

**GÉOCHIMIE.** — Concentrations extrêmes en molybdène, tungstène et arsenic dans les saumures d'un lac de l'Altiplano de Bolivie. Indication métallogénique.

Note de François Risacher, Jean Samuel et Gérard Krempp, présentée par Georges Millot.

Remise le 5 novembre 1984.

Les plus fortes concentrations jamais trouvées en molybdène dans des eaux naturelles ont été mesurées dans les saumures carbonatées sodiques d'un lac (*Cachi Laguna*) de l'Altiplano de Bolivie. Les teneurs atteignent 49 mg/l, accompagnées de tungstène (20 mg/l) et d'arsenic (2 300 mg/l). Précieux indices géochimiques, ces teneurs en molybdène témoignent d'une concentration métallifère dans les roches volcaniques du bassin versant.

**GEOCHEMISTRY.** — Very High Concentrations of Molybdenum, Tungsten and Arsenic in Brines of a Soda Lake in the Bolivian Altiplano.

The highest concentrations yet reported for molybdenum in natural waters were found in brines of a soda lake in the Bolivian Altiplano: up to 49 mg/l (also: 20 mg/l of tungsten and 2,300 mg/l of arsenic). Such a concentration is likely to reflect a strong molybdenum anomaly in the catchment area.

**I. LE CADRE GÉNÉRAL : L'ALTIPLANO DE BOLIVIE.** — Le Sud de l'Altiplano de Bolivie a été affecté au Quaternaire par un intense volcanisme acide. Les laves ont isolé de nombreux petits bassins fermés d'altitude élevée (4 000-4 500 m), dans lesquels se sont mis en place des lacs salés de chimisme très varié : sulfates de calcium, chlorures, sulfates et carbonates de sodium, borates de sodium et de calcium [1]. On a découvert, dans les saumures de l'un des lacs carbonatés sodiques, *Cachi Laguna*, les plus fortes concentrations jamais trouvées en molybdène, ainsi que des teneurs extrêmement élevées en arsenic et en tungstène.

**II. DESCRIPTION DU LAC CARBONATÉ SODIQUE.** — La localisation de *Cachi Laguna* est indiquée sur la figure 1. Le lac est situé à 4 500 m d'altitude. Son bassin de drainage (240 km<sup>2</sup>) est exclusivement volcanique (rhyodacites). Deux lignes de sources vives et diffuses, l'une à l'Est, l'autre à l'Ouest, alimentent une nappe subaffleurante dans les sables et gravats qui constituent le fond du bassin. La lame d'eau affleurante, d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur, a une forme très irrégulière. Soumise à une évaporation intense (1 700 mm/an) elle donne naissance à des saumures carbonatées sodiques qui

TABLEAU

Analyses des deux saumures les plus concentrées de *Cachi Laguna* (mg/l). Pour le molybdène, la première valeur a été obtenue par spectrométrie d'émission à plasma ICP et la seconde par absorption atomique.

Chemical analysis of the two most concentrated brines of *Cachi Laguna* (mg/l). For molybdenum, the first value was obtained by ICP plasma emission spectrometry, and the second one by atomic absorption.

	1	2		1	2
Température . . . . .	21°C	25°C	F . . . . .	40	70
Densité . . . . .	1,196	1,238	As . . . . .	438	2 300
pH . . . . .	10,39	10,05	Na . . . . .	80 000	92 000
CO <sub>3</sub> . . . . .	81 000	75 000	K . . . . .	19 700	35 600
Cl . . . . .	32 000	57 200	Li . . . . .	416	848
SO <sub>4</sub> . . . . .	25 900	35 800	Ca . . . . .	4,9	6,0
B . . . . .	1 210	2 500	Mg . . . . .	0,7	2,9
Si . . . . .	255	202	Mo . . . . .	25-27	48-50
P . . . . .	160	230	W . . . . .	11	20

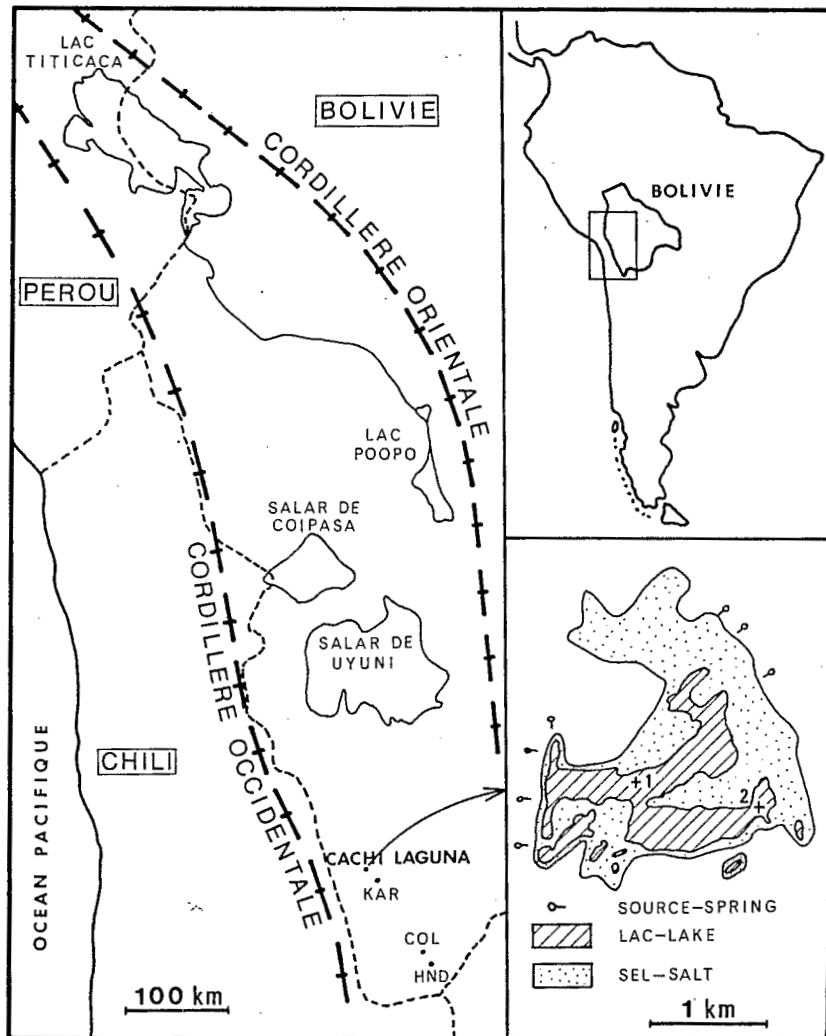


Fig. 1. — Localisation de Cachi Laguna et des autres lacs carbonatés sodiques de l'Altiplano bolivien.  
 KAR, Kara Laguna; COL, Collpa Laguna; HND, Honda Sur.

Fig. 1. — Location of Cachi Laguna and other soda lakes of the Bolivian Altiplano.

précipitent principalement le natron ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ). Les analyses de deux saumures les plus concentrées, recueillies en été, sont données dans le tableau. Les points d'échantillonnage sont indiqués sur la figure 1.

III. CONCENTRATIONS EXTRÊMES EN MOLYBDÈNE, TUNGSTÈNE ET ARSENIC DANS LES SAUMURES.  
 — *Méthodes analytiques.* — Les saumures ont été filtrées sur un filtre de  $0,05 \mu\text{m}$ . Molybdène, tungstène et arsenic ont été dosés par spectrométrie d'émission à plasma ICP [2]. Le molybdène a été analysé une deuxième fois, dans les mêmes eaux, par absorption atomique. Les résultats obtenus par les deux méthodes sont en très bon accord (tableau). Pour le tungstène, on a pratiqué le dosage sur deux raies différentes, ce qui a donné le même résultat. Enfin, sur des solutions artificielles analogues aux saumures naturelles, on a vérifié que la présence de nombreux autres éléments ne provoque pas d'interférence sur la raie du molybdène.

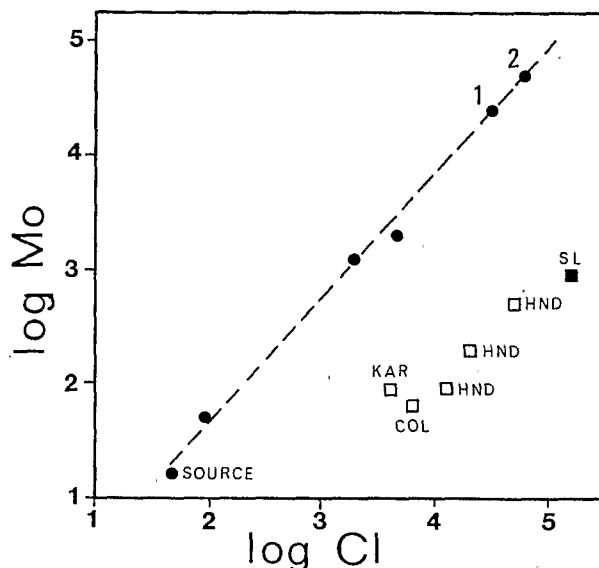


Fig. 2. — Relation entre le chlore (mg/l) et le molybdène ( $\mu\text{g/l}$ ) dans les lacs carbonatés sodiques de l'Altiplano bolivien. Les ronds pleins représentent les eaux de *Cachi Laguna*, les carrés vides les eaux des autres lacs alcalins de l'Altiplano (KAR, Kara Laguna, COL, Collpa Laguna, HND, Honda Sur). Le carré plein (SL) correspond à la saumure de *Searles Lake* (U.S.A.).

Fig. 2. — Relation between chlorine (mg/l) and molybdenum ( $\mu\text{g/l}$ ) in soda lakes of the Bolivian Altiplano. Solid circles refer to *Cachi Laguna* waters and open squares to the other soda lakes of the Altiplano. The solid square refers to *Searles Lake* brine (U.S.A.).

La concentration en molybdène atteint 49 mg/l. A titre de comparaison, les plus fortes teneurs trouvées dans la littérature sont de 3,8 mg/l dans une rivière drainant le plus grand gisement de molybdène des États-Unis [3] et de 10 à 15 mg/l dans les eaux d'une mine de molybdène en Union soviétique [4]. L'eau de mer en contient entre 0,3 et 2  $\mu\text{g/l}$ . Les saumures carbonatées sodiques de *Searles Lake* (U.S.A.), semblables à celles de *Cachi Laguna*, contiennent 0,9 mg/l [5].

Le tungstène et l'arsenic sont associés au molybdène dans ces saumures. Les teneurs atteignent 20 mg/l en tungstène et 2 300 mg/l en arsenic. Les saumures de *Searles Lake* (U.S.A.) contiennent jusqu'à 70 mg/l de tungstène et 320 mg/l d'arsenic [5]. Ces valeurs sont les plus élevées que nous avons pu trouver dans la littérature.

IV. ORIGINE DU MOLYBDÈNE. — Le molybdène est un élément considéré comme mobile au cours de l'altération [4]. Sa concentration dans les eaux peut être utilisée comme un indicateur pour la prospection géochimique de cet élément [6]. D'autre part, la solubilité de molybdène augmente considérablement dans les solutions alcalines sous la forme  $\text{MoO}_4^-$  ([7], [8]). Il est donc normal de trouver des teneurs élevées en molybdène dans ce type de saumures. Mais la question qui se pose est la suivante : ces concentrations trouvées à *Cachi Laguna* reflètent-elles les teneurs normales en molybdène de l'ensemble des roches volcaniques de l'Altiplano, ou bien correspondent-elles à une anomalie métallogénique dans le bassin versant de ce lac ?

Pour trancher, nous avons analysé le molybdène dans les saumures de trois autres lacs carbonatés sodiques de l'Altiplano, tous situés dans la même province volcanique que *Cachi Laguna*. Les résultats, présentés sur la figure 2, montrent que les eaux de *Cachi*

*Laguna* ont des teneurs en molybdène 20 à 30 fois supérieures à celles des autres lacs carbonatés sodiques de l'Altiplano. Ce sont donc ces derniers qui représentent le fond géochimique moyen de cet élément dans les saumures alcalines de l'Altiplano. Quant aux solutions de *Cachi Laguna*, elles reflètent une anomalie, sans doute importante, en molybdène dans le bassin versant : soit un gisement bien différencié, soit une concentration diffuse dans tel ou tel massif de roches volcaniques, traversé par les eaux d'altération. De plus, comme le molybdène a été dosé à 15 µg/l dans les eaux des sources à l'Est du lac, ce sont les massifs volcaniques du versant est qui doivent être prospectés.

V. CONCLUSIONS. — 1. Les saumures carbonatées sodiques (pH > 10) peuvent concentrer fortement le molybdène et le tungstène. Si *Searles Lake* (U.S.A.) est un exemple de concentration du tungstène (70 mg/l), *Cachi Laguna* (Bolivie) est l'exemple de la plus forte concentration en molybdène, jusqu'à 49 mg/l, connue au monde. Y sont également dosés le tungstène (20 mg/l) et l'arsenic (2 300 mg/l).

2. Ce type de saumures amplifie les anomalies en molybdène et tungstène que peuvent présenter les bassins versants. Ce sont donc d'excellents outils de prospection géochimique pour ces éléments, qui devraient être utilisés systématiquement.

3. Dans l'Altiplano de Bolivie, les autres lacs carbonatés sodiques ne présentent pas ces fortes concentrations en molybdène et tungstène; c'est pourquoi, les massifs volcaniques des environs et particulièrement du versant est de *Cachi Laguna* devraient être prospectés.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] F. RISACHER, *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Géol., 10, n° 1, 1978, p. 37-48.
- [2] J. SAMUEL et R. ROUAULT, Note technique de l'Institut de Géologie, Strasbourg, 16, 1983, multigr., 46 p.
- [3] P. T. VOEGELI et R. U. KING, U.S. Geol. Surv., Water-Supply Paper, 1535-N, 1969, 32 p.
- [4] V. I. VINOGRADOV, *Geochemistry*, 2, 1957, p. 144-151.
- [5] G. I. SMITH, U.S. Geol. Surv., Prof. Paper, 1043, 1979, 129 p.
- [6] J. D. HEM, U.S. Geol. Surv., Water-Supply Paper, 1473, 1970, p. 199-200.
- [7] F. T. MANHEIM et S. LANDERGREN, *Handbook of Geochemistry*, K. H. WEDEPOHL éd., Springer-Verlag, 1978, p. 42H1-42H5.
- [8] J. J. BARAKSO et B. A. BRADSHAW, *Canadian Inst. Mining and Metallurgy*, Spec. vol., 11, 1971, p. 78-84.

F. R. : *Mission O.R.S.T.O.M.*, Cajon Postal 8714, La Paz, Bolivie;

J. S. et G. K. : *Institut de Géologie*, 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg.