

GÉOCHIMIE. — Origine des concentrations extrêmes en bore et en lithium dans les saumures de l'Altiplano bolivien.

Note de François Risacher, présentée par Georges Millot.

Remise le 19 juillet 1984.

Dans les saumures de l'Altiplano bolivien, le lithium et le bore sont étroitement associés et atteignent des teneurs parmi les plus élevées au monde : 4,3 g/l pour le bore et 4,7 g/l pour le lithium. Leur origine est liée à l'altération des roches volcaniques acides des bassins et non pas seulement à l'hydrothermalisme.

GEOCHEMISTRY. — Origin of the Very High Concentrations in Boron and Lithium in Brines of the Bolivian Altiplano.

*In brines of the Bolivian Altiplano, boron and lithium are closely associated and reach concentrations among the highest in the world: 4.3 g/l B and 4.7 g/l Li. Their origin stems from the alteration of acid volcanic rocks from the catchment areas. A single hydrothermal origin is not likely.*

Concentrations of boron and lithium in brines of the Bolivian Altiplano are among the highest in the world: 4.3 g/l B and 4.7 g/l Li. Higher contents of boron or lithium are known in other places (6.4 g/l Li at Atacama, Chile and 8.2 g/l B at Searles Lake, U.S.A.), but nowhere else are such high values found for both elements together. They originate from the alteration of acid volcanic rocks (andesite-rhyodacite) which are very abundant in the Altiplano. Boron and lithium contents were determined in 13 volcanic rocks. Boron contents range from 13 to  $105 \times 10^{-6}$  (average:  $61 \times 10^{-6}$ ) and lithium contents from 20 to  $59 \times 10^{-6}$  (average:  $38 \times 10^{-6}$ ). Sixty thermal and non-thermal spring-waters of various salinity were also analysed. All these waters have relative concentrations in boron and lithium of the same magnitude (fig. 2), thus excluding a single hydrothermal origin for these elements. Both low-temperature and hydrothermal alteration lead to similar amounts of B and Li in spring-waters. On the other hand the high aridity and the low mean annual temperature of the Altiplano considerably reduce soil genesis. Boron and lithium are not significantly removed from dilute waters into soils and thus concentrate freely in evaporating waters. The removal of lithium from the brines as a result of smectite formation is not detectable owing to the small amount of authigenic smectite. Only ulexite ( $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) could control the boron concentration. Nevertheless this mineral precipitates in strongly saline brines when the boron content is already very high.

I. LE CADRE GÉNÉRAL : UN SYSTÈME ÉVAPORATOIRE. — L'Altiplano de Bolivie est un vaste bassin fermé d'altitude élevée (3 700 à 4 500 m) compris entre les Cordillères Occidentale et Orientale des Andes (fig. 1). Ce bassin sédimentaire plio-quaternaire a été affecté par un intense volcanisme acide : rhyodacites à andésite, ignimbrites. Au Sud, volcans et coulées délimitent de nombreuses petites cuvettes fermées. La dépression centrale de l'Altiplano ainsi que les petits bassins du Sud sont occupés par des dépôts évaporitiques.

Ce système évaporatoire s'explique par le déficit du bilan d'eau. En effet, pour 1 700 mm/an d'évaporation régionale, précipitations et sources sont insuffisantes. Les précipitations, pluies et neiges, varient du Nord au Sud, de 600 à 100 mm/an. Les sources sont de deux origines : les sources d'origine météorique qui reprennent pour l'essentiel les précipitations par résurgence des infiltrations, et les sources hydrothermales liées au

TABLEAU

Concentration en bore et en lithium dans les eaux les plus représentatives de l'Altiplano bolivien (STD : sels totaux dissous).

*Concentrations in boron and lithium of the most representative waters of the Bolivian Altiplano. (STD: total dissolved solids).*

	Chimisme	STD g/l	B mg/l	Li mg/l
Altiplano				
Lac Titicaca . . . . .	Na-Cl-(SO <sub>4</sub> )	[1]	1,5	0,35
Lac Poopo . . . . .	Na-Cl-(SO <sub>4</sub> )	1,4-97	2,3-173	0,47-36
Salar de Coipasa . . . . .	Na-Cl-(SO <sub>4</sub> )	326-335	428-953	154-333
Salar de Uyuni . . . . .	Na-Cl-(SO <sub>4</sub> )	325-354	175-1 040	169-930
Uyuni-Sud . . . . .	Mg-Cl	400	4 340	4 720
Canapa . . . . .	Na-Cl-SO <sub>4</sub>	255	750	729
Pastos Grandes . . . . .	Na-Cl	324	945	1 640
Cachi laguna . . . . .	Na-Cl-CO <sub>3</sub>	300	2 500	848
Loromayu . . . . .	Na-Cl-(SO <sub>4</sub> )	348	2 600	3 080
Laguna Verde . . . . .	Na-Cl-(SO <sub>4</sub> )	66	585	161
Comparaison				
Atacama-Chili . . . . .	Na-Mg-K-Cl	337	850	6 400
Searles lake-U.S.A. . . . .	Na-Cl-CO <sub>3</sub>	467	8 200	80
Eau de mer . . . . .	Na-Cl	33	4,7	0,1

volcanisme récent. Actuellement, ce bilan négatif engendre, dans les bassins intravolcaniques du Sud, concentration de saumures et dépôts de sels variés [1] : sulfate de calcium, chlorure, sulfates et carbonates de sodium. S'y ajoute l'ulexite, borate rare de calcium et de sodium ( $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) qui se présente en nodules et lentilles de quelques décimètres d'épaisseur.

Dans la passé, l'Altiplano fut occupé par de grands lacs salés [2] qui ont engendré les plus grandes croûtes de sel du monde, salars de Uyuni (10 000 km<sup>2</sup>) et de Coipasa (2 500 km<sup>2</sup>), croûtes très poreuses (30-40 %) contenant des saumures interstitielles ([3], [4]).

II. TRÈS FORTES CONCENTRATIONS EN BORE ET LITHIUM DANS LES SAUMURES. — Ces saumures ont une très forte concentration en bore et en lithium quel que soit leur chimisme. Le tableau présente les concentrations en sels totaux dissous (STD), en bore et en lithium pour 10 eaux et saumures de l'Altiplano, et par comparaison, pour l'eau de mer et les saumures du salar d'Atacama au Chili [5] et de Searles Lake aux États-Unis [6]. Aucune saumure connue ne présente, à la fois, les concentrations ici atteintes : B. 4,3 g/l et Li. 4,7 g/l. Le problème abordé ici est d'en rechercher l'origine, attribuée habituellement aux venues hydrothermales.

#### EXPLICATION DE LA PLANCHE

Fig. 1. — Cadre général de l'Altiplano bolivien.

Fig. 1. — *Outline map of the Bolivian Altiplano.*

Fig. 2. — Relations entre les sels totaux dissous (STD mg/l), le bore et le lithium (en mg/l) dans les eaux des sources de l'Altiplano.

Fig. 2. — *Relations between total dissolved solids (STD in mg/l), boron and lithium in spring-waters of the Altiplano.*

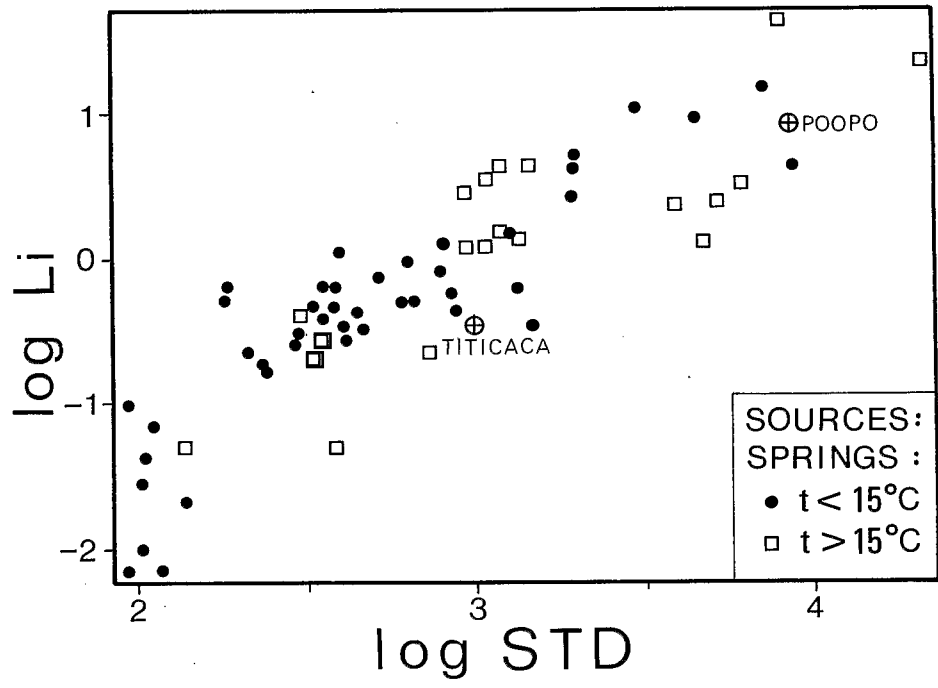
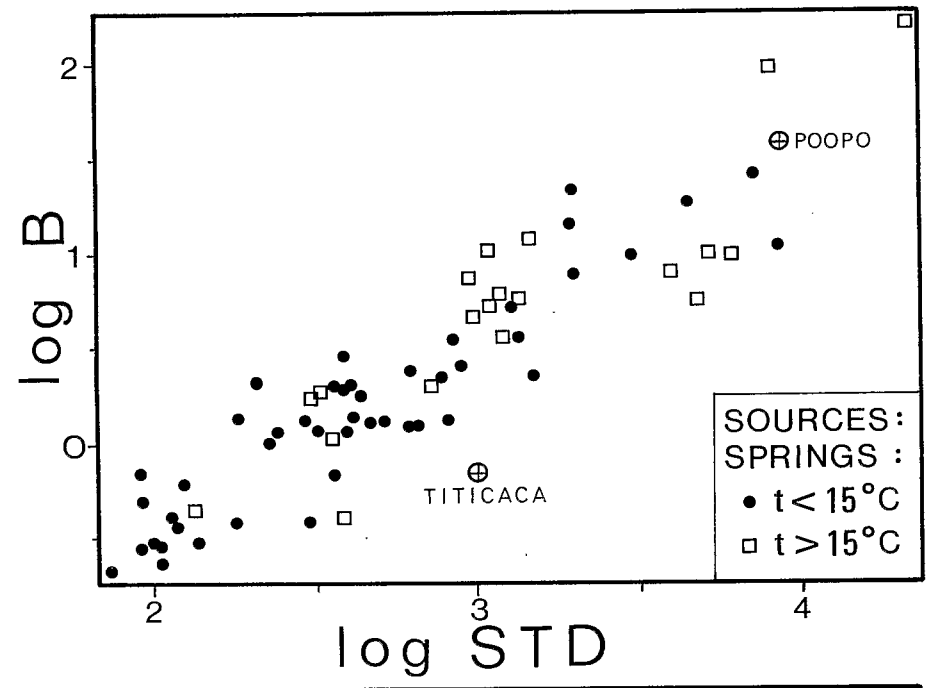
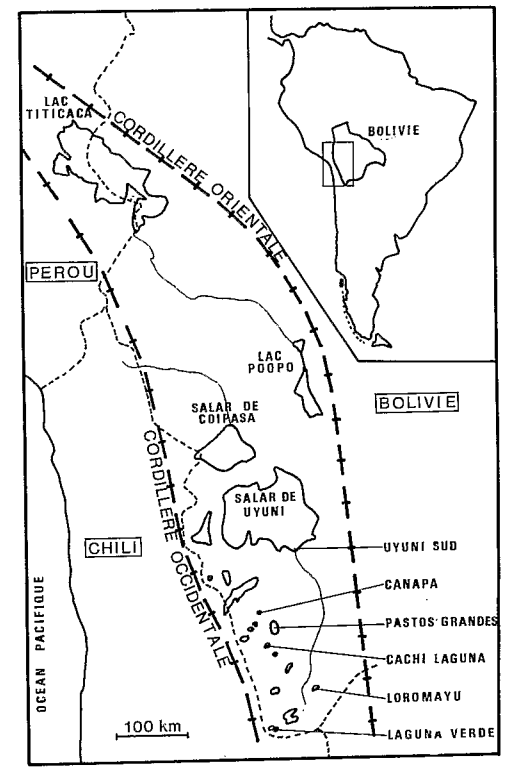


Fig. 2





III. ORIGINE DU BORE ET DU LITHIUM DANS LES SAUMURES. — Treize roches volcaniques de l'Altiplano ont été analysées. Les valeurs obtenues varient de 13 à  $105 \cdot 10^{-6}$  pour le bore (moyenne :  $61 \cdot 10^{-6}$ ) et de 20 à  $59 \cdot 10^{-6}$  pour le lithium (moyenne :  $38 \cdot 10^{-6}$ ). Ces valeurs élevées ne sont pas anormales pour des roches volcaniques acides ([7], [8]). Une origine est donc ici disponible pour ces deux éléments.

Soixante eaux de sources, météoriques et hydrothermales, ont été analysées. Le bore varie de 0,17 à 129 mg/l et le lithium de 0,01 à 43 mg/l. Mais la figure 2 montre que toutes ces eaux présentent une concentration relative en bore et lithium, par rapport à la charge saline dissoute, du même ordre de grandeur. L'origine hydrothermale du bore et du lithium ne peut donc être privilégiée.

Comparables sont les eaux des lacs Titicaca et Poopo représentées (fig. 2) par des croix encerclées, avec des teneurs en B et Li déjà fortes. Or ces deux lacs sont alimentés par des eaux d'origine météoriques, ce qui exclut la contribution hydrothermale.

Ainsi l'origine du bore et du lithium est à rechercher directement dans les teneurs des laves en ces deux éléments. C'est l'altération de ces roches volcaniques par les eaux superficielles ou souterraines qui apportent ces éléments aux bassins.

IV. LES RAISONS DE L'ACCUMULATION DU BORE ET DU LITHIUM DANS LES SAUMURES. — Sous le climat froid et aride de l'Altiplano, le paysage, surtout dans le Sud, est désertique, avec végétation et sols peu développés. Argiles et complexe absorbant des sols, vite saturés, ne peuvent fixer B et Li, qui restent libres dans les eaux superficielles. Dans les bassins eux-mêmes, le piégeage de ces éléments par les sédiments, argiles et sels, qui s'y déposent, est négligeable. Les argiles, illites et smectites, sont en quantité très faible, difficilement dosable, sauf dans les deltas ou paléodeltas qui représentent un faible volume relatif. Quant aux sels majeurs, chlorures, sulfates, carbonates de sodium, ils ne renferment ni bore, ni lithium. Original est le cas de l'ulexite. Ce borate contient 13,3 % de son poids sec en bore qui est soustrait aux saumures. Mais ce sel est en lentilles épisodiques et ne commence à se déposer que pour des teneurs déjà élevées (0,5 à 1 g/l B selon l'environnement). De plus, l'ulexite est en rivalité avec les autres sels de calcium et de sodium, si bien que les teneurs en bore peuvent dépasser 4 g/l.

Au total, à l'exception de l'effet partiel de l'ulexite, ni le paysage, ni les minéraux n'offrent de pièges efficaces au bore et au lithium, qui s'accumulent dans les saumures résiduelles.

V. CONCLUSIONS. — 1. L'origine première du bore et du lithium réside dans les roches volcaniques acides des bassins versants.

2. Ce bore et ce lithium sont indifféremment mis en solution par les eaux de circulation superficielle et souterraine. Les mesures ne donnent pas de teneurs supérieures pour les eaux thermales par rapport aux eaux d'origine météorique directe.

3. Les sols sont très peu développés dans le paysage. La fraction d'argile est minime dans les sédiments. A l'exception de l'ulexite, il n'existe pas de sels concentrés en bore et lithium. Pour ces trois raisons, ces deux éléments peuvent atteindre des valeurs élevées dans les saumures (B : 4,3 g/l et Li : 4,7 g/l).

4. De cette façon, des saumures dont les teneurs en bore et en lithium se mesurent en grammes par litre, doivent être considérées comme de véritables minerais de bore et de lithium.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] F. RISACHER, *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Géol., 10, 1, 1978, p. 37-48.
- [2] M. SERVANT et J. Ch. FONTES, *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Géol., 10, 1, 1978, p. 9-23.
- [3] G. E. ERICKSEN, J. D. VINE et R. BALLON, *Energy*, 3, 1978, p. 355-363.
- [4] S. L. RETTIG, B. F. JONES et F. RISACHER, *Chem. Geol.*, 30, 1980, p. 57-79.
- [5] A. MORAGA, G. CHONG, M. A. FORTT et H. HENRIQUEZ, *Bol. Inst. Investig. Geol., Chile*, 29, 1974, 56 p.
- [6] G. I. SMITH, *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 1043, 1979, 129 p.
- [7] K. S. HEIER et G. K. BILLINGS, *Handbook of Geoghemistry*, Springer, 1970, 3E1-3E4.
- [8] H. HARDER, *Handbook of Geochemistry*, Springer, 1974, 5E1-5E10.

*O.R.S.T.O.M., Institut de Géologie,  
1, rue Blessig, 67084 Strasbourg Cedex.*