

LA GENÈSE DES LACS SALÉS

Lorsque l'on parle de sel, on pense d'abord à la mer. Pourtant de vastes dépôts salés se sont formés bien loin des milieux marins. Ainsi, dans une zone froide et désertique de l'Altiplano en Bolivie se cache le salar d'Uyuni, la plus grande croûte de sel du monde. Il renferme d'énormes richesses minières dont le plus gros gisement potentiel de lithium existant sur Terre. Pour les scientifiques, c'est un lieu idéal pour tenter de comprendre la genèse de ces étranges écosystèmes des zones arides, connus et exploités depuis l'Antiquité.

FRANÇOIS RISACHER ET BERTRAND FRITZ

Tout le monde a entendu parler de ces lieux plus ou moins mythiques que sont la mer Morte, le Grand Lac Salé, la Vallée de la Mort et, plus prosaïquement, de ces déserts de sel où sont battus les records de vitesse au sol. Ce ne sont là que quelques-uns des cinquante mille lacs salés et croûtes de sel répartis sur tous les continents, y compris l'Antarctique. Leur importance économique et scientifique est sans commune mesure avec la place très modeste qu'ils occupent dans les manuels de géologie (fig. 1 et 2). Sait-on, par exemple, que ces systèmes renferment les plus grandes réserves du monde de lithium et qu'ils sont exploités pour extraire différents sels comme les borates, la potasse ou les carbonates et sulfates de sodium ? Pour les scientifiques, les lacs salés sont aussi des enregistreurs des fluctuations climatiques, de véritables laboratoires chimiques naturels, et même des réserves d'êtres vivants capables de s'adapter à des conditions extrêmes (voir l'encadré « La crevette *Artemia*, vedette des saumures »). Les dépôts formés par évaporation (évaporites) en milieu continental sont exploités pour certains sels depuis l'Antiquité : le chlorure de sodium pour l'alimentation et les carbonates de sodium comme détergents. Les Egyptiens utilisaient le natron, un carbonate de sodium hydraté, pour conserver les momies.

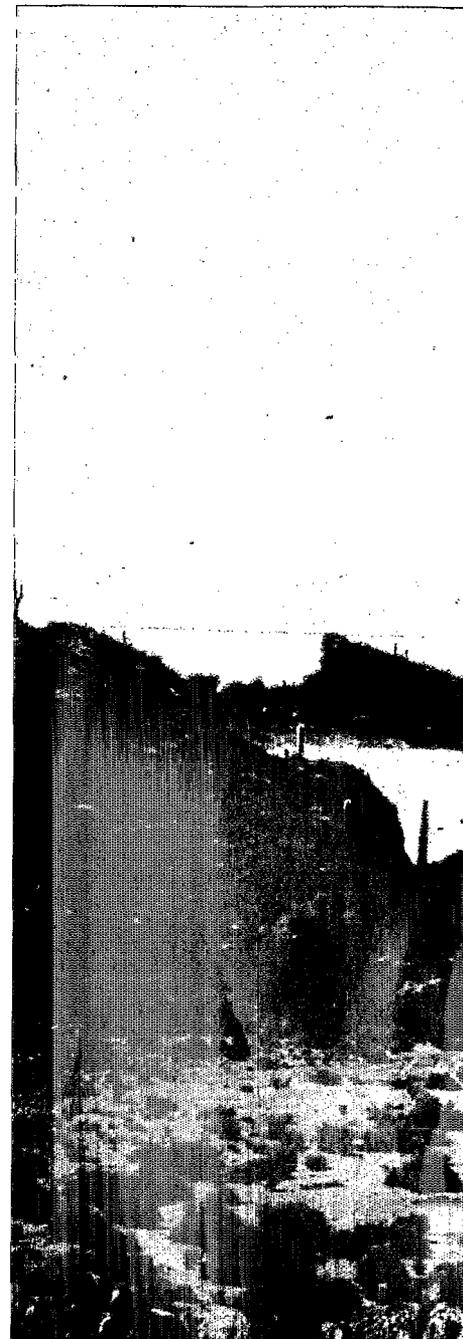
Les borates sont utilisés depuis le Moyen Age pour activer la fonte des métaux. Leur usage semble s'être répandu en Europe à partir du XIII^e siècle après que Marco Polo eut ramené des cristaux de borax des lacs salés tibétains. L'exploitation industrielle des borates a

commencé au XIX^e siècle dans les salars du Chili. Elle a été rapidement suivie par celle des lacs salés américains du Nevada et de Californie. Aujourd'hui la quasi-totalité des besoins en bore est fournie par l'exploitation des borates des lacs salés aux Etats-Unis, en Turquie, en Russie, en Argentine, au Chili, au Pérou et en Chine.

Les nitrates du Chili, utilisés dès le XVI^e siècle par les Espagnols pour faire de la poudre à canon, servent aujourd'hui comme fertilisants. La potasse, un autre fertilisant, provient surtout d'évaporites marines. Mais on l'extrait aussi de saumures continentales dans le salar d'Atacama au Chili, dans le Grand Lac Salé aux Etats-Unis, dans le lac Chærhan en Chine et dans la mer Morte.

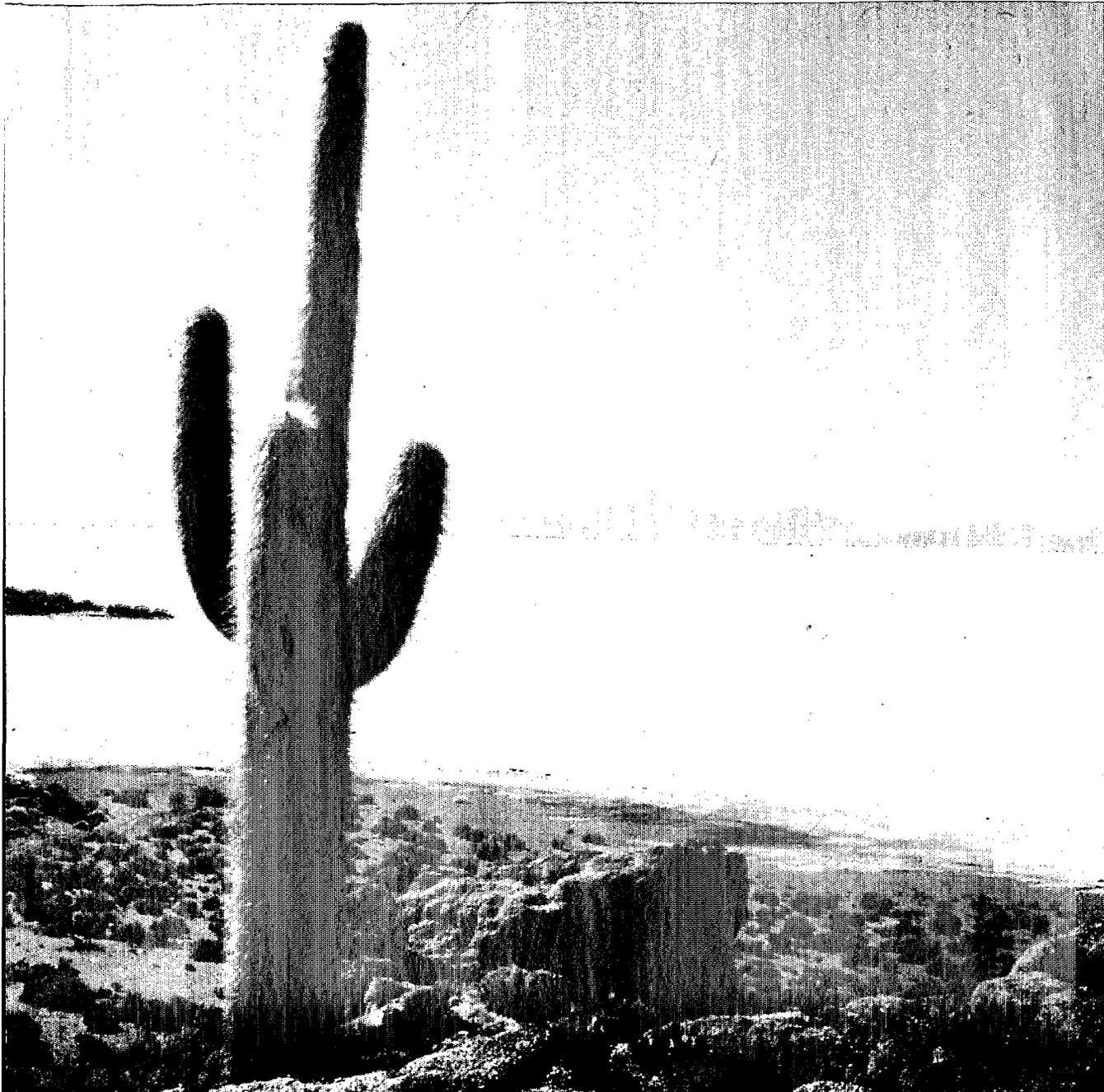
Contrairement à une idée assez répandue, la formation des évaporites n'est pas liée aux climats chauds ; on trouve en effet des lacs salés dans les zones polaires arctique et antarctique

Le carbonate de sodium est un produit de base de l'industrie chimique. Il est produit industriellement à partir de chlorure de sodium et de carbonate de calcium (procédé Solvay). Mais on l'exploite aussi à l'état naturel dans des lacs salés alcalins en Californie (Searles Lake) et au Kenya (lac Magadi). Les



lacs salés fournissent également du sulfate de sodium (Saskatchewan), des zéolites (Etats-Unis) et bien sûr du lithium (Atacama, Searles Lake). Le sulfate de sodium est utilisé dans l'industrie du papier et du verre. Les zéolites sont des silico-aluminates hydratés de sodium, potassium et calcium que l'on trouve fréquemment dans les lacs salés alcalins. Ce sont des échangeurs d'ions qui servent, entre autres, à extraire certains éléments radioactifs des rejets de centrales nucléaires⁽¹⁾. Certains lacs salés sont enfin des réservoirs potentiels d'énergie thermique. Il s'agit de lacs stratifiés où une couche de saumure de densité élevée est recouverte par une couche moins dense. L'interface entre les deux laisse pénétrer la

FRANÇOIS RISACHER est directeur de recherches à l'Orstom. Il travaille actuellement sur les salars de l'Altiplano chilien.
BERTRAND FRITZ, directeur de recherches au CNRS, dirige le Centre de géochimie de la surface à Strasbourg.



radiation solaire dans la couche inférieure, mais ne la laisse pas ressortir, ce qui entraîne un réchauffement de la saumure profonde. Un exemple spectaculaire est le lac salé Vanda en Antarctique. Gelé en surface, sa température atteint 25 °C en profondeur. Ce type de lac pourrait être utilisé dans un futur lointain comme source d'énergie⁽²⁾.

On trouve des lacs salés et des croûtes de sel dans toutes les zones arides du globe où l'évaporation potentielle (la hauteur d'eau annuelle que peut évaporer l'atmosphère) est supérieure à la pluviosité. Cette condition climatique fondamentale règne dans quatre ceintures approximativement parallèles à l'équateur : le long des tropiques du Cancer et du Capricorne ainsi que dans les zones po-

laires, arctique et antarctique⁽³⁾ (fig. 3). Ainsi, contrairement à une idée assez répandue, la formation des évaporites n'est pas liée aux climats chauds.

Du fait de l'isolement des évaporites continentales dans les déserts, leur analyse scientifique est assez récente. Les premières études remontent à la deuxième moitié du XIX^e siècle. Elles portent sur les bassins américains découverts pendant la conquête de l'ouest, et sur la mer Morte. L'attention des premiers observateurs^(4,5) s'est surtout portée sur la présence, autour des bassins et bien au-dessus du niveau actuel des lacs, de terrasses et de sédiments lacustres qui témoignent de l'existence d'anciens lacs beaucoup plus étendus que les lacs actuels. Par exemple, le Grand Lac Salé,

Figure 1. Le salar d'Uyuni à 3 653 mètres d'altitude sur l'Altiplano de Bolivie est la plus grande croûte de sel du monde. Sa surface de 10 000 kilomètres carrés correspond à celle de deux départements français moyens. Son épaisseur maximale est de 11 mètres. C'est dans cette croûte que se trouvent les plus grandes réserves connues du monde en lithium. Le salar d'Uyuni provient de l'assèchement, il y a dix mille ans, d'un immense lac salé de 45 000 kilomètres carrés de surface et de 80 mètres de profondeur. (Cliché auteurs)

dans l'Utah, a aujourd'hui une surface de 2 600 kilomètres carrés et une profondeur de 8 mètres. Mais au cours du Quaternaire, voici quelques dizaines de milliers d'années, son bassin était occupé par un lac de 50 000 kilomètres carrés de surface et de 300 mètres de

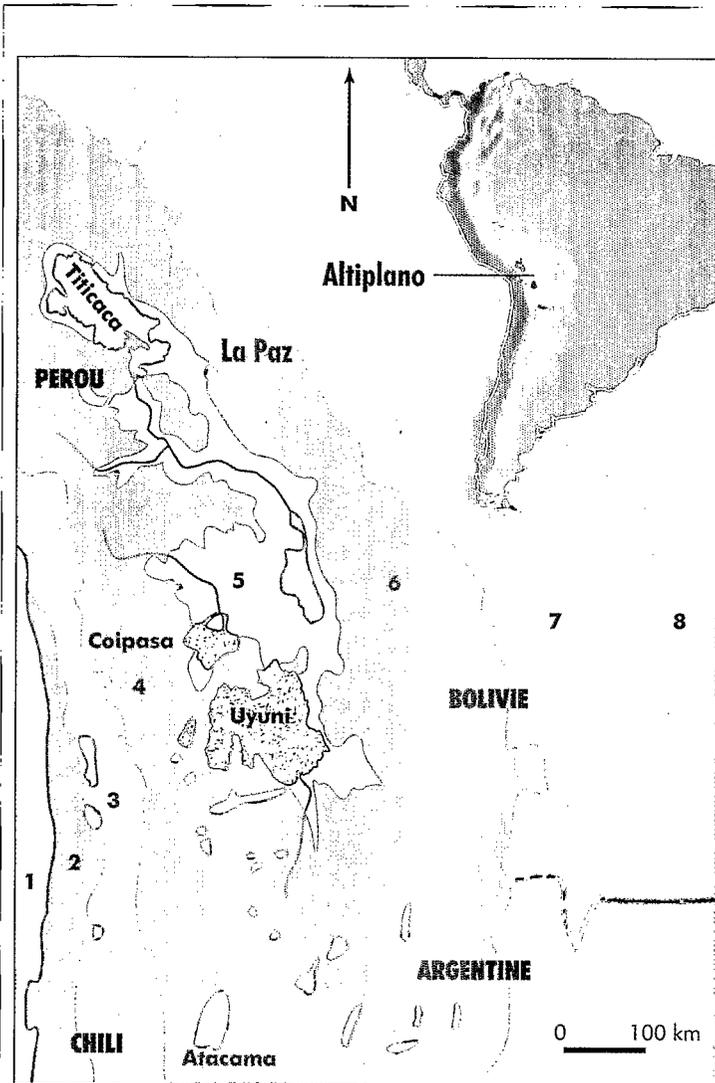
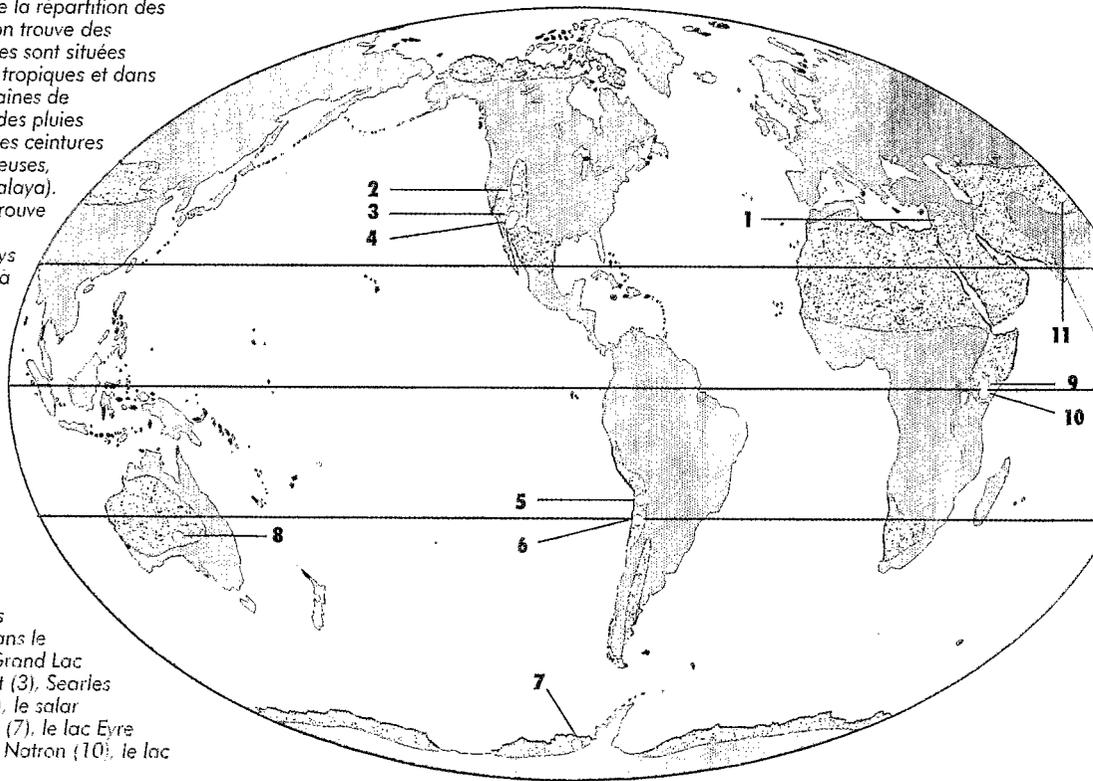


Figure 2. Cette carte permet de situer le salar d'Uyuni au cœur de l'Altiplano bolivien, ce vaste bassin fermé de 200 000 kilomètres carrés, à environ 4 000 mètres d'altitude au cœur des Andes centrales.
 1 : Océan Pacifique ;
 2 : Cordillère de la côte (Chili) ;
 3 : Vallée Centrale (Chili) ;
 4 : Cordillère occidentale (Chili - Bolivie) ;
 5 : Altiplano de Bolivie ;
 6 : Cordillère orientale ;
 7 : Zone sub-andine ;
 8 : Bassin amazonien.

profondeur. De même, un lac trois fois plus étendu que la mer Morte recouvrait autrefois toute la vallée du Jourdain. Par la suite, il est apparu qu'une grande partie des lacs salés et croûtes de sel dans le monde étaient les reliques de vastes paléolacs du Quaternaire. Le record de surface appartient peut-être au prédécesseur de l'actuel lac salé Eyre en Australie, qui s'étendait sur 110 000 kilomètres carrés. Le salar d'Uyuni, sur l'Altiplano bolivien, provient de l'assèchement d'un lac de 45 000 kilomètres carrés de surface. Là où aujourd'hui on ne voit que désert, se trouvaient donc, il n'y a pas si longtemps des étendues d'eau de superficie voisine de celles des plus grands lacs actuels du monde, le Baïkal ou les Grands Lacs américains. Très tôt, on avait compris que le niveau des lacs salés était un bon enregistreur des fluctuations climatiques. L'astronome anglais Edmund Halley (qui a donné son nom à la comète) écrivait déjà en 1715 : « *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 leur surface soit assez étendue pour exhaler en vapeur toute l'eau qui est amenée par les rivières* ». Halley avait parfaitement compris qu'un lac salé permanent se caractérise par sa surface d'équilibre et non par son volume (fig. 4). Il en découle que toute variation, même minime, des paramètres climatiques entraîne rapidement une variation de la surface du lac et donc de

Figure 3. Cette carte montre la répartition des zones arides du globe où l'on trouve des évaporites continentales. Elles sont situées approximativement sous les tropiques et dans les régions polaires. Des chaînes de montagnes peuvent abriter des pluies certains bassins en marge des ceintures tropicales (montagnes Rocheuses, Andes, rift Est-Africain, Himalaya). En zone tropicale nord, on trouve des bassins évaporitiques continentaux en Afrique (pays du Sahel ; de la Mauritanie à l'Éthiopie ; rift Est-Africain : Kenya et Tanzanie), en Asie (Moyen-Orient, Mongolie, Tibet, Chine), en Amérique du Nord (ouest des États-Unis et du Canada : de la Californie au Saskatchewan). En zone tropicale sud, les zones arides s'étendent en Afrique du Sud, en Australie et en Amérique du Sud (Chili, Argentine, Bolivie, Pérou). Il existe aussi des bassins à évaporites en Alaska et dans l'Antarctique⁽³⁾. Sont cités dans le texte : la mer Morte (1), le Grand Lac Salé (2), la Vallée de la Mort (3), Searles Lake (4), le salar d'Uyuni (5), le salar d'Atacama (6), le lac Vanda (7), le lac Eyre (8), le lac Magadi (9), le lac Natron (10), le lac Chaerhan (11).



son niveau. L'étude des anciens lacs (paléolimnologie) et la paléoclimatologie ont donc été les premiers pôles d'intérêt dans l'étude des bassins évaporitiques continentaux⁽⁶⁾. Les changements climatiques actuels, comme le possible réchauffement de la Terre et la désertification du Sahel, ont relancé l'intérêt des lacs salés par l'étude des climats du Quaternaire!

Vers la fin des années 1960, un nouveau domaine de recherches s'ouvrit aux géochimistes. Ils observèrent d'abord que les évaporites continentales étaient beaucoup plus variées que les évaporites marines. D'une part, tous les sels marins se rencontrent également dans les bassins continentaux. D'autre part, il existe une famille de sels absents des sédiments marins : ce sont les carbonates de sodium, comme le natron, qui précipi-

majeurs sont le chlorure (Cl⁻), le sulfate (SO₄²⁻) ou le carbonate (CO₃²⁻). Il y a ainsi de nombreuses combinaisons possibles en constituants majeurs (voir l'encadré « Sels et saumures »).

Pourquoi une telle diversité de composition chimique des saumures et des sels qui en dérivent ? Il est surprenant de trouver les lacs carbonatés sodiques dans des bassins presque entièrement constitués de roches cristallines (granites ou basaltes) et dépourvus de roches carbonatées. Robert Garrells et Fred Mackenzie, de la Northwestern University, établirent en 1967 le bilan géochimique d'un lac carbonaté sodique du Nevada — point de départ de l'étude géochimique des lacs salés⁽⁷⁾ — montrant ainsi que l'origine de cette sorte de lac était le piégeage du gaz carbonique de l'air. En effet, l'eau de pluie

modèle la composition de la saumure finale, et la nature des sels (sels neutres ou sels alcalins) qui en résultent, dépendent fondamentalement de la composition initiale de l'eau douce de départ, laquelle dépend en grande partie de la nature des roches du bassin versant (roches éruptives, sédimentaires, etc.). Une très faible modification de cette composition peut conduire à une saumure finale totalement différente (voir l'encadré « Deux familles d'évaporites »). L'évaporation peut ainsi ampli-

La crevette *Artemia*, vedette des saumures !

Les lacs salés présentent des conditions extrêmes de salinité, jusqu'à dix fois celle de l'eau de mer. Or le nombre d'espèces végétales et animales qui y vivent diminue avec la salinité. Dans les saumures très concentrées, il ne survit plus que quelques espèces de bactéries. C'est le cas de la mer Morte. Et pourtant la biologie des lacs salés est depuis longtemps un domaine de recherches très actif. Les organismes capables de s'adapter à des conditions aussi extrêmes possèdent un métabolisme exceptionnel⁽¹⁶⁾. On a, par exemple, découvert chez les bactéries vivant dans les milieux salés (halobactéries) un mécanisme de photosynthèse qui n'utilise pas la chlorophylle. L'organisme le plus évolué qui peut vivre dans des saumures concentrées est une petite crevette appelée *Artemia*. Elle a déjà fait l'objet de plus de trois mille publications⁽¹⁷⁾ et elle est régulièrement le thème de symposiums internationaux. Les conditions extrêmes qui règnent dans certains lacs salés pourraient être semblables à celles qui existaient dans les anciens lacs découverts par les sondes Viking sur la planète Mars⁽¹⁸⁾. Seules des bactéries auraient pu survivre dans de tels milieux. De plus, grâce aux organismes fossiles retrouvés dans les sédiments de lacs salés actuels, on peut reconstituer les caractéristiques de lacs plus anciens. Ainsi, les diatomées, algues siliceuses unicellulaires, sont à l'origine d'épais dépôts lacustres

- 1) F.A. Mumpton, *Mineral. Soc. Amer., Short Course Notes*, 4, 177, 1977.
- (2) P.P. Hudec et P. Sonnenfeld, *Science*, 185, 440, 1974.
- (3) O. Matsubaya et al, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, 7, 1979.
- (4) L. Lariet, *Exploration géologique de la mer Morte, de la Palestine et de l'Idumée*, Société de Géographie, Paris, 1876.
- (5) I.C. Russell, *US Geol. Mon.*, 11, 81, 1885.
- (6) R.B. Morrison, in R.W. Fairbridge (ed.), *The Encyclopaedia of geomorphology*, Van Nostrand, 1968.
- (7) R.M. Garrells et F.T. Mackenzie, in « Equilibrium concepts in natural water systems », *Am. Chem. Soc.*, 222, 1967.
- (8) L.A. Hardie et H.P. Eugster, *Mineral. Soc. Amer. Spec. Pap.*, 3, 273, 1970.
- (9) H.C. Helgeson et al., *Geochim. Cosmochim. Acta*, 33, 455, 1969.



(diatomites). Or les diverses espèces de diatomées dépendent de la salinité, du chimisme, du pH et de la température des eaux. On peut ainsi par leur étude estimer les paramètres physico-chimiques des anciens lacs. (Cliché John Hinsch/SPL/Cosmos)

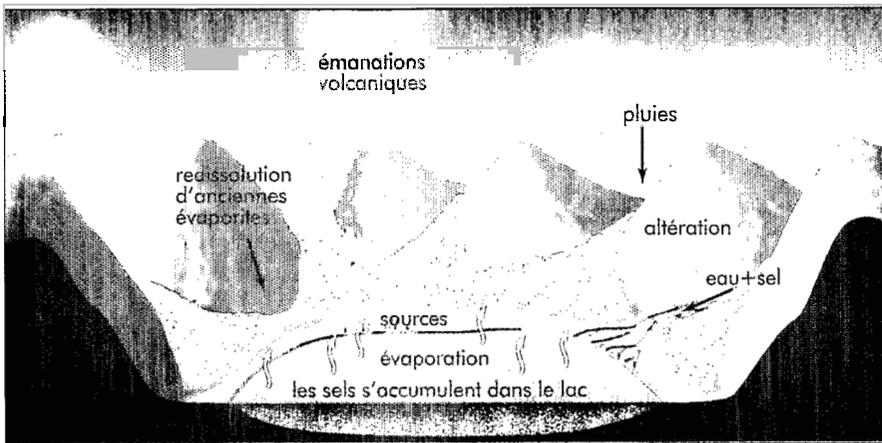


Figure 4. Le bilan hydrique d'un lac salé est une notion fondamentale dans l'étude des anciens lacs. Il est établi à partir du volume des apports dans le lac (rivières, sources), de la hauteur de pluie sur le lac, de l'évaporation potentielle et de la surface du lac.

Dans un lac permanent, il entre autant d'eau qu'il en sort. Les infiltrations sont presque toujours négligeables. La surface du lac dépend des paramètres climatiques. Pour le bilan salin, il entre dans le lac de l'eau et des solutés, mais il n'en ressort par évaporation que de l'eau. La salinisation est un mécanisme d'accumulation de matière dissoute dans un volume constant de solution. En climat non aride, comme en France, les systèmes lacustres sont ouverts. Les lacs se déversent à l'aval dans les rivières et ne se salinisent pas.

tent à partir de saumures très basiques, de pH supérieur à 10. De même, les sulfates de sodium, les borates et les silicates de sodium sont presque exclusivement des sels d'évaporites continentales. Le cation majeur des saumures continentales est presque toujours le sodium (Na⁺). Il existe très peu de saumures à magnésium (Mg⁺⁺) ou calcium (Ca⁺⁺) dominant et l'on ne connaît pas de saumures naturelles où le potassium (K⁺) soit le cation principal. Les anions

contient de l'acide carbonique provenant de la dissolution du gaz carbonique de l'atmosphère. Elle attaque les silicates des roches cristallines du bassin versant en les transformant en argiles et en libérant des cations Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ et de l'acide silicique non dissocié H₄SiO₄ dans les eaux des sources et des rivières. L'anion dominant qui neutralise les charges électriques des cations ne peut être que le bicarbonate HCO₃⁻ provenant de la dissociation de l'acide carbonique de l'eau de pluie. Lorsque l'eau diluée initiale se concentre par évaporation, seuls des minéraux carbonatés précipitent : de la calcite (CaCO₃, le moins soluble) jusqu'au natron (Na₂CO₃ · 10 H₂O, le plus soluble). La saumure devient alcaline et son pH s'élève au cours de l'évaporation.

Mais on n'expliquait pas encore clairement la grande diversité chimique des évaporites continentales. Le mérite en revint à Laurence Hardie et Hans Eugster de la Johns Hopkins University à Baltimore. Ils présentèrent en 1970⁽⁸⁾ un modèle d'évolution des eaux par évaporation qui rend compte des principales variétés de saumures et de sels rencontrés dans les lacs salés. D'après ce

Sels et saumures

Cl SO ₄ CO ₃	halite NaCl 354-357 g/kg	sylvite KCl 285-358 g/kg	bischofite MgCl ₂ ·6H ₂ O 1120-1170 g/kg	antarctite CaCl ₂ ·6H ₂ O 1370-1660 g/kg
	mirabilite Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O 91-622 g/kg		epsomite MgSO ₄ ·7H ₂ O 369-695 g/kg	gypse CaSO ₄ ·2H ₂ O 2,24-2,63 g/kg
	natron Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O 183-835 g/kg		magnésite MgCO ₃ 0,15-0,07 g/kg	calcite CaCO ₃ 0,08-0,05 g/kg
	Na	K	Mg	Ca

Toutes les eaux naturelles contiennent des substances dissoutes, en général sous forme de cations et d'anions. Les principaux ions sont Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Cl⁻, HCO₃⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻. Leurs concentrations sont très

peut le constater sur les étiquettes des bouteilles d'eaux minérales. La salinité totale d'une eau est la somme des concentrations de tous ses constituants dissous. Les eaux

400 g/l. C'est ce qu'on appelle une saumure. Ces solutions extrêmement salées et denses n'ont pas la même variété de composition que les eaux diluées. La très grande majorité doivent l'essentiel de leur charge saline à deux

à

(voir le tableau ci-dessus). Il existe ainsi des saumures à Na-Cl (90% des cas), à Na-CO₃-Cl, à Na-SO₄-Cl, à Na-Mg-Cl, à Na-Ca-Cl. Le terme « sel » désigne ici un minéral très soluble. C'est le sens que lui donnait déjà Buffon pour qui un sel est un minéral qui a de la « saveur ». En fait, pour le chimiste un sel est le produit de la réaction d'un acide sur une base. La plupart des minéraux sont ainsi des sels, quelle que soit leur solubilité. L'éventail des solubilités (la masse de sel pouvant être dissoute dans 1 kg d'eau pure) est très large : de 0,05 à 1 660 g/kg. La solubilité de certains sels varie fortement avec la température : la mirabilite, le natron, l'epsomite et l'antarctite sont beaucoup moins solubles à basse température. On trouvera donc ces sels de préférence dans les régions froides. (Les deux chiffres sous la formule des sels représentent les solubilités en grammes de sel par kilogramme d'eau, respectivement à 0 et 25 °C.)

fier de très faibles variations de la composition des solutions lors des interactions avec les sédiments, ce qui en retour permet de détecter de telles réactions. Le problème est de calculer exactement l'évolution théorique de la composition chimique d'une eau qui s'évapore, ainsi que la séquence et les masses des minéraux qui précipitent. Cela ne peut se faire qu'au moyen de programmes informatiques assez complexes. Harold Helgeson et ses collègues de l'université Northwestern, puis de Berkeley, furent les premiers à mettre au point de tels programmes à la fin des années 1960⁽⁹⁾. L'essor de la micro-informatique au début des années 1980 a permis la grande diffusion des programmes informatiques d'hydrochimie.

Grace à ces programmes, on compare l'évolution réelle des solutions qui se concentrent dans le bassin et les sels qui précipitent à partir de ces solutions, avec leur évolution calculée par l'ordinateur. Les divergences entre les deux évolutions traduisent des réactions non prévues par le modèle et bien souvent difficiles à mettre en évidence par l'observation directe. C'est ainsi que nous avons pu détecter récemment une contamination par le soufre atmosphérique dans la plupart des petits bassins évaporitiques du sud de la Bolivie⁽¹⁰⁾ (fig. 5).

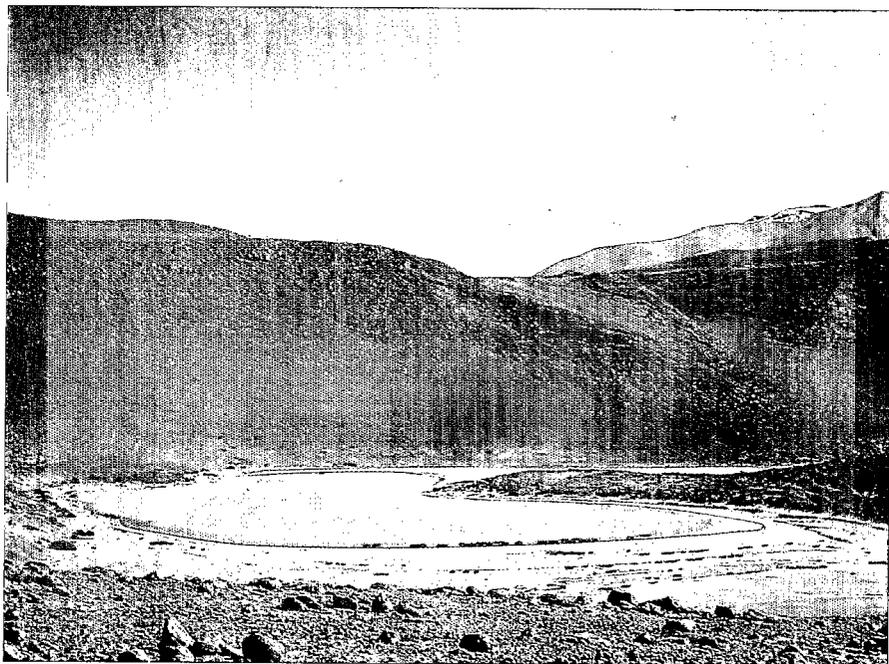
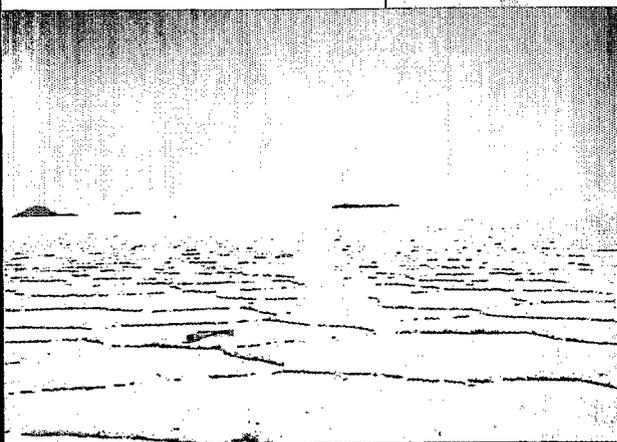
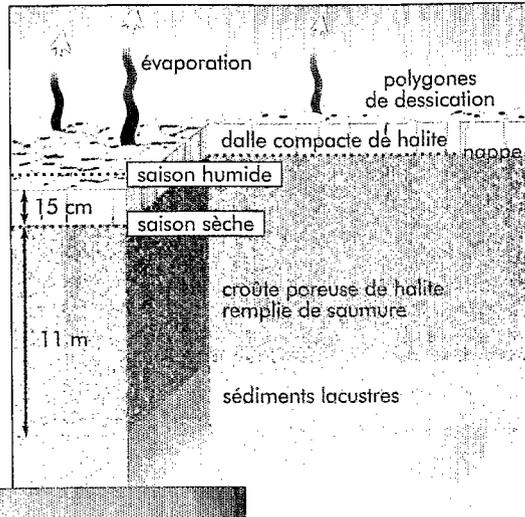


Figure 5. Plusieurs dizaines de lacs salés et de croûtes de sels occupent les bassins volcaniques du sud de l'Altiplano bolivien. Les sels sont très variés : chlorures, sulfates, carbonates et borates de calcium et de sodium. La nature des sels qui se déposent dans un bassin dépend de la composition initiale des eaux de sources, laquelle dépend à son tour de la nature des roches des bassins versants. La photo ci-dessus illustre un lac dit de type playa (Laguna Ballivian) où le lac de saumure, d'une vingtaine de centimètres de profondeur, s'étend sur une épaisse couche de sédiments lacustres imperméables. La pellicule de saumure superficielle va se resorber pendant la saison sèche. Les sels qui s'accumulent sont le gypse, la mirabilite et l'ulexite. (Cliché auteurs)

Figure 6. Cette photographie montre de très près la croûte de sel du salar d'Uyuni avec ses polygones de dessiccation. Sur le schéma, on peut voir qu'une quinzaine de centimètres sous cette surface se trouve la saumure interstitielle. Cette croûte de sel est une accumulation poreuse de cristaux de halite imprégnés d'une saumure riche en Li, K, Mg et B. Pendant la saison des pluies (décembre à mars), le salar est inondé. En saison sèche, la saumure interstitielle s'évapore à travers la partie supérieure de la croûte en précipitant du sel secondaire dans les interstices de la croûte, ce qui la colmate en une dalle compacte sur laquelle il est très facile de circuler. (Cliché auteurs)



Li⁺), potassium, magnésium et bore⁽¹¹⁾. Ce sont ces éléments d'un grand intérêt économique qui ont motivé l'étude du salar d'Uyuni (voir l'encadré « Les réserves minières du salar d'Uyuni »). Quarante sondages ont été réalisés, dont un jusqu'à 121 mètres de profondeur, grâce à une petite sondeuse-carotteuse fournie par l'Orstom⁽¹²⁾. L'épaisseur maximale de la croûte de sel est de onze mètres. Elle repose sur des sédiments lacustres.

Les concentrations en bore et en lithium dans les saumures se sont révélées parmi les plus élevées du monde — la concentration moyenne en lithium de la saumure interstitielle est de 550 mg/l avec un maximum de 4 700 mg/l (l'eau de mer n'en contient que 0,1 mg/l et le lithium exploité dans le lac salé de Searles Lake aux Etats-Unis a des teneurs de l'ordre de 80 mg/l). Le bore du salar d'Uyuni a une concentration moyenne de 460 mg/l avec un maximum de 4 300 mg/l (l'eau de mer en contient 4,7 mg/l). Le plus grand gisement d'ulexite (borate de sodium et de calcium) de Bolivie se trouve sur la bordure sud du salar. Le potassium a des teneurs comprises entre 5 et 30 g/l et le magnésium entre 5 et 70 g/l. Les saumures les plus concentrées du salar d'Uyuni sont, à notre connaissance, les seules dont les deux cations majeurs soient le magnésium et le lithium. Le lithium et le bore proviennent de l'altération des roches volcaniques de l'Altiplano⁽¹³⁾. Celles-ci ont des teneurs relativement élevées en ces deux éléments, mais non exceptionnelles : 40 ppm (partie par million) en lithium et 60 ppm en bore, en moyenne. Leur concentration s'explique par la forte

aridité et les faibles températures qui ont limité le développement des argiles et des sols dont le complexe absorbant, vite saturé, n'a pu fixer suffisamment le bore et le lithium. Ces éléments se sont ainsi concentrés librement dans les eaux superficielles, puis dans les bassins sédimentaires. Par ailleurs, on ne connaît pas de minéraux de lithium qui pourraient piéger cet élément, et, quant au bore, les borates qui cristallisent dans ces bassins n'en consomment qu'une faible quantité. Du reste, la concentration de ces éléments se poursuit encore aujourd'hui alors que le salar d'Uyuni est en partie fossile.

Le salar d'Uyuni est le petit dernier d'une véritable lignée. Durant le Quaternaire, une dizaine de lacs se sont succédé, déposant chacun une croûte de sel : un gigantesque millefeuille en sous-sol

L'étude des anciennes formations lacustres autour du bassin a montré que le salar d'Uyuni provenait de l'assèchement, il y a dix mille ans, d'un immense lac salé de 45 000 kilomètres carrés de surface et de 80 mètres de profondeur, baptisé le lac Tauca⁽¹⁴⁾. D'où vient donc le sel qui se trouvait dissous dans ce paléolac ? On connaît la masse de tous les composants des sels et saumures du salar d'Uyuni. Par ailleurs, on connaît le volume du paléolac Tauca (1 200 kilomètres cubes). On a donc pu reconstituer la composition chimique de cet ancien lac. C'était un lac chloruré-sodique de 80 g/l de salinité totale, soit un peu plus de deux fois celle de l'eau de mer. Or cette composition est inhabituelle. Les saumures de tous les lacs salés de l'Altiplano contiennent environ 75 % de chlorure de sodium et 25 % d'autres solutés. Le lac Tauca avait 95 % de sel ordinaire (halite) et seulement 5 % d'autres solutés. Il était soit fortement appauvri en constituants secondaires, soit fortement enrichi en chlorure de sodium. Le problème a une importance économique. En effet, au cas où cette anomalie serait due à une perte de constituants secondaires, comme le lithium, il fallait les rechercher plus en profondeur. Un sondage de 121 mètres a été réalisé dans la zone centrale du salar. On a alors découvert onze autres croûtes de sel séparées par des sédiments lacustres : une sorte d'énorme millefeuille. La conclusion est qu'une dizaine de lacs salés, au moins, ont successivement

Les réserves minières du salar d'Uyuni

Alors que l'ensemble des réserves en lithium du monde occidental était estimé en 1974 à 4,1 millions de tonnes, il y en a plus du double à Uyuni : environ 9 millions de tonnes. Or ces gigantesques réserves en lithium constituent un énorme potentiel énergétique. Les piles au lithium sont couramment utilisées dans les appareils photographiques ou les calculatrices de poche. C'est aussi sur ce type de piles que portent les recherches pour l'alimentation des futures voitures électriques. Si aujourd'hui la production de lithium n'est que de l'ordre d'une dizaine de milliers de tonnes par an, la demande devrait croître fortement au prochain millénaire. Le lithium sert de refroidisseur dans les réacteurs de fusion thermonucléaire⁽¹⁵⁾ et il est aussi employé dans l'industrie du verre, de l'aluminium et dans les lubrifiants. Les réserves en bore et potassium sont également importantes : respectivement 8 millions et 200 millions de tonnes. En 1990, la production mondiale était d'environ 400 000 tonnes pour le bore, exclusivement à partir d'évaporites continentales, et de 25 millions de tonnes pour le potassium. Si l'on considère en plus les quantités quasi illimitées de chlorure de sodium et de croûte de sel (70 milliards de tonnes) et de carbonate de calcium dans les formations géologiques autour du salar (deux produits de base de l'industrie chimique), on se rend compte de l'extraordinaire potentiel économique que représente le salar d'Uyuni pour la Bolivie.

- (10) F. Risacher et B. Fritz, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, 687, 1991
 (11) G.E. Erickson et al., *Energy*, 3, 355, 1978.
 (12) F. Risacher et B. Fritz, *Chem. Geol.*, 90, 211, 1991.
 (13) F. Risacher, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 299, série II, 701, 1984.
 (14) M. Servant et J.C. Fontes, *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, vol. X 1, 9, 1978.
 (15) R.N. Alonso et al., *Geology*, 19, 401, 1991.
 (16) H. Larsen, in A. Nissenbaum (ed.), *Development in Sedimentology*, 28, Elsevier, 1980, p. 23.
 (17) P. Sorgeloos et al., *European Mariculture Soc., Spec. Publ.* 5, 1980.
 (18) D.H. Scott et al., in *Sedimentary and paleolimnological records of saline lakes*, Intern. Conference, Saskatoon, Canada, Abstracts, 1991.
 (19) J.D. Vine (ed.), *US Geol. Survey Prof. Paper*, 1005, 1976.

1) « Les certitudes des paléoclimatologues » et « Lire l'avenir dans les archives géologiques » dans *La Recherche* de mai 1992.

Les Editions de Physique

présentent

Acoustique Générale

Coordonné par P.J. T. Filippi
Laboratoire de Mécanique et
d'acoustique du C.N.R.S., Marseille



**Acoustique
Générale**

P.J.T. Filippi
(coordonnateur)

La Société Française
d'Acoustique et les Editions de
Physique associent leurs
compétences au service d'une
nouvelle collection
d'acoustique et présentent ici
le premier ouvrage de la série

ISBN : 2-86883-235-0

374 Pages

Prix : 450 Frs

Catalogue des publications
gratuit sur simple demande

les éditions  de physique

7 Avenue du Hoggar
Z.I. de Courtaboeuf
91944 Les Ulis cedex A
tel : (1) 69 07 36 88
Fax : (1) 69 28 84 91

occupé l'Altiplano central durant le Quaternaire, reflétant autant d'oscillations climatiques et d'épisodes sédimentaires qui ont fossilisé les niveaux de sel. En s'asséchant, chacun de ces lacs déposait une nouvelle croûte de sel. Chaque fois qu'un nouveau lac s'établissait dans le bassin, il redissolvait une partie de la croûte déposée par le lac précédent. Cela signifie que chaque lac était enrichi en chlorure de sodium et que cette anomalie se transmettait de lac en lac par l'intermédiaire des croûtes de sel. Imaginons qu'un nouveau lac vienne occuper aujourd'hui l'Altiplano. Il redissoudrait une partie du salar d'Uyuni et sa composition chimique présenterait un fort excès de sel ordinaire par rapport aux solutés secondaires. Par ailleurs, les saumures imprégnant tout le profil ne montrent aucune augmentation de leurs teneurs en lithium, potassium, magnésium et bore, avec la profondeur, ce qui confirme que ces éléments ne se sont pas infiltrés sous la croûte du salar d'Uyuni (fig. 6).

*D'où provient donc
le sel de l'Altiplano ?
Sans doute d'anciennes
remontées de gypse
lessivées par le temps,
elles-mêmes issues de
dépôts vieux de plusieurs
centaines de milliers
d'années*

Le sel du salar d'Uyuni provient donc de redissolutions successives d'anciennes croûtes de sel. Mais cela ne fait que repousser le problème dans le temps. D'où provient le sel des croûtes les plus anciennes à la base du profil ? On constate que de nombreuses remontées de gypse (diapirs) d'âge tertiaire affleurent dans tout l'Altiplano. Ce sont les restes d'anciens salars plissés et faillés. L'existence de sources de saumures chlorurées-sodiques dans un de ces diapirs suggère que le sel des croûtes profondes provient du lessivage du sel de ces anciennes formations évaporitiques au début de l'histoire lacustre de l'Altiplano, il y a quelques centaines de milliers d'années. Aujourd'hui il ne reste plus que du gypse, minéral peu soluble. Mais là encore, c'est repousser le problème dans le temps. D'où vient le sel des salars du Tertiaire ? C'est sur cette question majeure que s'arrêtent nos connaissances sur les évaporites de l'Altiplano bolivien. Il existe des milliers de kilomètres cubes de sel continental tertiaire, au Chili et en Argentine⁽¹⁾. Certains auteurs penchent pour une origine volcanique du chlore et du sodium. Ou

D eux grandes familles d'évaporites

Les eaux diluées qui alimentent les bassins évaporitiques contiennent des cations Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} et des anions Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} provenant de l'altération, par les eaux de pluie et hydrothermale, des roches éruptives, sédimentaires ou métamorphiques du bassin versant, de la dissolution d'anciennes évaporites, d'émanations volcaniques et de l'atmosphère. Soumises à l'évaporation, ces eaux vont précipiter une séquence de minéraux dans l'ordre de leur solubilité croissante. Le premier minéral qui précipite, étant donné sa très faible solubilité, est toujours la calcite CaCO_3 . En première approximation, le produit des concentrations du calcium et du carbonate doit rester constant tout au long de la précipitation de la calcite. Si la concentration de l'un augmente, celle de l'autre doit diminuer. Ce mécanisme induit deux voies évolutives bien distinctes. S'il y a plus de calcium que de carbonate dans l'eau initiale, la solution s'enrichira en calcium et s'appauvrira en carbonate. C'est la voie saline neutre. Le pH de la saumure reste compris entre 7 et 8. En revanche, s'il y a plus de carbonate que de calcium dans l'eau de départ, alors c'est le carbonate qui se concentrera. La solution devient basique et son pH s'élève au-dessus de 10. C'est la voie alcaline. Cette dichotomie fondamentale détermine les deux principales familles d'évaporites continentales : les sels neutres et les sels alcalins. Elle se produit très tôt dans l'évolution des eaux. Après la calcite, d'autres minéraux vont précipiter en induisant à chaque fois une nouvelle dichotomie. Par exemple, la formation du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) détermine deux voies évolutives : l'une riche en Ca et pauvre en SO_4 , l'autre pauvre en Ca et riche en SO_4 .

bien y a-t-il eu, à une époque antérieure au Tertiaire, des dépôts d'évaporites marines qui auraient été reprises par la suite dans des environnements continentaux ? On connaît effectivement en Bolivie des formations évaporitiques au Crétacé, au Permien et même au Cambrien, au tout début de l'ère primaire. Sont-elles l'origine première du sel ? De futures études conjointes de la géodynamique des bassins et de la géochimie des anciennes évaporites apporteront peut-être une réponse à cette question. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

- H.P. Eugster et L.A. Hardie. « Saline lakes », in A. Lerman (ed.), *Lakes, chemistry, geology, physics*. Springer-Verlag, 1978.
- P. Sonnenfeld, *Brines and evaporites*. Academic Press, 1984.
- U.T. Hammer, *Saline lake ecosystems of the world*. Junk Publishers, 1986.
- - Lac Natron. Géologie, géochimie et paléontologie d'un bassin évaporitique du rift est-africain. *Sci. Géol., Bull.*, 40, 1-2, 1987.
- F. Risacher, « Géochimie des lacs salés et croûtes de sel de l'Altiplano bolivien ». *Sci. Geol., Bull.*, 45, 3-4, 1993.

Marconi a-t-il inventé la radio ?

LA

RECHERCHE

**Surprise : les vaccins ADN • Les Scythes de l'Altai
Un arbre-usine, l'hévéa • La genèse des lacs salés**



**L'Univers
révélé par
les quasars**

M 1108 - 276 - 38,00 F

MENSUEL N° 276 MAI 1995 • 38 FRANCS

41842

