's lightest metal. *U.S.G.S., Inf.* 75–27, 15 p.

- VACHER J., ATTEIA O., METSELAAR K., BRASIER E., IMANA E., MENDEZ A., CHOQUEVILLCA J., MADONADO R., ELDIN M. & FEDDES R. (1988) – Agroclimatología del Altiplano Boliviano. Informe final, tomo I. ORSTOM en Bolivie, informe n°5, La Paz, Bolivie, 163 p.
- VALYASHKO M.G. (1956) – Geochemistry of bromine in the processes of salt deposition and the use of the bromine content as a genetic and prospecting criterion. *Geochemistry*, 6, p. 570–589.
- WHITE A.F., CLAASEN H.C. & BENSON L.V. (1980) – The effect of dissolution of volcanic glass on the water chemistry in a tuffaceous aquifer, Rainer Mesa, Nevada. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 1535-Q, 34 p.
- WHITE D.E., HEM J.D. & WARING G.A. (1963) – Data of geochemistry. Chemical composition of sub-surface waters. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 440-F, 67 p.
- WIRRMANN D. & OLIVEIRA ALMEIDA L.F. (1987) – Low Holocene level (7700 to 3650 years ago) of Lake Titicaca (Bolivia). *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 59, p. 315–323.

## PLANCHES

## PLANCHE I

### Les salars du Lipez

*The salars of Lipez*

Los salares del Lipez

- 1 - Vue générale de quelques salars du Lipez.  
*Aerial view of some Lipez salars.*  
Vista general de algunos salares del Lipez.
- 2 - Formations géologiques du Lipez. Noter les immenses coulées d'ignimbrites.  
*Geological formations of Lipez. Note the wide ignimbrite flows.*  
Formaciones geológicas del Lipez. Nótese las inmensas capas de ignimbritas.
- 3 - Lac salé.  
*Salt lake.*  
Lago salado.
- 4 - Croûte de sel.  
*Salt crust.*  
Costra de sal.
- 5 - Salar de type playa.  
*Playa lake.*  
Salar de tipo playa.
- 6 - Salar de nappe sub-affleurante.  
*Unconfined aquifer salar.*  
Salar de tipo acuífero libre.
- 7 - Gypse diagénétique déposé par remontée capillaire de la nappe dans les sédiments d'un salar de type playa.  
*Diagenetic gypsum deposited by capillary draw of the brine within the sediments of a playa lake.*  
Yeso diagénético depositado por ascensión capilar de la salmuera a dentro de los sedimentos de un salar de tipo playa.
- 8 - Gisement de soufre natif au sommet d'un volcan.  
*Native sulfur deposit near the summit of a volcano.*  
Yacimiento de azufre nativo en la cima de un volcán.



## PLANCHE II

### Le salar d'Uyuni

*The salar of Uyuni*

El salar de Uyuni

- 1 - Vue du salar à travers une arche de stromatolites.  
*View of the salar through a stromatolite arch.*  
Vista del salar a través de una arca de stromatolitas.
- 2 - Lignes de rivage des paléolacs soulignées par des encroûtements algaires.  
*Paleolake shorelines marked by algal encrustments.*  
Niveles de los antiguos lagos marcados por costras algarias.
- 3 - La croûte de sel montrant les polygones de dessiccation.  
*The salt crust with polygonal cracks.*  
La costra de sal con los polígonos de desecación.
- 4 - Un "oeil" dans la croûte de sel montrant la saumure intracrustale.  
*An "eye" in the salt crust showing the intracrustal brine.*  
Un "ojo" en la costra de sal mostrando la salmuera intersticial.
- 5 - Sondage dans le salar d'Uyuni.  
*Drilling in the salar of Uyuni.*  
Sondeo en el salar de Uyuni.
- 6 - Carottes de sels (en clair) et de sédiments lacustres (en sombre).  
*Salt cores (clear) and lacustrine sediment cores (dark).*  
Testigos de sales (claros) y de sedimentos lacustres (sombrios).
- 7 - Le salar d'Uyuni avec au premier plan un diapir de gypse.  
*The salar of Uyuni with a gypsum diapir in the foreground.*  
El salar de Uyuni con un diapiro de yeso en el primer plano.
- 8 - Le diapir de gypse de Tarcamaya avec le sel provenant des sources salées.  
*The Tarcamaya gypsum diapir with salt deposited by saline springs.*  
El diapiro de yeso de Tarcamaya con la sal proveniente de manantiales salados.



## PLANCHE II

### Le salar d'Uyuni

*The salar of Uyuni*

El salar de Uyuni

- 1 - Vue du salar à travers une arche de stromatolites.  
*View of the salar through a stromatolite arch.*  
Vista del salar a través de una arca de stromatolitas.
- 2 - Lignes de rivage des paléolacs soulignées par des encroûtements algaires.  
*Paleolake shorelines marked by algal encrustments.*  
Niveles de los antiguos lagos marcados por costras algarias.
- 3 - La croûte de sel montrant les polygones de dessiccation.  
*The salt crust with polygonal cracks.*  
La costra de sal con los polígonos de desecación.
- 4 - Un "oeil" dans la croûte de sel montrant la saumure intracrustale.  
*An "eye" in the salt crust showing the intracrustal brine.*  
Un "ojo" en la costra de sal mostrando la salmuera intersticial.
- 5 - Sondage dans le salar d'Uyuni.  
*Drilling in the salar of Uyuni.*  
Sondeo en el salar de Uyuni.
- 6 - Carottes de sels (en clair) et de sédiments lacustres (en sombre).  
*Salt cores (clear) and lacustrine sediment cores (dark).*  
Testigos de sales (claros) y de sedimentos lacustres (sombrios).
- 7 - Le salar d'Uyuni avec au premier plan un diapir de gypse.  
*The salar of Uyuni with a gypsum diapir in the foreground.*  
El salar de Uyuni con un diapiro de yeso en el primer plano.
- 8 - Le diapir de gypse de Tarcamaya avec le sel provenant des sources salées.  
*The Tarcamaya gypsum diapir with salt deposited by saline springs.*  
El diapiro de yeso de Tarcamaya con la sal proveniente de manantiales salados.

# ANNEXE

## LIPEZ

En mmol/l ; alc. en meq/l ; STD en mg/l.

Localisation des analyses sur la figure 13. *Localization of analyses in figure 13.* Localización de los análisis en la figura 13.

L : saumure du lac - *lake brine* - salmuera del lago.

N : saumure de nappe - *underground brine* - salmuera subterránea.

NA : non analysé - *not analyzed* - no analizado.

STD : sels totaux dissous - *total dissolved solids* - sales totales disueltas.

Référence : RUSACHER & FRITZ (1991 a)

CAN Cañapa, HED Hedionda, CHI Chiar Kota, HON Honda, PUJ Pujio, BAL Ballivian, RAM Ramaditas, TUR Turquiri, CHU Chulluncani, PAG Pastos Grandes, CAL Cachi Laguna, KAR Kara, CAP Capina, CLD Colorada, LAG Lagunillas, CHA Challviri, HND Honda Sur, PUR Puripica, VER Laguna Verde, COL Collpa, HDS Hedionda Sur, TOT Totoral, CAT Catalcito, BUS Bush, PEL Pelada, LOR Loromayu, LUR Luriques, MAM Mama Kumu, CHL Chojillas, COR Coruto

| n°    | t°C  | dens. | pH   | alc.   | Cl    | SO <sub>4</sub> | B     | Si    | Na     | K      | Li      | Ca    | Mg    | STD    |
|-------|------|-------|------|--------|-------|-----------------|-------|-------|--------|--------|---------|-------|-------|--------|
| CAN-a | 7,5  | 1     | 6,5  | 1,7    | 7,63  | 1,3             | 0,102 | 1,05  | 6,3    | 0,522  | 0,187   | 1,5   | 0,741 | 808    |
| CAN-b | 12,2 | 1     | 7,18 | 1,39   | 5,69  | 0,94            | 0,09  | 1,14  | 4,61   | 0,412  | 0,144   | 1,08  | 0,675 | 629    |
| CAN-c | 5    | 1     | 7,23 | 0,53   | 0,106 | 0,375           | 0,032 | 0,783 | 0,544  | 0,072  | 7,2E-03 | 0,224 | 0,148 | 147    |
| CAN-d | 8,5  | 1     | 3,8  | -0,064 | 0,045 | 0,57            | 0,02  | 0,052 | 0,0715 | 0,107  | 0,01    | 0,268 | 0,122 | 79,3   |
| CAN-e | 7    | 1     | 6,2  | 0,104  | 0,024 | 0,111           | 0,026 | 0,285 | 0,214  | 0,046  | 0,01    | 0,038 | 0,02  | 44     |
| CAN-f | 5,5  | 1     | 4,33 | 3E-03  | 0,084 | 0,214           | 0,03  | 0,131 | 0,183  | 0,102  | 4E-03   | 0,069 | 0,033 | 43,6   |
| CAN-N | 5    | 1,114 | 7,79 | 13,4   | 2110  | 356             | 58,2  | 0,71  | 2460   | 162    | 54,7    | 14,3  | 43,2  | 175485 |
| HED-a | 9    | 1     | 6,68 | 0,929  | 2,23  | 0,823           | 0,139 | 1,02  | 3,04   | 0,23   | 0,069   | 0,449 | 0,362 | 383    |
| HED-b | 10   | 1,006 | 7,28 | 3,65   | 106   | 4,74            | 1,94  | 2,05  | 91,3   | 5,12   | 2,16    | 7,48  | 4,69  | 7313   |
| HED-c | 13   | 1     | 7    | 1      | 2,96  | 0,802           | 0,129 | 1,22  | 3,5    | 0,256  | 0,061   | 0,449 | 0,354 | 435    |
| HED-N | 15   | 1,17  | 6,69 | 25     | 3360  | 370             | 101   | 0,487 | 3360   | 224    | 101     | 9,65  | 272   | 251182 |
| CHI-a | 13,5 | 1     | 7,31 | 0,812  | 1,49  | 0,781           | 0,088 | 1,07  | 2,17   | 0,164  | 0,071   | 0,424 | 0,305 | 323    |
| CHI-b | 9,5  | 1,003 | 6,72 | 3,58   | 53,2  | 7,81            | 1,43  | 1,38  | 54,4   | 3,33   | 1,34    | 3,49  | 3,09  | 4560   |
| CHI-c | 15   | 1,001 | 7,5  | 1,89   | 27,3  | 1,11            | 0,57  | 1,5   | 21,7   | 1,54   | 0,591   | 2,79  | 1,23  | 1992   |
| CHI-N | 8    | 1,164 | 7,38 | 12,9   | 4000  | 113             | 72,4  | 0,608 | 3440   | 216    | 102     | 28,2  | 190   | 248475 |
| HON-a | 12   | 1     | 7,63 | 2,18   | 7,18  | 0,781           | 0,166 | 1,53  | 6,16   | 0,547  | 0,123   | 1,3   | 0,634 | 787    |
| HON-b | 14   | 1     | 7,6  | 1,39   | 3,1   | 0,391           | 0,102 | 1,08  | 3,06   | 0,256  | 0,048   | 0,748 | 0,305 | 416    |
| HON-N | 6    | 1,124 | 7,94 | 5,52   | 465   | 46,9            | 10,2  | 1,22  | 435    | 40,4   | 10,7    | 20,2  | 7,2   | 34172  |
| PUJ-a | 9    | 1     | 7,52 | 2,89   | 6,65  | 1,09            | 0,268 | 1,12  | 8,26   | 0,368  | 0,084   | 1,37  | 0,354 | 855    |
| PUJ-b | 1    | 1     | 6,77 | 1,76   | 5,8   | 0,522           | 0,18  | 0,983 | 6,52   | 0,358  | 0,073   | 0,698 | 0,255 | 622    |
| PUJ-N | 10   | 1,044 | 7,62 | 21,2   | 735   | 120             | 29,1  | 1,3   | 860    | 40,9   | 9,65    | 15,5  | 18,5  | 61813  |
| BAL-a | 14   | 1     | 7,18 | 0,943  | 8,45  | 1,71            | 0,194 | 1,17  | 8,48   | 0,599  | 0,065   | 1,63  | 0,465 | 889    |
| BAL-N | 10   | 1,079 | 7,1  | 12,4   | 1730  | 106             | 30,5  | 0,983 | 1655   | 106    | 11,2    | 31,2  | 65,8  | 117873 |
| RAM-a | 8,5  | 1,001 | 8,28 | 1,14   | 7,32  | 6,46            | 0,166 | 1     | 5,68   | 0,568  | 0,049   | 7,36  | 1,15  | 1487   |
| RAM-b | 25   | 1     | 8    | 0,791  | 5,58  | 1,83            | 0,148 | 1,2   | 6,13   | 0,379  | 0,033   | 1,75  | 0,206 | 726    |
| RAM-c | 15   | 1,001 | 8,55 | 1,62   | 13,4  | 2,43            | 0,268 | 0,8   | 17,4   | 1,41   | 0,092   | 0,748 | 0,126 | 1346   |
| RAM-d | 8    | 1     | 7,09 | 0,325  | 0,108 | 0,208           | 0,032 | 0,65  | 0,203  | 0,072  | 1,4E-03 | 0,177 | 0,102 | 100    |
| RAM-N | 11   | 1,045 | 7,08 | 5,44   | 995   | 45,8            | 14,3  | 0,883 | 860    | 52,7   | 4,03    | 47,6  | 31,3  | 64796  |
| TUR-a | 12   | 1     | 7,86 | 0,58   | 0,21  | 0,145           | 0,056 | 0,91  | 0,5    | 0,097  | 5E-03   | 0,172 | 0,079 | 135    |
| TUR-L | 12   | 1     | 8,31 | 3,05   | 1,53  | 0,69            | 0,378 | 0,625 | 3,38   | 0,59   | 0,039   | 0,526 | 0,428 | 478    |
| CHU-a | 5    | 1     | 8,1  | 0,359  | 0,127 | 0,135           | 0,042 | 0,617 | 0,435  | 0,072  | 1,4E-03 | 0,044 | 0,066 | 92,9   |
| CHU-L | 5    | 1,087 | 8,8  | 35     | 1240  | 277             | 88,7  | 0,783 | 1310   | 327    | 3,24    | 18,2  | 78,2  | 119261 |
| PAG-a | 9    | 1     | 8,6  | 0,236  | 0,081 | 0,102           | 0,016 | 0,58  | 0,15   | 0,067  | 4E-04   | 0,099 | 0,058 | 73,2   |
| PAG-b | 0    | 1     | 8,91 | 0,8    | 0,293 | 0,099           | 0,04  | 0,487 | 0,709  | 0,0652 | 0,014   | 0,17  | 0,115 | 125    |
| PAG-c | 10   | 1     | 8,92 | 1,36   | 4,23  | 0,052           | 0,1   | 0,8   | 3,7    | 0,322  | 0,17    | 0,312 | 0,305 | 402    |
| PAG-d | 1    | 1     | 7,12 | 0,76   | 0,158 | 0,057           | 0,03  | 0,772 | 0,287  | 0,0417 | 0       | 0,224 | 0,132 | 124    |
| PAG-e | 8,5  | 1     | 8    | 0,61   | 0,11  | 0,125           | 0,029 | 0,487 | 0,287  | 0,0471 | 0       | 0,17  | 0,123 | 100    |
| PAG-f | 10   | 1     | 6,95 | 3,3    | 2,54  | 1,09            | 0,092 | 1,33  | 3,48   | 0,422  | 0,073   | 1,27  | 0,831 | 644    |
| PAG-g | 9,5  | 1,002 | 6,5  | 2,95   | 43,1  | 1,32            | 0,749 | 1,62  | 40,4   | 3,22   | 1,59    | 1,17  | 0,551 | 3068   |
| PAG-h | 32   | 1,001 | 6,6  | 1,63   | 15,4  | 0,74            | 0,27  | 1,28  | 14,8   | 0,995  | 0,626   | 0,491 | 0,36  | 1208   |
| PAG-i | 15   | 1     | 7    | 0,788  | 4,03  | 0,283           | 0,088 | 0,895 | 4,24   | 0,258  | 0,163   | 0,207 | 0,147 | 393    |

| n°    | t°C  | dens. | pH    | alc.  | Cl    | SO <sub>4</sub> | B     | Si    | Na    | K     | Li      | Ca    | Mg    | STD    |
|-------|------|-------|-------|-------|-------|-----------------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|--------|
| PAG-j | 13   | 1     | 7,82  | 0,61  | 1,67  | 0,075           | 0,03  | 0,32  | 2,03  | 0,11  | 0,075   | 0,082 | 0,066 | 179    |
| PAG-L | 5    | 1,211 | 7,2   | 22,9  | 5460  | 25,6            | 87,3  | 1,12  | 4480  | 363   | 236     | 77,3  | 143   | 324141 |
| CAL-a | 18   | 1     | 9,82  | 2,35  | 0,375 | 0,364           | 0,138 | 1,5   | 1,63  | 0,194 | 0,028   | 0,536 | 0,246 | 328    |
| CAL-b | 5    | 1     | 9,15  | 2,46  | 1,38  | 0,677           | 0,134 | 1,17  | 2,87  | 0,435 | 0,065   | 0,499 | 0,535 | 443    |
| CAL-c | 12   | 1     | 7,53  | 2,08  | 0,104 | 0,12            | 0,03  | 1,6   | 1,67  | 0,286 | 0,043   | 0,157 | 0,111 | 297    |
| CAL-L | 25   | 1,238 | 10,05 | 2500  | 1610  | 373             | 231   | 7,2   | 4000  | 910   | 122     | 0,15  | 0,12  | 337143 |
| KAR-a | 1    | 1     | 8,5   | 4,88  | 0,211 | 0,146           | 0,046 | 1,37  | 2,61  | 0,46  | 0,027   | 0,324 | 0,534 | 501    |
| KAR-L | 5    | 1,007 | 9,4   | 37,2  | 116   | 2,17            | 7,86  | 1,13  | 134   | 7,16  | 5,19    | 0,09  | 2,74  | 9997   |
| CAP-a | 1    | 1     | 7,88  | 0,52  | 0,056 | 0,055           | 0,052 | 0,633 | 0,183 | 0,076 | 0,014   | 0,11  | 0,081 | 91     |
| CAP-b | 2    | 1     | 8,28  | 2,05  | 0,749 | 0,215           | 0,118 | 0,938 | 1,61  | 0,266 | 0,029   | 0,459 | 0,267 | 301    |
| CAP-L | 6    | 1,02  | 8,6   | 12,4  | 487   | NA              | 25,8  | 1,22  | 370   | 37,3  | 27,8    | 20    | 10,7  | 29798  |
| CLD-a | 22   | 1     | 7,62  | 1,17  | 2,18  | 0,343           | 0,079 | 1,24  | 3,15  | 0,271 | 0,04    | 0,173 | 0,153 | 350    |
| CLD-b | 29   | 1,001 | 7,88  | 0,92  | 13,3  | 1,81            | 0,464 | 1,39  | 15,4  | 0,806 | 0,223   | 0,259 | 0,198 | 1192   |
| CLD-c | 8    | 1     | 7,98  | 0,763 | 0,37  | 0,268           | 0,048 | 0,75  | 0,59  | 0,121 | 3E-03   | 0,307 | 0,187 | 165    |
| CLD-d | 11   | 1     | 7,85  | 0,703 | 0,085 | 0,201           | 0,018 | 0,705 | 0,478 | 0,032 | 7E-03   | 0,146 | 0,189 | 130    |
| CLD-e | 2    | 1     | 8,18  | 2,55  | 2,1   | 0,661           | 0,093 | 0,85  | 3,3   | 0,343 | 0,046   | 0,683 | 0,369 | 470    |
| CLD-f | 26   | 1,001 | 7,4   | 3,26  | 12,2  | 2,1             | 0,429 | 1,47  | 13,9  | 0,957 | 0,195   | 1,01  | 1,05  | 1350   |
| CLD-g | 9    | 1     | 8,48  | 3,4   | 0,069 | 0,61            | 0,019 | 1,41  | 1,33  | 0,269 | 7E-03   | 0,731 | 0,807 | 440    |
| CLD-h | 17   | 1,001 | 7,8   | 2,45  | 10,4  | 1,45            | 0,403 | 1,15  | 12,7  | 0,923 | 0,173   | 0,459 | 0,551 | 1091   |
| CLD-i | 23   | 1     | 7,88  | 0,83  | 10,8  | 1,38            | 0,347 | 1,21  | 12,2  | 0,683 | 0,173   | 0,282 | 0,335 | 970    |
| CLD-j | 2    | 1,001 | 7,9   | 2,05  | 12,5  | 2,24            | 0,403 | 1,2   | 15,5  | 0,821 | 0,209   | 0,638 | 0,65  | 1291   |
| CLD-k | 18   | 1     | 7,4   | 0,7   | 5,85  | 1,1             | 0,235 | 1,18  | 7,55  | 0,404 | 0,101   | 0,179 | 0,18  | 630    |
| CLD-L | 6    | 1,081 | 8,4   | 31,5  | 1830  | 67,1            | 56,6  | 1,63  | 1770  | 109   | 28,2    | 6,48  | 37,6  | 120357 |
| LAG-a | 12   | 1     | 8,38  | 0,55  | 0,078 | 0,138           | 0,021 | 0,605 | 0,338 | 0,051 | 4,5E-4  | 0,175 | 0,096 | 105    |
| LAG-L | 8    | 1     | 9,8   | 1,07  | 0,611 | 1,63            | 0,277 | 1,24  | 2,08  | 0,852 | 0,001   | 0,94  | 0,108 | 420    |
| CHA-a | 14,5 | 1     | 7,69  | 0,45  | 0,232 | 0,205           | 0,031 | 0,572 | 0,492 | 0,07  | 0,01    | 0,148 | 0,121 | 112    |
| CHA-b | 30   | 1,001 | 7,92  | 1,43  | 12    | 1,29            | 0,775 | 1,3   | 11,6  | 1,21  | 0,496   | 1,04  | 0,407 | 1092   |
| CHA-c | 1    | 1     | 8,08  | 1,73  | 0,71  | 1,13            | 0,087 | 1,09  | 2,67  | 0,173 | 0,035   | 0,519 | 0,302 | 401    |
| CHA-d | 36   | 1     | 8,4   | 0,795 | 0,12  | 1,72            | 0,031 | 1,16  | 2,57  | 0,116 | 7E-03   | 0,686 | 0,091 | 380    |
| CHA-e | 10   | 1     | 7,75  | 0,31  | 0,06  | 0,149           | 0,013 | 0,883 | 0,276 | 0,099 | 7E-04   | 0,107 | 0,053 | 104    |
| CHA-L | 3    | 1,015 | 8,34  | 4,32  | 330   | 24,9            | 9,18  | 1,39  | 313   | 9,72  | 9,87    | 10,9  | 10,1  | 22879  |
| HND-a | 10,8 | 1     | 7,95  | 0,722 | 1,01  | 0,44            | 0,086 | 0,98  | 1,33  | 0,081 | 0,023   | 0,571 | 0,065 | 240    |
| HND-L | 5,5  | 1,109 | 9,5   | 468   | 1420  | 242             | 59    | 2,37  | 2160  | 66,5  | 28,8    | 0,095 | 0,05  | 152143 |
| PUR-a | 5    | 1     | 8,72  | 0,833 | 0,515 | 0,424           | 0,158 | 0,805 | 1,12  | 0,36  | 0,032   | 0,249 | 0,095 | 210    |
| PUR-b | 23   | 1     | 8,12  | 1,25  | 10,4  | 1,08            | 0,551 | 1,13  | 10    | 1,08  | 0,403   | 0,706 | 0,322 | 933    |
| PUR-L | 4    | 1,024 | 8,52  | 7,8   | 430   | 48,5            | 22    | 0,735 | 415   | 44    | 15,7    | 11,6  | 11,3  | 32785  |
| VER-a | 15   | 1,002 | 8,28  | 1,86  | 14,3  | 5,97            | 1,05  | 1,73  | 20,8  | 1,57  | 0,382   | 2,01  | 0,794 | 1950   |
| VER-b | 30,5 | 1,001 | 6,28  | 1,09  | 15,4  | 2,6             | 0,883 | 2     | 13,6  | 1,45  | 0,634   | 2,21  | 0,938 | 1477   |
| VER-c | 15   | 1     | 7,3   | 0,395 | 0,083 | 0,235           | 0,023 | 1,1   | 0,39  | 0,046 | 3E-03   | 0,193 | 0,07  | 136    |
| VER-d | 20   | 1     | 7,28  | 0,788 | 2,52  | 0,254           | 0,128 | 1,08  | 2,22  | 0,098 | 0,059   | 0,464 | 0,179 | 306    |
| VER-e | 7    | 1,002 | 8,4   | 2,68  | 24,3  | 2,31            | 1,55  | 0,825 | 25,2  | 0,91  | 0,764   | 1,22  | 1,48  | 2017   |
| VER-L | 5    | 1,046 | 8,48  | 18,9  | 873   | 102             | 54,1  | 0,942 | 870   | 35    | 23,2    | 19,3  | 47,7  | 66034  |
| COL-a | 2    | 1     | 7,67  | 0,53  | 0,183 | 0,021           | 0,037 | 0,574 | 0,291 | 0,077 | 0       | 0,114 | 0,086 | 91,9   |
| COL-b | 4,5  | 1     | 7,53  | 0,775 | 0,237 | 0,117           | 0,046 | 0,493 | 0,761 | 0,072 | 0       | 0,102 | 0,074 | 123    |
| COL-L | 5    | 1,037 | 10,81 | 562   | 188   | 4,93            | 9,07  | 2,5   | 744   | 32,2  | 0,086   | 0,175 | 0,132 | 45112  |
| HDS-L | 5    | 1,028 | 10,6  | 362   | 189   | 17,3            | 10,5  | 3,16  | 548   | 43    | 0,072   | 0,409 | 0,263 | 36217  |
| TOT-a | 13,4 | 1     | 8,65  | 0,597 | 0,121 | 0,083           | 0,018 | 0,62  | 0,509 | 0,035 | 6E-03   | 0,16  | 0,013 | 105    |
| TOT-L | 2,8  | 1     | 10,3  | 3,4   | 0,524 | 0,465           | 0,118 | 1,64  | 3,93  | 0,012 | 0,037   | 0,439 | 0,027 | 411    |
| CAT-a | 5,5  | 1     | 7,8   | 1,19  | 1,98  | 0,173           | 0,091 | 0,875 | 2,14  | 0,154 | 0,084   | 0,439 | 0,125 | 289    |
| CAT-b | 15,1 | 1     | 8,2   | 0,75  | 0,146 | 0,138           | 0,033 | 0,75  | 0,6   | 0,034 | 7E-03   | 0,264 | 6E-03 | 135    |
| CAT-L | 4    | 1,007 | 9,1   | 14,2  | 136   | 7,5             | 4,9   | 1,56  | 144   | 8,06  | 4,47    | 1,43  | 0,35  | 10238  |
| BUS-a | 3,8  | 1     | 7,95  | 1,36  | 0,476 | 0,099           | 0,066 | 0,815 | 0,974 | 0,075 | 0,026   | 0,414 | 0,071 | 202    |
| BUS-b | 13,9 | 1     | 8,1   | 0,665 | 3,61  | 0,372           | 0,145 | 0,735 | 3,66  | 0,136 | 0,091   | 0,384 | 0,087 | 357    |
| BUS-c | 13,4 | 1     | 8,45  | 0,95  | 3,15  | 0,574           | 0,212 | 0,64  | 4,43  | 0,056 | 0,095   | 0,24  | 0,028 | 379    |
| BUS-L | 8,8  | 1,052 | 8,3   | 14,4  | 966   | 109             | 44,9  | 1,07  | 1100  | 25,4  | 25,4    | 15,1  | 6,71  | 73415  |
| PEL-a | 9,2  | 1     | 8,35  | 0,358 | 0,088 | 0,109           | 0,021 | 0,68  | 0,271 | 0,073 | 1,4E-03 | 0,131 | 0,03  | 91,3   |
| PEL-L | 6,2  | 1,015 | 9,1   | 16    | 161   | 54,8            | 28,2  | 0,655 | 229   | 28,9  | 2,77    | 6,76  | 3,25  | 19010  |
| LOR-a | 5,8  | 1     | 7,85  | 2,81  | 2,41  | 0,473           | 0,099 | 1,31  | 3,45  | 0,368 | 0,108   | 1     | 0,16  | 519    |
| LOR-b | 6,8  | 1     | 8,05  | 2,4   | 1,02  | 0,221           | 0,05  | 1,07  | 2,3   | 0,363 | 0,056   | 0,511 | 0,101 | 358    |
| LOR-L | 11,2 | 1,235 | 7,8   | 126   | 5040  | 272             | 240   | 0,105 | 3620  | 946   | 444     | 3,79  | 360   | 347528 |
| LUR-a | 4    | 1     | 7,8   | 1,85  | 0,101 | 0,466           | 0,026 | 0,975 | 0,778 | 0,317 | 4E-03   | 0,601 | 0,26  | 280    |
| LUR-b | 4    | 1     | 7,9   | 2,4   | 0,904 | 0,207           | 0,074 | 1,11  | 1,7   | 0,317 | 0,053   | 0,711 | 0,136 | 348    |
| LUR-L | 0,7  | 1,026 | 8,85  | 7,22  | 501   | 38,4            | 12,4  | 0,525 | 422   | 51,9  | 20,7    | 39,4  | 6,91  | 35690  |
| MAM-a | 14,5 | 1     | 9,4   | 0,58  | 0,307 | 0,083           | 0,022 | 0,455 | 0,522 | 0,041 | 4E-03   | 0,202 | 0,043 | 101    |
| MAM-b | 2,3  | 1     | 7,5   | 1,01  | 2,75  | 0,146           | 0,097 | 0,515 | 2,93  | 0,107 | 0,036   | 0,299 | 0,105 | 291    |
| MAM-c | 10   | 1     | 7,5   | 0,61  | 2,06  | 0,155           | 0,076 | 0,62  | 2,35  | 0,096 | 0,027   | 0,141 | 0,062 | 228    |

| n°    | t°C  | dens. | pH   | alc.  | Cl    | SO <sub>4</sub> | B     | Si    | Na    | K     | Li      | Ca    | Mg    | STD    |
|-------|------|-------|------|-------|-------|-----------------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|--------|
| MAM-N | 6,3  | 1,086 | 7,35 | 1,95  | 2170  | 9,2             | 18,9  | 0,475 | 1720  | 69,1  | 23,8    | 100   | 85,2  | 126777 |
| CHL-a | 0,2  | 1     | 8,3  | 0,676 | 0,151 | 0,078           | 0,027 | 0,535 | 0,349 | 0,055 | 4E-03   | 0,208 | 0,077 | 106    |
| CHL-b | 8,6  | 1     | 8,4  | 0,474 | 1,71  | 0,125           | 0,102 | 0,5   | 1,94  | 0,067 | 0,095   | 0,104 | 0,032 | 185    |
| CHL-L | 5    | 1,013 | 7,6  | 4,88  | 304   | 4,25            | 9,48  | 1,35  | 238   | 10,4  | 9,37    | 18,5  | 7,7   | 18555  |
| COR-a | 9,3  | 1     | 7,5  | 0,56  | 0,167 | 0,104           | 0,026 | 0,41  | 0,308 | 0,044 | 3E-03   | 0,202 | 0,09  | 94     |
| COR-b | 0,7  | 1     | 6,05 | 0,449 | 0,212 | 0,101           | 0,024 | 0,47  | 0,336 | 0,048 | 4E-03   | 0,185 | 0,057 | 91,5   |
| COR-c | 1,9  | 1,002 | 7,25 | 2,64  | 33,5  | 1,19            | 1,16  | 1,19  | 22,4  | 2,09  | 1,2     | 5,31  | 1,04  | 2391   |
| COR-d | 4,4  | 1     | 7,4  | 1,83  | 4,31  | 0,128           | 0,296 | 1,42  | 4,83  | 0,409 | 0,242   | 0,419 | 0,051 | 511    |
| COR-e | 12,3 | 1     | 8,9  | 2,22  | 1,26  | 0,29            | 0,091 | 1,39  | 2,33  | 0,32  | 0,082   | 0,566 | 0,182 | 381    |
| COR-f | 8,3  | 1     | 8,35 | 0,51  | 0,087 | 0,118           | 0,02  | 0,795 | 0,255 | 0,098 | 1,4E-03 | 0,168 | 0,067 | 111    |
| COR-L | 2,5  | 1,083 | 7,75 | 10,6  | 2040  | 22,5            | 37,1  | 1,08  | 1570  | 70,1  | 48,7    | 136   | 65    | 121913 |

## UYUNI

En mmol/l ; alc. en meq/l ; STD en mg/l.

Localisation des analyses sur la figure 24. *Localization of analyses in figure 24.* Localización de los análisis en la figura 24.

Le nombre qui suit le code du puits est la profondeur en centimètres. *The number following the two-digits well code is the depth in centimeters.* El número que sigue el código del pozo es la profundidad en centímetros.

RIO G Rio Grande, TAR Tarcamaya.

NA : non analysé - *not analyzed* - no analizado.

STD : sels totaux dissous - *total dissolved solids* - sales totales disueltas.

Référence : RUSACHER & FRITZ (1991 b)

| n°     | t°C | dens. | pH   | alc. | Br    | Cl   | SO <sub>4</sub> | B    | Si    | Na   | K   | Li   | Ca   | Mg   | STD    |
|--------|-----|-------|------|------|-------|------|-----------------|------|-------|------|-----|------|------|------|--------|
| U1-12  | 6   | 1,215 | 7,17 | 16,6 | 1,08  | 5520 | 177             | 53,5 | 0,059 | 4000 | 405 | 101  | 10,6 | 683  | 340191 |
| U1-400 | 8,3 | 1,226 | 6,98 | 30,4 | 1,21  | 5560 | 307             | 91,3 | 0,049 | 3760 | 490 | 129  | 6,58 | 877  | 357902 |
| U1-800 | 12  | 1,228 | 6,9  | 32,2 | 1,26  | 5440 | 330             | 95,9 | 0,054 | 3640 | 500 | 134  | 6,16 | 889  | 353955 |
| U2-13  | 6,7 | 1,212 | 7,02 | 12,9 | 1,08  | 5480 | 166             | 44,4 | 0,054 | 4040 | 365 | 92,2 | 10,8 | 597  | 334604 |
| U2-100 | 6,7 | 1,219 | 6,93 | 17,4 | 1,12  | 5520 | 240             | 57,2 | 0,059 | 4000 | 425 | 108  | 8,25 | 712  | 347772 |
| U2-200 | 6,1 | 1,221 | 6,92 | 20,7 | 1,17  | 5440 | 263             | 64,8 | 0,05  | 3840 | 445 | 114  | 7,66 | 728  | 344936 |
| U2-300 | 6,7 | 1,222 | 6,95 | 23   | 1,21  | 5360 | 285             | 70,9 | 0,053 | 3760 | 458 | 119  | 7,08 | 770  | 344118 |
| U2-400 | 7,2 | 1,226 | 6,94 | 31,7 | 1,27  | 5280 | 345             | 90,3 | 0,043 | 3720 | 475 | 131  | 5,84 | 840  | 349262 |
| U2-500 | 6,7 | 1,228 | 6,92 | 32,5 | 1,31  | 5320 | 355             | 93,8 | 0,043 | 3720 | 475 | 132  | 5,56 | 844  | 351824 |
| U2-600 | 6,7 | 1,228 | 7,02 | 31,9 | 1,30  | 5280 | 355             | 94,4 | 0,045 | 3720 | 470 | 129  | 5,56 | 852  | 350351 |
| UA-80  | 5   | 1,22  | 6,88 | 18   | 1,11  | 5350 | 240             | 61,9 | 0,057 | 3990 | 450 | 111  | 7,73 | 663  | 341380 |
| UA-200 | 3   | 1,226 | 6,92 | 18,2 | 1,03  | 5375 | 233             | 60,6 | 0,046 | 3925 | 442 | 117  | 7,87 | 685  | 340361 |
| UA-400 | 8   | 1,226 | 6,9  | 18,1 | 1,05  | 5525 | 234             | 60,8 | 0,046 | 4125 | 445 | 117  | 8,15 | 690  | 350630 |
| UA-600 | 12  | 1,228 | 6,87 | 18   | 1,12  | 5400 | 254             | 61,8 | 0,052 | 3975 | 449 | 119  | 7,85 | 710  | 345317 |
| UB-0   | 5   | 1,241 | 6,39 | 68,2 | 3,21  | 5660 | 379             | 160  | 0,7   | 2350 | 775 | 269  | 3,09 | 1560 | 367755 |
| UB-10  | 12  | 1,247 | 6,46 | 65,5 | 3,02  | 5630 | 457             | 158  | 0,28  | 2480 | 760 | 256  | 3,42 | 1580 | 376764 |
| UB-100 | 8   | 1,242 | 5,92 | 76,2 | 4,48  | 5920 | 342             | 187  | 0,072 | 1570 | 496 | 369  | 3,72 | 2100 | 359269 |
| UB-250 | 9   | 1,246 | 5,88 | 85,2 | 5,05  | 6030 | 357             | 200  | 0,088 | 1250 | 496 | 402  | 1,25 | 2280 | 362494 |
| UB-400 | 9   | 1,248 | 5,81 | 85,3 | 5,05  | 6060 | 360             | 203  | 0,09  | 1270 | 504 | 408  | 1,25 | 2300 | 365187 |
| UC-5   | -2  | 1,227 | 6,64 | 46,2 | 2,47  | 5460 | 320             | 114  | 0,13  | 2970 | 514 | 210  | 5,81 | 1330 | 351223 |
| UC-100 | 4   | 1,22  | 6,83 | 26,2 | 1,75  | 5350 | 267             | 78   | 0,052 | 3850 | 486 | 128  | 6,68 | 790  | 346047 |
| UC-250 | 5   | 1,222 | 6,86 | 26,8 | 1,66  | 5410 | 273             | 80,6 | 0,058 | 3850 | 476 | 125  | 6,71 | 794  | 348498 |
| UC-400 | 5   | 1,223 | 6,82 | 26,9 | 1,65  | 5380 | 278             | 89,7 | 0,06  | 3880 | 481 | 127  | 6,71 | 790  | 348819 |
| UD-10  | 2   | 1,224 | 6,65 | 44,1 | 2,55  | 5550 | 321             | 115  | 0,083 | 2880 | 683 | 189  | 5,19 | 1260 | 357066 |
| UD-100 | 2   | 1,22  | 6,99 | 28   | 1,90  | 5460 | 235             | 79,9 | 0,052 | 3700 | 552 | 128  | 7,91 | 820  | 346931 |
| UD-250 | 5   | 1,222 | 6,99 | 27,5 | 1,62  | 5440 | 264             | 79,9 | 0,053 | 3810 | 519 | 118  | 7,31 | 790  | 349370 |
| UD-400 | 5   | 1,223 | 6,96 | 27,1 | 1,57  | 5380 | 265             | 80,6 | 0,055 | 3830 | 519 | 118  | 7,33 | 794  | 347873 |
| UE-5   | 5   | 1,226 | 6,72 | 32,6 | 1,77  | 5490 | 289             | 91,3 | 0,067 | 3420 | 578 | 102  | 7,33 | 1010 | 352565 |
| UE-100 | 3   | 1,224 | 6,95 | 26,3 | 1,32  | 5350 | 306             | 80,6 | 0,055 | 4000 | 494 | 102  | 6,71 | 724  | 351771 |
| UE-250 | 4   | 1,224 | 7,06 | 26,7 | 1,30  | 5350 | 298             | 79,5 | 0,057 | 4010 | 494 | 102  | 6,71 | 716  | 351049 |
| UE-400 | 5   | 1,221 | 7,05 | 26,6 | 1,30  | 5320 | 293             | 79,6 | 0,057 | 4000 | 494 | 102  | 6,71 | 712  | 349172 |
| UF-30  | 9   | 1,212 | 7,09 | 6,16 | 0,337 | 5360 | 107             | 22,1 | 0,12  | 4740 | 190 | 48,8 | 16,3 | 304  | 326029 |
| UF-110 | 8,5 | 1,211 | 7,02 | 5,56 | 0,375 | 5350 | 111             | 21,5 | 0,11  | 4700 | 192 | 48,8 | 15,4 | 314  | 325382 |
| UG-15  | 6   | 1,209 | 7,33 | 1,99 | 0,362 | 5350 | 85,4            | 15,8 | 0,12  | 4870 | 148 | 36,6 | 20,8 | 238  | 323120 |
| UG-95  | 4   | 1,211 | 7,25 | 5,36 | 0,362 | 5380 | 95,2            | 18,4 | 0,12  | 4780 | 158 | 38,3 | 18,4 | 263  | 324203 |
| UG-270 | 7   | 1,213 | 7,16 | 5,97 | 0,300 | 5350 | 102             | 21,6 | 0,11  | 4740 | 174 | 43,7 | 16,6 | 287  | 324111 |

| n°      | t°C  | dens. | pH   | alc. | Br    | Cl   | SO <sub>4</sub> | B    | Si    | Na   | K   | Li   | Ca   | Mg   | STD    |
|---------|------|-------|------|------|-------|------|-----------------|------|-------|------|-----|------|------|------|--------|
| UH-10   | 6    | 1,212 | 7,42 | 5,76 | 0,625 | 5380 | 93,3            | 21,8 | 0,085 | 4740 | 184 | 45,4 | 18,7 | 285  | 324793 |
| UH-100  | 7    | 1,211 | 7,36 | 15,1 | 0,638 | 5350 | 105             | 24,6 | 0,087 | 4650 | 203 | 50,6 | 16,6 | 323  | 325000 |
| UH-300  | 10,5 | 1,219 | 7,06 | 9,99 | 0,688 | 5320 | 195             | 34,4 | 0,1   | 4350 | 263 | 66,7 | 10,9 | 473  | 331349 |
| UH-500  | 11   | 1,22  | 7,01 | 10,4 | 0,700 | 5320 | 211             | 36,7 | 0,1   | 4270 | 269 | 70,3 | 10   | 498  | 331927 |
| UH-700  | 11   | 1,223 | 6,97 | 11,2 | 0,700 | 5350 | 216             | 37,5 | 0,11  | 4320 | 276 | 70,5 | 9,75 | 498  | 334945 |
| UH-900  | 11   | 1,222 | 6,94 | 10,8 | 0,725 | 5300 | 231             | 39,1 | 0,11  | 4350 | 286 | 73,9 | 9,15 | 519  | 336196 |
| UI-15   | 5    | 1,212 | 7,43 | 5,76 | 0,588 | 5350 | 97,6            | 20,9 | 0,08  | 4740 | 182 | 43,7 | 17,8 | 274  | 323734 |
| UI-100  | 5,5  | 1,212 | 7,43 | 6,16 | 0,588 | 5320 | 97,5            | 19,8 | 0,077 | 4610 | 173 | 43,7 | 17,5 | 273  | 319294 |
| UI-1000 | 7    | 1,213 | 7,32 | 7,76 | 0,500 | 5320 | 147             | 24,1 | 0,085 | 4610 | 194 | 43,7 | 14,2 | 300  | 325528 |
| UJ-15   | -1   | 1,211 | 7,51 | 4,17 | 0,625 | 5350 | 93              | 23,5 | 0,077 | 4650 | 194 | 48,8 | 19,6 | 288  | 322074 |
| UJ-100  | 7    | 1,217 | 7,22 | 10,2 | 0,725 | 5380 | 148             | 36,9 | 0,093 | 4350 | 281 | 84,1 | 13   | 457  | 329529 |
| UJ-300  | 9    | 1,218 | 7,1  | 13,6 | 0,738 | 5320 | 189             | 40,4 | 0,1   | 4170 | 307 | 80,7 | 10,9 | 527  | 330052 |
| UJ-700  | 9    | 1,223 | 7,02 | 14,4 | 0,788 | 5270 | 251             | 48,6 | 0,11  | 4120 | 317 | 82,9 | 9,75 | 580  | 334869 |
| UK-10   | 2    | 1,215 | 7,58 | 5,38 | 0,813 | 5380 | 115             | 26,6 | 0,1   | 4480 | 227 | 59,5 | 15,5 | 363  | 324487 |
| UK-100  | 8    | 1,223 | 7,2  | 14,4 | 1,20  | 5410 | 195             | 42,3 | 0,1   | 4100 | 373 | 98,7 | 10,4 | 605  | 336900 |
| UK-200  | 11   | 1,228 | 7,02 | 12,1 | 1,08  | 5350 | 261             | 41,9 | 0,11  | 4080 | 368 | 99,1 | 7,96 | 642  | 341102 |
| UK-400  | 12   | 1,229 | 6,94 | 10,5 | 1,06  | 5270 | 297             | 40,8 | 0,11  | 4080 | 613 | 99,1 | 7,36 | 654  | 351453 |
| UL-20   | -3   | 1,218 | 6,89 | 20,7 | 1,43  | 5460 | 167             | 41,8 | 0,087 | 3810 | 499 | 116  | 10   | 720  | 337539 |
| UL-100  | -0,5 | 1,219 | 6,88 | 20   | 1,32  | 5490 | 170             | 51,5 | 0,08  | 3820 | 455 | 116  | 9,73 | 704  | 337055 |
| UL-250  | 0    | 1,216 | 6,68 | 21,8 | 1,37  | 5350 | 189             | 54,6 | 0,09  | 3600 | 445 | 121  | 8,48 | 778  | 330389 |
| UM-17   | 2    | 1,205 | 7,08 | 6,36 | 0,550 | 5320 | 82              | 6,19 | 0,082 | 4740 | 183 | 39,9 | 15,9 | 264  | 320740 |
| UM-100  | 1    | 1,216 | 6,83 | 13,3 | 0,675 | 5380 | 157             | 29,5 | 0,093 | 3960 | 307 | 80,5 | 10,6 | 556  | 324830 |
| UM-400  | 4    | 1,222 | 6,49 | 15,8 | 0,788 | 5270 | 271             | 42,6 | 0,093 | 4020 | 355 | 96,8 | 6,71 | 671  | 338180 |
| UN-16   | -1   | 1,219 | 6,53 | 24,4 | 1,55  | 5460 | 199             | 52,1 | 0,093 | 3720 | 460 | 125  | 8,83 | 786  | 338982 |
| UN-100  | 0,5  | 1,22  | 6,74 | 24,5 | 1,61  | 5440 | 201             | 54,7 | 0,077 | 3700 | 496 | 132  | 8,83 | 798  | 339790 |
| UN-300  | 1    | 1,225 | 6,39 | 28,1 | 1,66  | 5410 | 258             | 66,4 | 0,097 | 3500 | 496 | 141  | 6,11 | 893  | 342211 |
| UO-9    | -3   | 1,208 | 7,01 | 10,6 | 0,926 | 5380 | 121             | 23,1 | 0,09  | 4480 | 276 | 67,9 | 13,3 | 432  | 328915 |
| UO-100  | 5    | 1,22  | 6,69 | 20,8 | 1,17  | 5350 | 208             | 49,3 | 0,093 | 3880 | 425 | 113  | 8,53 | 733  | 336590 |
| UO-500  | 7    | 1,231 | 6,42 | 27,3 | 1,36  | 5350 | 375             | 82,5 | 0,11  | 3850 | 468 | 135  | 5,84 | 897  | 358415 |
| UP-17   | 0    | 1,218 | 6,65 | 21   | 1,48  | 5410 | 178             | 45   | 0,09  | 3590 | 417 | 109  | 9,43 | 687  | 327738 |
| UP-100  | 0    | 1,22  | 6,53 | 28,5 | 1,58  | 5440 | 219             | 61,2 | 0,085 | 3400 | 496 | 134  | 7,61 | 848  | 336111 |
| UP-500  | 4,5  | 1,225 | 6,45 | 22,9 | 1,51  | 5440 | 250             | 71,2 | 0,1   | 3360 | 486 | 136  | 7,03 | 877  | 338233 |
| UQ-17   | 4,5  | 1,204 | 6,96 | 7,77 | 0,725 | 5350 | 94              | 13   | 0,08  | 4830 | 192 | 45,1 | 14,4 | 300  | 326403 |
| UQ-100  | 2,5  | 1,208 | 6,73 | 9,43 | 0,788 | 5350 | 114             | 21,5 | 0,08  | 4520 | 242 | 57,5 | 13,3 | 387  | 325503 |
| UQ-450  | 2,5  | 1,21  | 6,85 | 9,66 | 0,775 | 5410 | 122             | 22,3 | 0,085 | 4390 | 247 | 59,2 | 13,6 | 410  | 326211 |
| UQ-800  | 3,5  | 1,211 | 6,78 | 10,3 | 0,788 | 5350 | 133             | 18,7 | 0,088 | 4270 | 256 | 61,1 | 12,7 | 428  | 323145 |
| UR-15   | -1   | 1,205 | 6,93 | 5,6  | 0,625 | 5350 | 84,3            | 5,91 | 0,077 | 4870 | 140 | 31,3 | 11,4 | 234  | 322322 |
| UR-100  | -0,5 | 1,207 | 6,89 | 6,81 | 0,675 | 5350 | 113             | 9,34 | 0,077 | 4650 | 204 | 45,2 | 14,1 | 333  | 325245 |
| UR-450  | 1    | 1,207 | 6,84 | 6,83 | 0,663 | 5300 | 117             | 12,4 | 0,077 | 4610 | 213 | 48,7 | 14,4 | 342  | 323574 |
| UR-800  | 3    | 1,215 | 6,43 | 17,9 | 0,613 | 5270 | 205             | 44,6 | 0,088 | 4430 | 289 | 59,5 | 10,3 | 514  | 334899 |
| US-9    | 5    | 1,201 | 6,78 | 5,51 | 0,575 | 5350 | 92,4            | 15,2 | 0,072 | 4700 | 170 | 39,8 | 14,4 | 261  | 321289 |
| US-100  | 4,5  | 1,209 | 6,58 | 6,03 | 0,663 | 5410 | 109             | 18   | 0,077 | 4610 | 204 | 45,2 | 15,1 | 314  | 325694 |
| US-450  | 5,5  | 1,216 | 6,81 | 17,6 | 0,650 | 5270 | 225             | 45,7 | 0,077 | 4320 | 307 | 56,1 | 10   | 461  | 333665 |
| US-800  | 6,5  | 1,224 | 6,67 | 26,3 | 0,725 | 5240 | 316             | 72,6 | 0,098 | 4390 | 358 | 67   | 7,33 | 556  | 348046 |
| UT-15   | 2    | 1,209 | 6,88 | 6,35 | 0,600 | 5350 | 105             | 18,3 | 0,097 | 4740 | 191 | 40,1 | 16   | 281  | 324880 |
| UT-100  | 3,5  | 1,203 | 6,86 | 6,32 | 0,613 | 5320 | 106             | 18,2 | 0,097 | 4650 | 188 | 39,9 | 15,6 | 287  | 321850 |
| UT-450  | 3,5  | 1,208 | 6,96 | 6,01 | 0,600 | 5350 | 106             | 18   | 0,09  | 4600 | 185 | 38,3 | 15,7 | 284  | 321545 |
| UT-800  | 5    | 1,21  | 6,89 | 7,64 | 0,663 | 5320 | 135             | 22,6 | 0,09  | 4610 | 225 | 47,1 | 13,3 | 342  | 326587 |
| UU-20   | 6    | 1,206 | 6,72 | 6,63 | 0,788 | 5300 | 128             | 25,3 | 0,11  | 4610 | 170 | 50,4 | 14,1 | 424  | 325081 |
| UU-350  | 10   | 1,211 | 6,57 | 6,53 | 0,663 | 5380 | 123             | 25,4 | 0,1   | 4480 | 194 | 41,9 | 13,3 | 369  | 323946 |
| UU-700  | 11   | 1,214 | 6,54 | 8,81 | 0,650 | 5300 | 200             | 30,3 | 0,11  | 4650 | 245 | 45,5 | 9,68 | 444  | 336208 |
| UV-10   | 9    | 1,208 | 6,76 | 5,4  | 0,625 | 5380 | 105             | 21,7 | 0,093 | 4780 | 165 | 34,9 | 15,7 | 335  | 327093 |
| UV-100  | 4,5  | 1,208 | 6,78 | 6,21 | 0,638 | 5350 | 110             | 22,6 | 0,097 | 4780 | 166 | 34,9 | 15,4 | 330  | 326474 |
| UV-500  | 3,5  | 1,208 | 6,86 | 6,02 | 0,650 | 5380 | 111             | 20,9 | 0,097 | 4700 | 163 | 34,9 | 15,4 | 330  | 325649 |
| UW-22   | 1,5  | 1,226 | 6,49 | 40,1 | 2,05  | 5630 | 196             | 99,9 | 0,11  | 3040 | 583 | 148  | 9,48 | 1140 | 344202 |
| UW-100  | 3    | 1,228 | 6,56 | 26,2 | 1,47  | 5520 | 148             | 81,2 | 0,098 | 3750 | 414 | 113  | 11,3 | 860  | 337341 |
| UX-90   | 3    | 1,226 | 6,37 | 35,1 | 2,29  | 5490 | 235             | 98,1 | 0,11  | 3130 | 453 | 163  | 7,33 | 1190 | 340708 |
| UX-300  | 4    | 1,228 | 6,4  | 35,3 | 2,25  | 5490 | 240             | 97,1 | 0,11  | 3130 | 458 | 170  | 7,66 | 1190 | 341497 |
| UY-16   | 5    | 1,208 | 6,89 | 6,83 | 0,575 | 5380 | 90,5            | 22   | 0,085 | 4830 | 162 | 36,6 | 18,1 | 296  | 325980 |
| UY-100  | 5    | 1,213 | 6,71 | 8,47 | 0,750 | 5350 | 116             | 29,1 | 0,093 | 4570 | 208 | 49   | 14,5 | 393  | 325672 |
| UY-300  | 7    | 1,22  | 6,74 | 20,5 | 0,951 | 5320 | 231             | 60,1 | 0,097 | 4250 | 322 | 72   | 8,83 | 597  | 338719 |
| UY-600  | 7,5  | 1,216 | 6,76 | 22,9 | 0,926 | 5300 | 258             | 65,9 | 0,097 | 4190 | 335 | 73,6 | 7,88 | 630  | 340711 |
| UZ-12   | 2    | 1,211 | 7,04 | 10,3 | 0,851 | 5380 | 103             | 28   | 0,093 | 4390 | 235 | 69,7 | 13,9 | 366  | 321975 |
| UZ-100  | 2,5  | 1,218 | 6,81 | 16,4 | 1,00  | 5380 | 170             | 51,5 | 0,098 | 4160 | 317 | 77,2 | 10,3 | 621  | 333067 |
| UZ-450  | 6    | 1,222 | 6,69 | 20   | 1,05  | 5410 | 201             | 56,2 | 0,098 | 4040 | 343 | 86,3 | 8,83 | 704  | 337660 |
| UZ-800  | 6    | 1,22  | 6,7  | 21,4 | 1,10  | 5350 | 203             | 61,5 | 0,097 | 3960 | 340 | 86,2 | 8,53 | 700  | 333801 |

| n°     | t°C  | dens. | pH   | alc. | Br    | Cl   | SO <sub>4</sub> | B    | Si    | Na   | K    | Li   | Ca   | Mg   | STD    |
|--------|------|-------|------|------|-------|------|-----------------|------|-------|------|------|------|------|------|--------|
| YA-17  | 2    | 1,207 | 7,09 | 11,1 | 0,863 | 5410 | 105             | 33,3 | 0,085 | 4430 | 315  | 62,7 | 14,4 | 392  | 327990 |
| YA-100 | 0    | 1,21  | 6,59 | 13,1 | 0,901 | 5380 | 143             | 44,7 | 0,093 | 4170 | 348  | 80,3 | 11,2 | 502  | 328799 |
| YB-11  | 4    | 1,202 | 7,15 | 3,99 | 0,450 | 5350 | 60,7            | 14,3 | 0,085 | 4830 | 120  | 20,7 | 18,9 | 180  | 317248 |
| YB-100 | 2,5  | 1,208 | 6,83 | 8,83 | 0,588 | 5350 | 106             | 27,7 | 0,098 | 4480 | 228  | 48,7 | 14,5 | 356  | 322517 |
| YB-500 | 4,5  | 1,213 | 6,72 | 14,9 | 0,788 | 5320 | 206             | 45,1 | 0,097 | 4050 | 330  | 76,9 | 9,08 | 580  | 331146 |
| YC-12  | 8    | 1,202 | 7,13 | 3,4  | 0,400 | 5380 | 52,8            | 9,53 | 0,093 | 4870 | 98,7 | 17,3 | 16,5 | 158  | 316897 |
| YC-100 | 2,5  | 1,204 | 6,88 | 5,8  | 0,475 | 5320 | 89              | 20,3 | 0,093 | 4650 | 165  | 33   | 15,9 | 274  | 318947 |
| YC-600 | 3,5  | 1,207 | 6,8  | 7,43 | 0,550 | 5300 | 122             | 23,4 | 0,098 | 4430 | 205  | 45,2 | 13,2 | 358  | 320066 |
| YD-9   | 7    | 1,203 | 7,11 | 6,42 | 0,625 | 5380 | 77,8            | 20   | 0,093 | 4650 | 165  | 33   | 18,9 | 248  | 319536 |
| YD-100 | 5    | 1,209 | 6,83 | 12,5 | 0,826 | 5410 | 150             | 39,5 | 0,11  | 4120 | 320  | 71,5 | 10,5 | 502  | 328105 |
| YD-450 | 5,5  | 1,217 | 6,71 | 18,2 | 0,976 | 5380 | 210             | 56,9 | 0,11  | 3920 | 371  | 89,5 | 8,5  | 638  | 334091 |
| YD-800 | 6,5  | 1,218 | 6,71 | 21,3 | 1,10  | 5410 | 236             | 64   | 0,11  | 3920 | 394  | 96,5 | 8,2  | 679  | 339860 |
| YE-8   | 10   | 1,205 | 7,13 | 5,93 | 0,613 | 5410 | 65,6            | 18,9 | 0,092 | 4780 | 147  | 27,8 | 16,5 | 218  | 320812 |
| YE-100 | 4,5  | 1,213 | 6,74 | 13,3 | 0,851 | 5410 | 158             | 40,5 | 0,11  | 4170 | 322  | 73,3 | 9,98 | 510  | 330348 |
| YE-450 | 6    | 1,247 | 6,75 | 26,5 | 1,01  | 5490 | 293             | 73,1 | 0,11  | 3980 | 412  | 97   | 6,83 | 708  | 351318 |
| YE-800 | 6    | 1,226 | 6,71 | 26,3 | 1,02  | 5380 | 285             | 73,2 | 0,11  | 3890 | 404  | 95,2 | 6,71 | 695  | 343919 |
| YF-23  | 4    | 1,202 | 7,06 | 3,11 | 0,250 | 5410 | 48,9            | 8,14 | 0,092 | 4910 | 79   | 10,4 | 25,7 | 122  | 317138 |
| YF-200 | 3    | 1,203 | 6,96 | 3,6  | 0,325 | 5350 | 65              | 13,2 | 0,092 | 4740 | 119  | 20,7 | 21,3 | 185  | 315725 |
| YG-15  | 7    | 1,211 | 6,94 | 9,87 | 0,625 | 5380 | 125             | 27,8 | 0,092 | 4350 | 271  | 75,1 | 11,8 | 453  | 326551 |
| YG-100 | 4    | 1,201 | 6,72 | 3,4  | 0,337 | 5380 | 62,7            | 15,2 | 0,098 | 4870 | 132  | 32,9 | 20,1 | 186  | 320157 |
| YH-1   | 9    | 1,26  | 5,86 | 65,7 | 4,54  | 5830 | 463             | 188  | 0,38  | 1620 | 685  | 354  | 2,5  | 2100 | 375471 |
| YH-100 | 8    | 1,246 | 5,74 | 72,4 | 4,63  | 5970 | 304             | 180  | 0,27  | 1480 | 509  | 373  | 3,42 | 2190 | 357753 |
| YH-250 | 8    | 1,245 | 5,71 | 75,3 | 4,71  | 6000 | 307             | 189  | 0,25  | 1410 | 509  | 373  | 2,17 | 2220 | 358455 |
| YI-8   | 11,5 | 1,207 | 6,95 | 7,82 | 0,763 | 5410 | 94,1            | 25,3 | 0,098 | 4570 | 225  | 52,2 | 12,9 | 346  | 325100 |
| YI-100 | 8,5  | 1,208 | 6,81 | 8,23 | 0,813 | 5410 | 99,9            | 28,2 | 0,11  | 4390 | 238  | 57,5 | 13,3 | 384  | 323063 |
| YI-450 | 6    | 1,209 | 6,82 | 8,6  | 0,838 | 5380 | 105             | 29,7 | 0,11  | 4350 | 254  | 59,2 | 12,7 | 405  | 322732 |
| YI-800 | 6,5  | 1,21  | 6,79 | 9,64 | 0,926 | 5380 | 120             | 32,5 | 0,095 | 4150 | 281  | 69,7 | 10,9 | 453  | 321895 |
| YJ-17  | 6,5  | 1,204 | 7,18 | 8,33 | 0,663 | 5440 | 84,5            | 25,1 | 0,085 | 4780 | 221  | 43,4 | 17,4 | 274  | 328307 |
| YJ-100 | 6    | 1,211 | 6,87 | 13,6 | 0,813 | 5460 | 133             | 39,6 | 0,1   | 4090 | 325  | 78,5 | 11,5 | 486  | 327520 |
| YJ-400 | 2,5  | 1,222 | 6,47 | 16,8 | 0,863 | 5320 | 283             | 57,4 | 0,12  | 3860 | 412  | 107  | 6,41 | 695  | 340527 |
| YK-1   | 17   | 1,204 | 7,08 | 7,41 | 0,725 | 5380 | 108             | 25,6 | 0,12  | 4570 | 210  | 46,8 | 17,7 | 320  | 324283 |
| YK-100 | 11,5 | 1,207 | 6,92 | 10,2 | 0,851 | 5410 | 122             | 29,6 | 0,12  | 4390 | 261  | 59,1 | 13,2 | 406  | 326764 |
| YK-400 | 10   | 1,216 | 6,62 | 10,3 | 0,913 | 5350 | 250             | 48,3 | 0,12  | 4070 | 355  | 84,1 | 7,58 | 621  | 338624 |
| YK-700 | 9,5  | 1,22  | 6,6  | 15,2 | 0,951 | 5320 | 281             | 53,3 | 0,11  | 4240 | 391  | 91,4 | 7,01 | 675  | 347548 |
| YL-22  | 6    | 1,201 | 7,05 | 3,91 | 0,350 | 5410 | 65,1            | 13   | 0,088 | 4870 | 126  | 22,5 | 19,8 | 180  | 320977 |
| YL-100 | 3,5  | 1,209 | 6,71 | 8,05 | 0,550 | 5440 | 133             | 30   | 0,092 | 4430 | 245  | 54   | 12,1 | 386  | 328462 |
| YL-400 | 3    | 1,209 | 6,72 | 8,81 | 0,575 | 5380 | 154             | 33,3 | 0,088 | 4350 | 269  | 61   | 10,5 | 428  | 328535 |
| RIO-95 | 4    | 1,279 | 4,98 | 155  | 7,49  | 7120 | 276             | 401  | 0,395 | 467  | 385  | 680  | 2,54 | 3100 | 39618  |
| RA-130 | 7    | 1,005 | 7,52 | 4,97 | NA    | 95,2 | 6,25            | 1,94 | 0,85  | 67,4 | 2,05 | 1,44 | 10,7 | 8,11 | 6620   |
| RB-180 | 7    | 1,019 | 6,75 | 5,44 | NA    | 352  | 25              | 2,92 | 1,03  | 289  | 7,67 | 3,82 | 29,9 | 23,3 | 24059  |
| RC-120 | 7    | 1,05  | 7,16 | 10,1 | 0,250 | 1130 | 59,4            | 10,7 | 1,07  | 852  | 46   | 21,5 | 21,1 | 140  | 72424  |
| RD-160 | 7    | 1,093 | 5,88 | 8,02 | 0,463 | 2240 | 53,3            | 23,1 | 0,783 | 1730 | 81,8 | 31,2 | 48,6 | 192  | 135279 |
| RE-100 | 7    | 1,143 | 5,5  | 11,4 | 0,638 | 3630 | 37,5            | 44,5 | 0,55  | 2680 | 157  | 82,9 | 66,6 | 356  | 213401 |
| RF-90  | 7    | 1,151 | 6,75 | 15,1 | 0,926 | 3800 | 59,4            | 77,4 | 0,267 | 2830 | 187  | 90,9 | 41,4 | 388  | 226571 |
| RG-30  | 7    | 1,164 | 7,32 | 21   | 1,15  | 4140 | 79,7            | 50,5 | 0,037 | 3010 | 202  | 97,1 | 31,2 | 469  | 246991 |
| RH-10  | 7    | 1,21  | 7,12 | 14,8 | 1,08  | 5350 | 116             | 34   | 0,108 | 4240 | 269  | 77,5 | 14,1 | 420  | 321771 |
| RI-15  | 7    | 1,198 | 7    | 17,5 | 1,43  | 4820 | 163             | 46,9 | 0,037 | 3560 | 317  | 106  | 11,4 | 556  | 297427 |
| RJ-10  | 7    | 1,215 | 7    | 19,9 | 1,86  | 5350 | 133             | 57,9 | 0,037 | 4160 | 281  | 91,2 | 9,73 | 469  | 323770 |
| RK-90  | 7,8  | 1,151 | 6,97 | 15   | NA    | 3860 | 53,1            | 94,4 | 0,2   | 2720 | 200  | 101  | 48,1 | 432  | 227582 |
| RL-110 | 12,6 | 1,112 | 7,02 | 12,7 | NA    | 2720 | 50,3            | 89,8 | 0,467 | 1980 | 128  | 60,1 | 63,1 | 265  | 163094 |
| RM-100 | 12,6 | 1,092 | 7,32 | 9,25 | NA    | 2260 | 53,1            | 29,4 | 0,933 | 1610 | 115  | 50   | 53,1 | 238  | 136051 |
| RN-75  | 6    | 1,149 | 7,06 | 5,5  | NA    | 3720 | 52,1            | 45,4 | 0,108 | 3440 | 115  | 51,7 | 50,4 | 160  | 227778 |
| RO-80  | 6,5  | 1,139 | 7,22 | 12   | NA    | 3440 | 75              | 89,3 | 0,095 | 2720 | 138  | 69,6 | 39,7 | 277  | 207785 |
| RP-50  | 4    | 1,099 | 7,25 | 2,46 | NA    | 2310 | 62,4            | 12,7 | 0,128 | 1980 | 71,6 | 26,2 | 48,9 | 95,9 | 141103 |
| RQ-70  | 8,3  | 1,126 | 7,09 | 6,5  | NA    | 3100 | 101             | 46,9 | 0,25  | 2720 | 115  | 39,2 | 32,9 | 217  | 194585 |
| RR-60  | 8,3  | 1,163 | 7,49 | 10   | NA    | 4090 | 75,5            | 38,8 | 0,035 | 3830 | 115  | 34,4 | 30,9 | 170  | 251669 |
| RS-15  | 5    | 1,273 | 5,43 | 109  | NA    | 6510 | 327             | 342  | 0,35  | 544  | 450  | 610  | 1,31 | 2840 | 376272 |
| RT-15  | 5    | 1,272 | 5,44 | 107  | NA    | 6450 | 307             | 326  | 0,333 | 609  | 450  | 581  | 1,5  | 2830 | 372984 |
| RU-1   | 3    | 1,243 | 6,58 | 45   | NA    | 5580 | 322             | 131  | 0,1   | 2880 | 675  | 231  | 5,94 | 1120 | 354859 |
| RV-20  | 6    | 1,216 | 7,13 | 14,5 | NA    | 5320 | 145             | 46,9 | 0,035 | 4390 | 299  | 81,1 | 10,3 | 551  | 331199 |
| RW-10  | 6    | 1,224 | 6,8  | 15,5 | NA    | 5380 | 206             | 57,6 | 0,068 | 4240 | 402  | 110  | 8,43 | 621  | 341768 |
| RX-10  | 4    | 1,269 | 5,67 | 106  | NA    | 6280 | 333             | 319  | 0,4   | 926  | 489  | 512  | 1,74 | 2510 | 369883 |
| RIO-58 | 5    | 1,16  | 6,98 | 14,3 | NA    | 3900 | 63,5            | 70,9 | 0,092 | 2740 | 175  | 110  | 45,9 | 481  | 230345 |
| RIO-95 | 4    | 1,279 | 4,98 | 155  | 7,49  | 7120 | 276             | 401  | 0,395 | 467  | 385  | 680  | 2,54 | 3100 | 399618 |
| CA-0   | 20   | 1,235 | 7,46 | 29,8 | 1,25  | 5200 | 293             | 66,9 | 0,25  | 4575 | 236  | 34,2 | 7,85 | 447  | 341149 |
| CA-150 | 17   | 1,244 | 7,23 | 27,9 | 1,26  | 4850 | 562             | 80,5 | 0,046 | 4525 | 256  | 39,6 | 4,85 | 579  | 357324 |

| n°     | t°C  | dens. | pH   | alc.  | Br      | Cl   | SO <sub>4</sub> | B     | Si    | Na   | K     | Li    | Ca    | Mg    | STD    |
|--------|------|-------|------|-------|---------|------|-----------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| CA-250 | 13   | 1,264 | 7,59 | 22,7  | NA      | 3725 | 1088            | 59,6  | 0,05  | 4825 | 213   | 30,6  | 4,1   | 433   | 368917 |
| CB-0   | 20   | 1,233 | 7,54 | 29,4  | 1,25    | 5275 | 305             | 63,8  | 0,346 | 4678 | 235   | 34,2  | 7,5   | 441   | 347180 |
| CB-150 | 17   | 1,264 | 7,01 | 49,6  | 1,96    | 4725 | 834             | 124,5 | 0,07  | 4117 | 365   | 60    | 2,55  | 945   | 384778 |
| COI-1  | 20,5 | 1,213 | 7,38 | 18,4  | 1,01    | 5330 | 153             | 55,6  | 0,1   | 4540 | 182   | 28,5  | 13,5  | 420   | 328194 |
| COI-2  | 18,5 | 1,218 | 7,18 | 33,1  | 1,71    | 5300 | 183             | 88,1  | 0,17  | 4310 | 297   | 48    | 13    | 620   | 335499 |
| COI-3  | 18,5 | 1,221 | 7,23 | 18,8  | 0,976   | 5050 | 270             | 56,8  | 0,063 | 4730 | 187   | 29,6  | 7,95  | 415   | 333747 |
| COI-4  | 8,5  | 1,217 | 7,38 | 26,4  | 1,25    | 5280 | 188             | 59,2  | 0,19  | 4670 | 219   | 33,1  | 12,7  | 445   | 335373 |
| COI-5  | 9,5  | 1,211 | 7,52 | 18,8  | 0,901   | 5250 | 145             | 39,6  | 0,26  | 4810 | 153   | 22,2  | 18,4  | 280   | 326264 |
| TAR-5  | 13   | 1,078 | 6,58 | 1,24  | 7E-3    | 1880 | 45              | 0,548 | 0,367 | 1780 | 1,71  | 0,169 | 55,6  | 7,65  | 114588 |
| TAR-10 | 17   | 1,196 | 6,32 | 0,771 | 9,5E-3  | 5220 | 49,3            | 1,28  | 0,25  | 5180 | 1,55  | 0,248 | 39,2  | 9,16  | 311117 |
| TAR-12 | 14   | 1,142 | 6,89 | 1,35  | 0,011   | 3680 | 53,5            | 1,2   | 0,483 | 3540 | 1,31  | 0,233 | 49,6  | 9,67  | 219598 |
| TAR-14 | 14   | 1,054 | 7,66 | 1,58  | 0,013   | 1230 | 41,5            | 0,728 | 0,42  | 1140 | 1,3   | 0,36  | 54,6  | 11,6  | 76524  |
| TAR-15 | 15   | 1,035 | 7,42 | 1,03  | 0,045   | 765  | 28              | 1,21  | 0,338 | 690  | 1,48  | 0,764 | 43,8  | 16,8  | 48043  |
| TITIC  | 11   | 1,001 | 8,6  | 1,97  | 1,25E-3 | 7,6  | 2,8             | 0,14  | 0,03  | 8,4  | 0,43  | 0,05  | 1,54  | 1,53  | 965    |
| MAURI  | 10   | 1     | 8,25 | 2,04  | 9,01E-3 | 7,38 | 0,363           | 0,796 | 0,683 | 7,04 | 0,555 | 0,143 | 0,638 | 0,436 | 690    |
| LAUCA  | 10   | 1,001 | 8,34 | 4,36  | 7,88E-3 | 9,32 | 2,39            | 0,398 | 1,23  | 11,3 | 0,829 | 0,115 | 1,32  | 1,83  | 1292   |

## Liste des figures

|    |                                                                                                                                        |     |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1  | Distribution des zones arides dans le monde . . . . .                                                                                  | 142 |
| 2  | L'Altiplano et ses principaux bassins hydrologiques . . . . .                                                                          | 143 |
| 3  | Modèle d'un lac permanent en climat aride . . . . .                                                                                    | 146 |
| 4  | Diagramme théorique d'évolution des eaux soumises à l'évaporation . . . . .                                                            | 150 |
| 5  | Carte géologique de l'Altiplano bolivien . . . . .                                                                                     | 151 |
| 6  | Coupe géologique simplifiée à travers les Andes centrales . . . . .                                                                    | 152 |
| 7  | Isothermes et isohyètes du Sud-Ouest de la Bolivie . . . . .                                                                           | 153 |
| 8  | Distribution mensuelle des précipitations, de l'évaporation potentielle et de la température à Patacamaya en 1977 . . . . .            | 153 |
| 9  | Coupe schématique N-S à travers l'Altiplano . . . . .                                                                                  | 155 |
| 10 | Extension du paléolac Tauca, 13 000–10 000 ans B.P. . . . .                                                                            | 157 |
| 11 | Tentative de corrélation entre les phases lacustres des grands bassins de l'Altiplano . . . . .                                        | 157 |
| 12 | Classification morphologique des salars boliviens . . . . .                                                                            | 158 |
| 13 | Localisation et classification des salars du Lipéz . . . . .                                                                           | 160 |
| 14 | Teneurs en Na et Cl des eaux d'apports des salars du Lipéz . . . . .                                                                   | 162 |
| 15 | Composition des eaux d'apport des salars du Lipéz . . . . .                                                                            | 163 |
| 16 | Teneurs en Li et B des eaux d'apport des salars du Lipéz en fonction de la salinité et de la température . . . . .                     | 165 |
| 17 | Concentrations en Ca et Ca + Mg en fonction de l'alcalinité dans les eaux d'apport des salars du Lipéz . . . . .                       | 166 |
| 18 | Composition des saumures des salars du Lipéz . . . . .                                                                                 | 166 |
| 19 | Frustule de diatomée presque entièrement transformé en smectite (a). Frustule non transformé (b) . . . . .                             | 167 |
| 20 | Teneur en soufre des diverses fractions de sédiments superficiels . . . . .                                                            | 168 |
| 21 | Composition anionique des eaux de lavage des trois fractions des sédiments superficiels . . . . .                                      | 168 |
| 22 | Concentrations en Ca et Ca + Mg en fonction de l'alcalinité des eaux de lavage des trois fractions de sédiments superficiels . . . . . | 168 |
| 23 | Relation entre bassins versants, eaux diluées et faciès chimiques des salars du Lipéz . . . . .                                        | 170 |
| 24 | Localisation des sondages . . . . .                                                                                                    | 171 |
| 25 | Courbes d'iso-épaisseur de la croûte de sel du salar d'Uyuni . . . . .                                                                 | 172 |
| 26 | Coprolites d'Artemia . . . . .                                                                                                         | 173 |
| 27 | Bloc-diagramme dans la croûte de sel du salar d'Uyuni . . . . .                                                                        | 173 |

|    |                                                                                                         |     |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 28 | Courbes d'isoconcentration moyennes du lithium dans la saumure intracrustale du salar d'Uyuni . . . . . | 174 |
| 29 | Bordure SE du salar d'Uyuni, à l'embouchure du Rio Grande . . . . .                                     | 176 |
| 30 | Concentrations en Li, K, Mg, B des eaux du paléolac Tauca . . . . .                                     | 180 |
| 31 | Teneur en brome de la halite dans six profils à travers la croûte du salar d'Uyuni . . . . .            | 182 |
| 32 | Répartition initiale du sel au cours de l'assèchement du paléolac Tauca . . . . .                       | 185 |
| 33 | Le sondage profond dans le salar d'Uyuni . . . . .                                                      | 186 |
| 34 | Teneur en brome de la halite des croûtes de sel du sondage profond . . . . .                            | 187 |
| 35 | Rapport Br/Cl en fonction de Cl des eaux et saumures des sources du diapir de Tarcamaya                 | 189 |
| 36 | L'origine du sel dans les croûtes de la dépression centrale de l'Altiplano . . . . .                    | 191 |

## Liste des tableaux

|   |                                                                                                                                                         |     |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1 | Bilans hydriques annuels de quelques lacs . . . . .                                                                                                     | 145 |
| 2 | Données climatiques de l'Altiplano bolivien . . . . .                                                                                                   | 152 |
| 3 | Compositions moyennes des eaux d'apport des salars du Lipez, comparées aux eaux d'altération des roches volcaniques acides d'Amérique du Nord . . . . . | 164 |
| 4 | Masses des constituants du salar d'Uyuni et ordres de grandeur des apports par le Rio Grande depuis 10 000 ans . . . . .                                | 175 |
| 5 | Masses des constituants du salar de Coipasa et ordres de grandeur des apports par le Rio Lauca depuis 10 000 ans . . . . .                              | 177 |
| 6 | Reconstitution de la chimie du paléolac Tauca . . . . .                                                                                                 | 179 |
| 7 | Masses de brome dans les salars d'Uyuni et de Coipasa . . . . .                                                                                         | 184 |
| 8 | Composition minéralogique des croûtes de sel profondes . . . . .                                                                                        | 188 |

## Table des matières

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| INTRODUCTION . . . . .                                                                                        | 140 |
| I – UBIQUITÉ ET DIVERSITÉ DES LACS SALÉS . . . . .                                                            | 141 |
| A – Distribution globale . . . . .                                                                            | 141 |
| B – Les mécanismes généraux de la salinisation des eaux . . . . .                                             | 142 |
| 1. L'acquisition des solutés . . . . .                                                                        | 142 |
| 2. Bilans hydriques et salinisation . . . . .                                                                 | 144 |
| C – Diversité chimique des évaporites continentales . . . . .                                                 | 147 |
| II – PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES SALARS DE L'ALTIPLANO BOLIVIEN . . . . .                                       | 150 |
| A – Géologie . . . . .                                                                                        | 150 |
| B – Climat . . . . .                                                                                          | 152 |
| C – Hydrologie actuelle . . . . .                                                                             | 154 |
| D – Paléolimnologie de l'Altiplano . . . . .                                                                  | 155 |
| 1. L'Altiplano nord . . . . .                                                                                 | 155 |
| 2. L'Altiplano central . . . . .                                                                              | 156 |
| 3. L'Altiplano sud . . . . .                                                                                  | 156 |
| E – Morphologie simplifiée des salars de l'Altiplano . . . . .                                                | 158 |
| III – LES PETITS SALARS DU LIPEZ : FONCTIONNEMENT ACTUEL DE SYSTÈMES<br>INDÉPENDANTS . . . . .                | 159 |
| A – L'origine des solutés . . . . .                                                                           | 159 |
| 1. Les solutés apportés par les précipitations . . . . .                                                      | 159 |
| 2. Les solutés provenant de la dissolution d'anciennes évaporites . . . . .                                   | 161 |
| 3. Les solutés liés à l'altération des roches volcaniques . . . . .                                           | 161 |
| 4. Les solutés liés aux sources thermales . . . . .                                                           | 161 |
| B – L'évolution des eaux du Lipéz au cours de l'évaporation . . . . .                                         | 162 |
| 1. Application du modèle de HARDIE et EUGSTER . . . . .                                                       | 162 |
| 2. Le rôle du soufre éolien . . . . .                                                                         | 165 |
| Conclusions sur les salars du Lipéz . . . . .                                                                 | 169 |
| IV – LE SYSTÈME COUPLÉ DES SALARS D'UYUNI ET DE COIPASA : FONCTIONNE-<br>MENT ACTUEL ET QUATERNAIRE . . . . . | 170 |
| A – La croûte de sel du salar d'Uyuni . . . . .                                                               | 171 |
| 1. Morphologie . . . . .                                                                                      | 171 |
| 2. Les réserves du salar d'Uyuni . . . . .                                                                    | 172 |

|                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3. Le gisement de Rio Grande . . . . .                                                    | 174 |
| B – Le salar de Coipasa . . . . .                                                         | 176 |
| C – Le paléolac Tauca . . . . .                                                           | 177 |
| 1. Reconstitution de la composition obtenue par dissolution de la croûte . . . . .        | 177 |
| 2. Reconstitution de la composition obtenue par évaporation des apports . . . . .         | 178 |
| D – Origine du sel : utilisation de la géochimie du brome dans le salar d'Uyuni . . . . . | 180 |
| 1. Principes de la géochimie du brome . . . . .                                           | 180 |
| 2. Distribution et teneurs du brome dans le salar d'Uyuni . . . . .                       | 182 |
| 3. Modélisation de la distribution verticale du brome dans le salar d'Uyuni . . . . .     | 183 |
| 4. Le brome dans la partie supérieure de la croûte de sel . . . . .                       | 184 |
| 5. Le brome dans la partie inférieure de la croûte de sel . . . . .                       | 184 |
| E – Evolution quaternaire de l'Altiplano central : le sondage profond . . . . .           | 186 |
| 1. Excès de sel dans le système . . . . .                                                 | 186 |
| 2. Origine possible du sel : les diapirs de gypse de l'Altiplano . . . . .                | 187 |
| 3. Les croûtes profondes . . . . .                                                        | 188 |
| 4. Les croûtes intermédiaires et supérieures . . . . .                                    | 190 |
| Conclusions sur les évaporites de l'Altiplano central . . . . .                           | 191 |
| CONCLUSIONS GÉNÉRALES . . . . .                                                           | 193 |
| BIBLIOGRAPHIE . . . . .                                                                   | 194 |
| Planches . . . . .                                                                        | 199 |
| Annexe . . . . .                                                                          | 205 |
| Liste des figures et des tableaux . . . . .                                               | 211 |



## TABLE DES MATIÈRES DU TOME 45 (1992)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| B. FRITZ – Avant-propos au fascicule <i>Georges MILLOT. Homme, savant, "Grand Commis de l'Etat"</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1   |
| A. EMRAN et J. CHOROWICZ – La tectonique polyphasée dans la boutonnière précambrienne de Bou Azzer (Anti-Atlas central, Maroc) : apports de l'imagerie spatiale Landsat-MSS et de l'analyse structurale de terrain. <i>The Panafrikan tectonic events in the eroded anticline of Bou Azzer (Central Anti-Atlas, Morocco), from Landsat-MSS imagery and field structural analysis</i> .....                               | 121 |
| E. FRITSCH, E. PETERSCHMITT et A.J. HERBILLON – A structural approach to the regolith : identification of structures, analysis of structural relationships and interpretations. <i>Une approche structurale appliquée aux couvertures pédologiques : identification des structures, analyse des relations structurales et interprétations</i> .....                                                                      | 77  |
| D. GRIMAUD, G. BLANC, J.L. CHARLOU, Ph. JEAN-BAPTISTE and L. DMITRIEV – Manganese, methane and helium anomalies in sea water above the Mid-Atlantic Ridge : evidence of hydrothermal activity. <i>Anomalies de manganèse, méthane et hélium dans la colonne d'eau de mer au droit de la ride-médioatlantique : des évidences d'activité hydrothermale</i> .....                                                          | 61  |
| H. PAQUET – Vie et oeuvre de Georges MILLOT (27 mai 1917 – 10 septembre 1991) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 5   |
| H. PAQUET – Documents réunis pour le fascicule <i>Georges MILLOT. Homme, savant, "Grand Commis de l'Etat"</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 21  |
| K. REGAYA – Les croûtes calcaires de Tunisie orientale aux environs de Sousse. Signification climatique et historique. <i>Calcretes from Eastern Tunisia near Sousse. Climatological and historical significance</i> .....                                                                                                                                                                                               | 99  |
| F. RISACHER – Géochimie des lacs salés et croûtes de sel de l'Altiplano bolivien. <i>Geochemistry of saline lakes and salt crusts of the Bolivian Altiplano. Geoquímica de los lagos salados y costras salinas del Altiplano Boliviano</i> .....                                                                                                                                                                         | 135 |
| D. SAEHR, R. LE DRED and J. BARON – $K^+ \rightleftharpoons Na^+$ ion exchanges and availability of two groups of exchange sites in a vermiculite. II. Variability of the equivalent fraction of the two groups. <i>Echanges d'ions <math>K^+ \rightleftharpoons Na^+</math> et existence de deux groupes de sites d'échange dans une vermiculite. II. Variabilité des fractions équivalentes des deux groupes</i> ..... | 109 |
| Rapport succinct concernant la revue <i>Sciences Géologiques</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 215 |
| Instructions aux auteurs. <i>Editorial guidelines for the manuscripts</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 217 |

# SCIENCES GÉOLOGIQUES

## BULLETIN ET MÉMOIRES

Directeur de la Publication : Bertrand FRITZ  
Editeur : Institut de Géologie, Université Louis Pasteur de Strasbourg  
et Centre de Géochimie de la Surface (CNRS)

### DERNIERS MÉMOIRES PARUS

- N° 74 — **Decarreau A.** (1983) — Etude expérimentale de la cristallogenèse des smectites. Mesures des coefficients de partage smectite trioctaédrique – solution aqueuse pour les métaux  $M^{2+}$  de la première série de transition.
- N° 75 — **Schaaf A.** (1984) — Les Radiolaires du Crétacé inférieur et moyen : biologie et systématique.
- N° 76 — **Gueddari M.** (1984) — Géochimie et thermodynamique des évaporites continentales. Etude du Lac Natron en Tanzanie et du Chott el Jerid en Tunisie.
- N° 77 — **Lucas J. et Prévôt L.** (1985) — Phosphorites. Sixth international field-workshop and seminar on phosphorites. I.G.C.P. 156, oct.-nov. 1983.
- N° 78 — **Gauthier-Lafaye F.** (1986) — Les gisements d'uranium du Gabon et les réacteurs d'Oklo. Modèle métallogénique de gîtes à fortes teneurs du Protérozoïque inférieur.
- N° 79 — **Vallès V.** (1987) — Modélisation des transferts d'eau et de sels dans un sol argileux. Application au calcul des doses d'irrigation.
- N° 80 — **Kam M.** (1988) — Simulation physico-chimique de l'évolution hydrothermale des milieux poreux ou fissurés.
- N° 81 — **Trolard F.** (1988) — Physico-chimie des cuirasses latéritiques. Domaines de stabilité des oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium.
- N° 82 — **Duplay J.** (1989) — Géochimie des argiles et géothermométrie des populations minérales de particules.
- N° 83 et 84 — **Gélard J.P et Beauchamp J.** (éd.) (1989) — Colloque franco-marocain de Géologie, Strasbourg, 24-26 mai 1989. Volume I : Cycles précambriens et cycle hercynien. Cycle alpin (début). Volume II : Cycle alpin (fin). Quaternaire.
- N° 85 à 89 — **Farmer V.C. and Tardy Y.** (éd.) (1990) — Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Clay Conference, Strasbourg, 1989. Volume I (n° 85) : Clay-organic interactions. Clay minerals in soils. Volume II (n° 86) : Surface chemistry. Structure and mixed layering of clays. Volume III (n° 87) : Geochemistry of clays. Nuclear waste disposal. Volume IV (n° 88) : Clays in sediments. Diagenesis and hydrothermalism. Volume V (n° 89) : Industrial applications of clays. Analytical techniques and teaching of clay mineralogy.
- N° 90 — **Mertz J.D.** (1991) — Rôle des structures de porosité dans des propriétés de transport. Application aux gerts du Buntsandstein et du Brent (Alwyn, Mer du Nord).
- N° 91 — **Benedetti M.** (1991) — Géochimie de l'or : mécanismes de transport et de dépôt.
- N° 92 — **Proust J.N.** (1992) — Expression sédimentologique et modélisation des fluctuations glaciaires. Exemple des dépôts du Protérozoïque terminal au Mali occidental.
- N° 93 — **Orange D.** (1992) — Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique (Afrique de l'Ouest).
- N° 94 — **Probst J.L.** (1992) — Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale. Mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années.
- N° 95 — **Travi Y.** (1993) — Hydrogéologie et hydrogéochimie des aquifères du Sénégal. Hydrogéochimie du fluor dans les eaux souterraines.

Editions de l'Institut de Géologie  
1, rue Blessig, 67084 STRASBOURG Cedex (France)

Dépôt légal :  
1<sup>e</sup> semestre 1994

---

Equipe de réalisation technique : MM. J.M. Bock (impression, photographie), A. Wendling et J.P. Schuster (assemblage, reliure)

---

# SCIENCES GÉOLOGIQUES

Sci. Géol., Bull., 45, 3-4, Strasbourg, 1992

## GÉOCHIMIE DES LACS SALÉS ET CROÛTES DE SEL DE L'ALTIPLANO BOLIVIEN *GEOCHEMISTRY OF SALINE LAKES AND SALT CRUSTS OF THE BOLIVIAN ALTIPLANO* GEOQUIMICA DE LOS LAGOS SALADOS Y COSTRAS SALINAS DEL ALTIPLANO BOLIVIANO

par François RISACHER

### SOMMAIRE

|                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| INTRODUCTION . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                | 140 |
| I - UBIQUITÉ ET DIVERSITÉ DES LACS SALÉS . . . . .                                                                                                                                                                                                                                    | 141 |
| Distribution globale - Les mécanismes généraux de la salinisation des eaux - Diversité chimique des évaporites continentales                                                                                                                                                          |     |
| II - PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES SALARS DE L'ALTIPLANO BOLIVIEN . . . . .                                                                                                                                                                                                               | 150 |
| Géologie - Climat - Hydrologie actuelle - Paléolimnologie de l'Altiplano - Morphologie simplifiée des salars de l'Altiplano                                                                                                                                                           |     |
| III - LES PETITS SALARS DU LIPEZ : FONCTIONNEMENT ACTUEL DE SYSTÈMES INDÉPENDANTS . . . . .                                                                                                                                                                                           | 159 |
| L'origine des solutés - L'évolution des eaux du Lipéz au cours de l'évaporation - Conclusions sur les salars du Lipéz                                                                                                                                                                 |     |
| IV - LE SYSTÈME COUPLÉ DES SALARS D'UYUNI ET DE COIPASA : FONCTIONNEMENT ACTUEL ET QUATERNAIRE . . . . .                                                                                                                                                                              | 170 |
| La croûte de sel du salar d'Uyuni - Le salar de Coipasa - Le paléolac Tauca - Origine du sel : utilisation de la géochimie du brome dans le salar d'Uyuni - Evolution quaternaire de l'Altiplano central : le sondage profond - Conclusions sur les évaporites de l'Altiplano central |     |
| CONCLUSIONS GÉNÉRALES . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                       | 193 |
| BIBLIOGRAPHIE . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                               | 194 |
| Planches . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                    | 199 |
| Annexe . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                      | 205 |
| Liste des figures et des tableaux . . . . .                                                                                                                                                                                                                                           | 211 |
| Table des matières . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                          | 213 |

---

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Rapport succinct concernant la revue <i>Sciences Géologiques</i> . . . . .          | 215 |
| Instructions aux auteurs. <i>Editorial guidelines for the manuscripts</i> . . . . . | 217 |
| Table des matières du tome 45 (1992) . . . . .                                      | 219 |

Couverture : Salar d'Uyuni. Vue NW à partir de l'"île du Poisson" à travers les importants encroûtements calcaires du niveau stromatolithique. *Salar of Uyuni. NW sight from the "Fish Island", through the important calcareous crusts from the stromatolithic level.* Salar de Uyuni. Vista NO desde la "isla del Pescado" a través de las importantes costras calcáreas de los niveles stromatolíticos

Cliché B. Fritz