



Bulletin de l'Institut français d'études andines

ISSN: 0303-7495

secretariat@ifea.org.pe

Institut Français d'Études Andines

Organismo Internacional

Coudrain-Ribstein, Anne; Sondag, Francis; Loubet, Michel; Talbi, Amal; Pouyaud, Bernard; Jusserand, Claude; Quintanilla, Jorge; Cahuaya, David; Gallaire, Robert

Existe-t-il une mémoire des 15 000 dernières années dans l'aquifère de l'Altiplano?

Bulletin de l'Institut français d'études andines, vol. 27, núm. 3, 1998

Institut Français d'Études Andines

Lima, Organismo Internacional

Available in: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12627306>

- How to cite
- Complete issue
- More information about this article
- Journal's homepage in redalyc.org

redalyc.org

Scientific Information System

Network of Scientific Journals from Latin America, the Caribbean, Spain and Portugal

Non-profit academic project, developed under the open access initiative

EXISTE-T-IL UNE MÉMOIRE DES 15 000 DERNIÈRES ANNÉES DANS L'AQUIFÈRE DE L'ALTIPLANO ?

Anne COUDRAIN-RIBSTEIN *, Francis SONDAG **, Michel LOUBET ***, Amal TALBI *, Bernard POUYAUD **, Claude JUSSEYRAND ****, Jorge QUINTANILLA *****, David CAHUAYA *****, Robert GALLAIRE **

Résumé

L'aquifère de l'Altiplano central présente une concentration en Cl croissante d'amont (0,5 meq l⁻¹) en aval (150 meq l⁻¹). Les valeurs supérieures à 20 meq l⁻¹ ne peuvent pas être expliquées par un fonctionnement hydrologique comparable à celui prévalant actuellement. Le principal flux sortant de l'aquifère est l'évaporation (E) dont la quantification régionale a été estimée à l'aide d'une relation établie pour l'ensemble des zones arides : $E \text{ (mm an}^{-1}\text{)} = 63 Z^{-1.5}$ avec Z (m) la profondeur du niveau saturé sous le sol. L'aquifère étudié a pu acquérir de fortes salinités lors de l'importante phase lacustre Tauca (15 Ka BP). Les arguments en faveur de cette hypothèse sont : (i) niveau maximum du lac (3 780 m) supérieur à l'altitude du sol dans la zone, (ii) même ordre de salinité dans le Tauca et dans les eaux souterraines salées, (iii) rapports isotopiques du Sr identiques dans les dépôts calcaires du Tauca et dans les eaux souterraines salées, (iv) rapport molaire Li/Cl faible dans les eaux souterraines salées et dans le Tauca, (v) temps de transfert modélisé compatible avec l'évolution spatiale actuelle de la concentration en Cl. On peut surimposer à ce scénario l'hypothèse d'un retard du transfert convectif vers l'aval par les effets conjugués de l'accumulation de sel dans la zone non saturée par évaporation de la nappe pendant des milliers d'années, et du retour de ce sel vers l'aquifère lors de courtes périodes très pluvieuses.

Mots-clés : Andes, Altiplano, hydrogéologie, Holocène, paléolac Tauca, salinisation.

¿EXISTE MEMORIA DE LOS ULTIMOS 15 000 AÑOS EN LA CAPA FREÁTICA DEL ALTIPLANO CENTRAL?

Resumen

El acuífero del Altiplano central presenta una concentración en Cl que crece desde aguas arriba (0,5 meq l⁻¹) hasta aguas abajo (150 meq l⁻¹). Los valores que superan los 20 meq l⁻¹ no se

* UMR Sisyphe, CNRS-UPMC, case 123, 4 place Jussieu, 75 252 Paris cedex 5, France.

** IRD (ex-ORSTOM), 213 rue La Fayette, 75 480 Paris cedex 10, France.

*** Unité de recherche Géochimie CNRS - Université Paul Sabatier, 31 400 Toulouse, France.

**** Centre de Recherche Géodynamique, BP 510, 74 203 Thonon, France.

***** Instituto de Investigaciones Químicas, Univ. Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.

***** YUNTA, ONG boliviana, CP 14 529, La Paz, Bolivia.

pueden explicar con un fonctionnement similaire al presente. El flujo mayor que sale del acuífero es evaporación (E) cuya evaluación a nivel regional se realizó mediante la relación establecida para todas las zonas áridas: $E \text{ (mm año}^{-1}\text{)} = 63 Z^{-1.5}$ con Z (m) la profundidad del agua debajo del suelo. Este acuífero ha podido adquirir fuertes concentraciones de Cl durante la última fase lacustre Taucá (15 Ka BP). Los argumentos a favor de esta hipótesis son: (i) nivel máximo del lago (3780 m) supera la altura del suelo en la zona, (ii) mismo orden de salinidad en el paleólago y en las aguas subterráneas salinas, (iii) relación isotópica de Sr idéntica en los depósitos calcáreos del Taucá y en las aguas subterráneas salinas, (iv) relación molar Li/Cl débil e idéntica en las aguas salinas del acuífero y del Taucá, (v) tiempo de recorrido modelizado compatible con la evolución espacial actual de la concentración en Cl. A este guión se puede sobreponer la hipótesis de un retraso de la convección subterránea de las sales hacia el sur por los efectos conjugados de la acumulación de sal en la zona no saturada durante miles de años y del regreso de esta sal hacia el acuífero durante periodos cortos muy lluviosos.

Palabras claves: *Andes, Altiplano, hidrogeología, Holoceno, paleolago Taucá, salinización.*

DOES MEMORY EXIST OF PAST 15 000 YEARS IN THE AQUIFER OF THE ALTIPLANO ?

Abstract

The aquifer of the central Altiplano shows a Cl concentration that increases from 0.5 meq l⁻¹ upstream to 150 meq l⁻¹ downstream. Values of more than 20 meq l⁻¹ may not be explained by the present hydrological conditions. The main outflow process from the aquifer is the evaporation (E) whose regional quantification has been conducted using the relation established for all arid zone areas: $E \text{ (mm yr}^{-1}\text{)} = 63 Z^{-1.5}$ where Z (m) is the water table depth under soil surface. The aquifer under study may have acquired its high chlorine content during last lacustrine phase of the Taucá (15 Ka BP). Arguments for this hypothesis are: (i) maximum level of the lake (3780 m) higher than present soil elevation in the area, (ii) same order of salinity in the paleolake and in the more saline groundwater, (iii) identical values of Sr isotopic ratio in calcareous deposits from the Taucá and in saline groundwater, (iv) weak molar ratio of Li/Cl in saline groundwater and in the Taucá, (v) modelling of Cl transport consistent with observed spatial evolution of Cl in groundwater. To this scenario, might be superimposed the assumption of a delay for the convective transfer of salt towards south by the coupled effects of accumulation of salt in the unsaturated zone by evaporation from the aquifer during thousand or so years, and of the subsequent return of this salt downwards to the aquifer during some short rainy periods.

Key words: *Andes, Altiplano, hydrogeology, Holocene, paleolake Taucá, salinisation.*

1. INTRODUCTION ET SYNTHÈSE DES DONNÉES HYDROCHIMIQUES

La zone d'étude d'environ 6 000 km² se situe dans la partie centrale du bassin endoréique de l'Altiplano (Fig. 1) entre le lac Titicaca et le Salar d'Uyuni, qui sont eux-mêmes les points bas des deux principaux sous bassins limités par le seuil de Ulloma à 3 770 m. La portion d'aquifère étudiée se trouve à la limite amont du sous bassin Poopó-Coipasa-Uyuni et occupe des sédiments fluvio-lacustres du Quaternaire. La précipitation actuelle, concentrée en une saison des pluies, est de l'ordre de 350 mm an⁻¹. Elle permet une recharge de l'aquifère par ruissellement entre les reliefs et la plaine. L'autre mode de recharge actuelle est l'alimentation par le rio Desaguadero, lui-même alimenté par le lac Titicaca et d'autres tributaires du bassin nord. Les concentrations en chlore dans

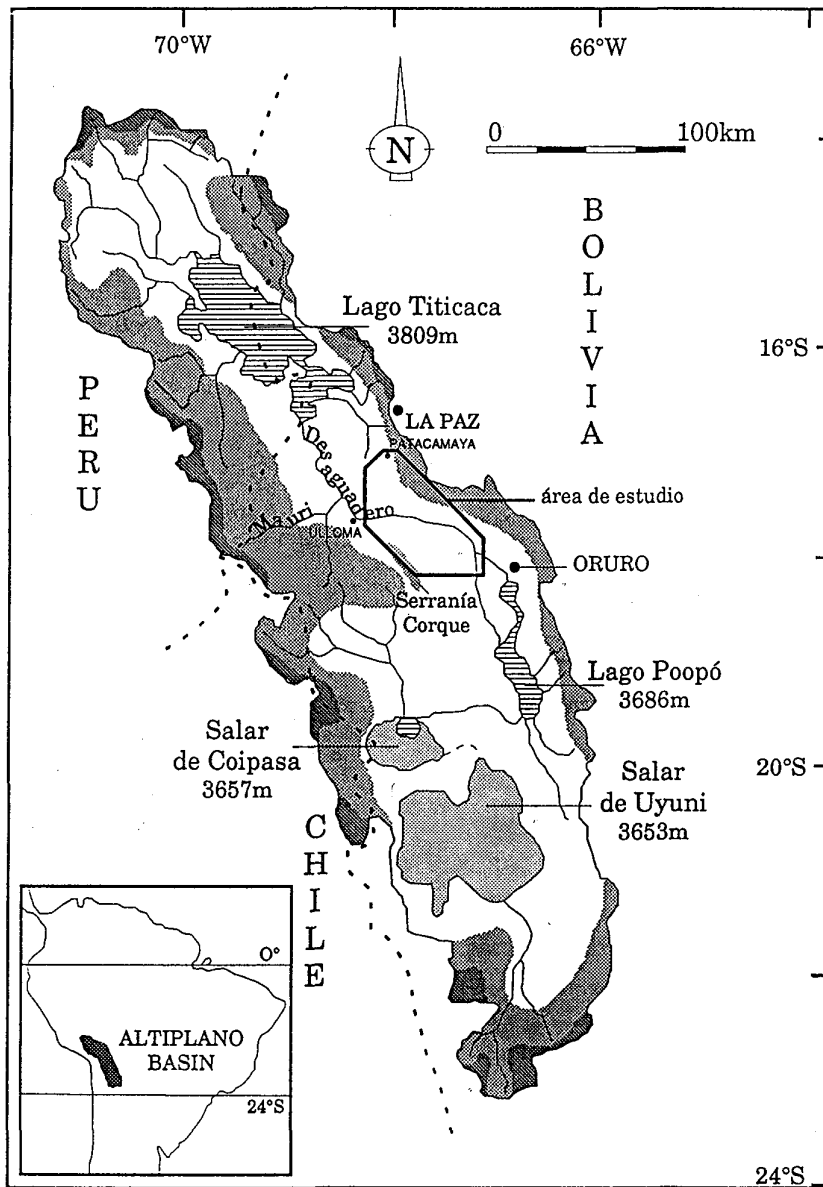


Fig. 1 - Croquis de l'Altiplano avec la zone d'étude. Gris foncé : altitude supérieure à 5 000 m; gris clair: altitude de 5 000 à 4 000 m; blanc: altitude de 4 000 à 3 600 m. Ce bassin endoréique comprend deux principaux sous bassins séparés par le seuil de Ulloma situé à l'ouest de la zone étudiée. Ce seuil, aujourd'hui à 3 770 m, sépare les bassins du Titicaca au Nord et du Poopó et des salars au Sud.

l'eau souterraine à partir de ces deux modes de recharge sont de 0,5 et 10 meq l⁻¹ respectivement. Les conditions actuelles ne permettent donc pas d'expliquer les fortes concentrations présentes à l'aval qui atteignent 150 meq l⁻¹ (Fig. 2). Une étude hydrologique du régime actuel (Coudrain-Ribstein *et al.*, 1995) a montré que le principal flux sortant est l'évaporation par la majeure partie de la surface de l'aquifère où le niveau piézométrique est à moins de 20 m sous le sol. Quatre hypothèses de travail peuvent être proposées pour expliquer les fortes concentrations en chlorure :

- d'éventuels aquifères salés profonds,
- les saumures contenues dans les roches magmatiques proches de la Joya,
- le sel accumulé dans la zone non saturée par évaporation de l'aquifère,
- le paléolac Tauca ayant pu recouvrir l'aquifère vers 15 000 ans BP.

La recherche est à ce stade comme une fouille hydrologique où le propos est de décrypter les phénomènes à l'origine de l'évolution spatiale de la composition chimique de l'eau en surface et dans l'aquifère. Les analyses ont été menées sur de nombreux échantillons depuis le lac Titicaca jusqu'au salar d'Uyuni avec une densité d'échantillonnage plus importante dans l'aquifère étudié. Ces résultats peuvent être

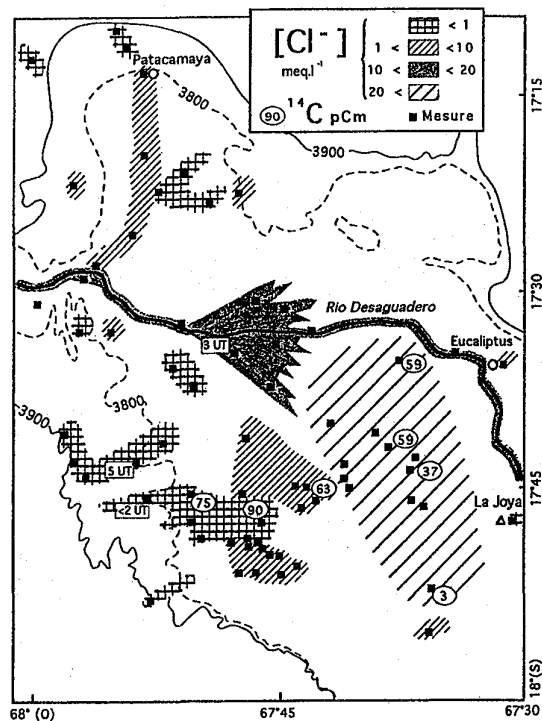


Fig. 2 - Aquifère de l'Altiplano central. La concentration en Cl augmente depuis l'amont (0,5 meq l⁻¹) dans les zones d'infiltration près des reliefs (5 unités tritium) vers l'aval (150 meq l⁻¹) où l'analyse en ¹⁴C donne 3 pCm.

résumés comme suit. Les deux modes de recharge actuelle de l'aquifère, ruissellement sur reliefs tertiaires locaux et écoulement en provenance du bassin du Titicaca, présentent des caractéristiques chimiques différentes qui sont respectivement :

$\delta^{18}\text{O} = -15\text{‰}$; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0,7104 \pm 0,0004$; forte concentration en U (1 - 10 ppb); Li/Cl molaire de 0,058 à 0,010

$\delta^{18}\text{O} = -10\text{‰}$; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0,7080 \pm 0,0010$; forte concentration en As (20 - 2 10^3 ppb) ; Li/Cl molaire de 0,007 à 0,005.

Les eaux souterraines salées ($\text{Cl} > 20 \text{ meq l}^{-1}$) présentent des valeurs intermédiaires pour les paramètres isotopes du strontium ($0,7089 < ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0,7109$), isotopes de l'eau, uranium et arsenic. Elles présentent par contre des valeurs plus faibles pour le rapport Li/Cl (0,004). Les valeurs de ^{14}C de ces eaux sont comprises entre 57 et 3 pCm. Les stromatolites déposés pendant la dernière phase lacustre vers 13Ka BP présentent des valeurs isotopiques en strontium comprises dans l'intervalle des valeurs des eaux souterraines salées (0,7084 - 0,7093). Le graphe de $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ suggère qu'une certaine évaporation a affecté ces eaux avant leur infiltration.

2. SALINISATION PAR D'AUTRES EAUX SOUTERRAINES

La salinisation par des aquifères plus profonds est bien documentée dans des aquifères tels que ceux du Bassin Parisien (Wei *et al.*, 1990) ou en Israël (Vengosh & Rosenthal, 1994). Si un tel processus était responsable de l'importante salinisation de l'aquifère de l'Altiplano, les valeurs des paramètres chimiques dans les eaux salées seraient notablement différentes et vraisemblablement pas intermédiaires entre celles des deux sources de recharge. Avec les données disponibles à ce jour, cette hypothèse doit donc être rejetée.

L'autre source souterraine possible est celle des saumures hydrothermales contenues dans des dômes dacitiques d'âge compris entre 15 et 5 Ma (Columba & Cunningham, 1993) et qui apparaissent dans un cercle fracturé d'environ 15 km autour de La Joya (Fig. 2). Trois puits d'eau salée sont dans cette zone et ne présentent pas de similarité chimique avec les saumures analysées pour un des dômes. Un puits, à 6 km à l'ouest d'un petit dôme de dacite, présente la plus forte valeur (0,711) de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, ce qui pourrait indiquer un lien avec la saumure qui a une valeur de 0,719. Cependant, les concentrations en uranium et en arsenic ne corroborent pas une relation hydrochimique de ce puits avec la saumure. Donc même si la relation des eaux de l'aquifère quaternaire avec les saumures peut exister dans le voisinage des dômes, cette hypothèse doit aussi être rejetée pour expliquer la salinisation d'un volume important de l'eau des sédiments quaternaires.

3. ÉVAPORATION D'UNE NAPPE PHRÉATIQUE EN ZONE ARIDE

L'estimation locale de l'évaporation à partir des aquifères a d'abord été établie sur la base de l'équation de flux d'eau dans la zone non saturée en adoptant l'hypothèse du régime permanent (Gardner, 1958). En tenant compte de l'évolution de la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau, ces études ont abouti à une équation de l'évaporation à partir de l'aquifère correspondant à une fonction exponentielle inverse

de la profondeur du niveau de l'eau sous la surface du sol. En rassemblant les résultats de différents cas d'études (Gardner & Fireman, 1958 ; Talsma, 1963 ; Thorburn *et al.*, 1992 ; Willis, 1960 ; Wind, 1955), pour un niveau d'eau à un mètre sous le niveau du sol, l'évaporation pourrait être de 8 mm an⁻¹ ou de 9,5 m an⁻¹ suivant la nature du sol (Fig. 3). Une telle plage de variation paraît trop large pour être réaliste.

Depuis les années 80, une autre méthode d'estimation locale de l'évaporation à partir des aquifères en zone aride a émergé. Elle est basée sur l'interprétation des profils de la zone non saturée en isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) et en Cl. Ces estimations sont basées sur l'utilisation de l'équation de transport, contenant un terme de diffusion et un terme de convection à partir de l'aquifère. Une trentaine de couples de données, avec évaporation estimée et profondeur du niveau saturé, ont été rassemblés. Ils montrent que l'évaporation décroît de 900 mm an⁻¹ à 1 mm an⁻¹ quand la profondeur du niveau saturé croît de 0,3 m à 18 m sous la surface du sol (Fig. 3). Les données proviennent de sites en Algérie, Australie, Bolivie, Chili, Niger, Réunion et Tunisie (Allison & Barnes,

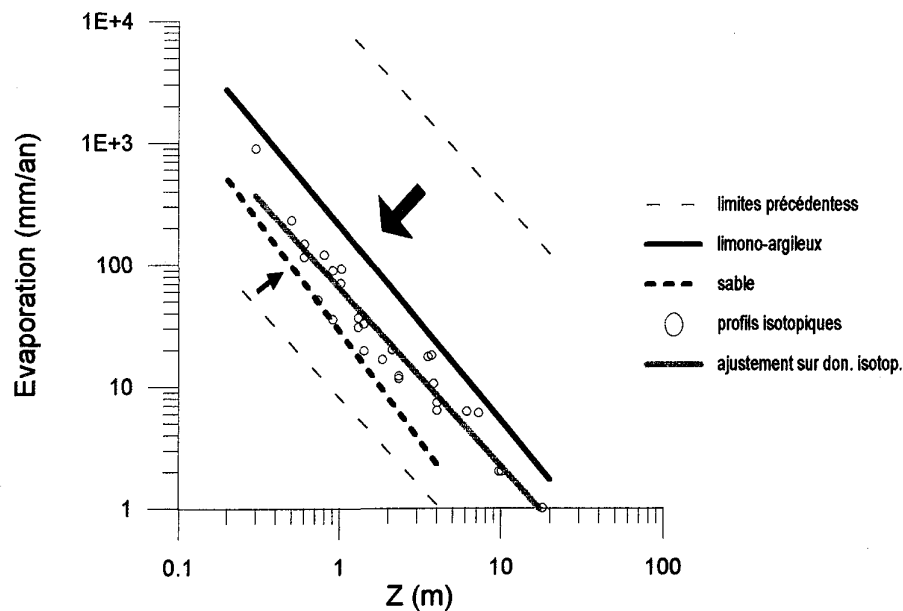


Fig. 3 - Évaporation (E) à partir d'une nappe phréatique vs. profondeur du niveau de la nappe sous le sol (Z). Courbes "limites précédentes" : estimations inférieures et supérieures de E à partir d'études hydrauliques basées sur des données insuffisantes pour les zones arides. Courbes "sable" et "sol limono-argileux" : calculées sur la base de l'évolution de la conductivité hydraulique pour une large plage de la succion (0 à plus de 1 000 m). Cercles : estimations locales de E par des profils isotopiques de la zone non saturée.

1985 ; Aranyosy *et al.*, 1991 ; Colin-Kaczala, 1986 ; Coudrain-Ribstein *et al.*, 1997 ; Daoud, 1995 ; Fontes *et al.*, 1986 ; Grilli *et al.*, 1989 ; Grunberger, 1989 ; Taupin, 1990 ; Zouari *et al.*, 1985). Sur cette très nette et unique relation provenant de différents sols, une courbe exponentielle inverse a été ajustée :

$$E = 63 (\pm 5) Z^{-1.5}$$

avec E en mm an^{-1} et Z en m.

Ce résultat semblait en apparence contradiction avec la dépendance précédemment établie de l'évaporation avec les caractéristiques du sol. Quelles conditions particulières existent en zone aride telles que les différents sols convergent vers une même évaporation à partir de l'aquifère ? En zone aride, la succion près de la surface du sol atteint des valeurs élevées de l'ordre de 1 600 m (Scanlon, 1994) ou même de 4 822 m (Woods, 1990). Or les études hydrauliques citées plus haut (Gardner & Fireman, 1958 ; Talsma, 1963 ; Willis, 1960 ; Wind, 1955) ne tenaient compte que de suctions de moins de 150 m et n'étaient donc pas valables pour l'application aux zones arides. La dernière étude citée plus haut (Thorburn *et al.*, 1992), qui tenait compte d'une succion de 4 822 m, avait été conduite sur un sol particulièrement argileux pour lequel une conductivité hydraulique à saturation était de l'ordre de $10^{-10} \text{ m s}^{-1}$. Dans ce cas, l'hypothèse d'un régime permanent d'évaporation à partir de l'aquifère n'était très vraisemblablement pas justifiée.

De récentes publications fournissent l'évolution de la conductivité hydraulique pour des gammes de succion depuis zéro correspondant à la saturation jusqu'à des valeurs supérieures à 1 000 m (Mehta *et al.*, 1994 ; Stolte *et al.*, 1994). Ces nouvelles données ont permis de calculer (Coudrain-Ribstein *et al.*, 1998) de nouvelles limites du flux d'évaporation à partir d'aquifères en région aride :

$$28 z^{-1.8} < E < 205 z^{-1.6}$$

où les limites inférieure et supérieure correspondent à un sable et à un sol argileux (Fig. 3). Ces résultats corroborent la faible influence des caractéristiques du sol sur l'évaporation à partir d'aquifères en zone aride.

En appliquant cette relation au cas de l'Altiplano central, avec une profondeur de l'eau d'environ 5 m, l'évaporation depuis l'aquifère pourrait atteindre 30 m en 5 000 ans qui est la durée de la période reconnue comme très aride entre 9 000 et 4 000 BP. En supposant que la concentration initiale de l'aquifère était de l'ordre de 10 meq l^{-1} , la quantité de Cl ainsi accumulée dans la zone non saturée pour $4\,000 \text{ km}^2$ pourrait atteindre 10^{12} eq , quantité suffisante pour saliniser notablement l'eau souterraine. Avec une concentration initiale de 100 meq l^{-1} , la quantité de Cl stockée serait multipliée par 10. L'infiltration subséquente de ces sels devrait ensuite se faire avec une quantité d'eau suffisamment faible pour être cohérente avec les données de ^{14}C qui indiquent un âge croissant vers l'aval et atteignant plus de 4 000 ans (3 pCm). Enfin cette hypothèse ne permet pas de rendre compte d'un rapport Li/Cl plus faible dans les eaux souterraines salées. Si ce scénario reste vraisemblable il n'est cependant pas suffisant.

4. SALINISATION PAR LE PALÉOLAC TAUCA

Dans le cas du scénario du paléolac Tauca, la première question est de savoir si le lac a recouvert l'aquifère dans cette zone. Les premières données de radiocarbone

dans le bassin sud de l'Altiplano proposaient un niveau de 3 720 m vers 12 Ka BP (Servant & Fontes, 1978). Les études ultérieures (Bills *et al.*, 1994 ; Mourguiart *et al.*, 1997 ; Rondeau, 1990 ; Servant *et al.*, 1995) convergent vers l'hypothèse d'un maximum atteint à près de 3780 m vers 16 800 ans BP, en utilisant de récentes méthodes de calibrage (Bard *et al.*, 1990), et d'une durée de la phase lacustre de plusieurs milliers d'années. Avec une altitude du sol au-dessus de l'aquifère étudié comprise entre 3 810 et 3 700 m, il est raisonnable de considérer que l'aquifère a été recouvert par le lac jusqu'à une altitude de 3 760 m pendant une période suffisamment longue pour que la diffusion puisse modifier la composition de l'eau souterraine.

La deuxième question de ce scénario porte sur la salinité du lac. En dissolvant tous les composants chimiques des deux grandes croûtes de sels d'Uyuni (10 000 km²) et de Coipasa (2 500 km²) dans le volume du paléolac avec un niveau de 3 720 m (Risacher & Fritz, 1991), la salinité moyenne aurait été de 80 g l⁻¹ avec une concentration en chlore de 40 g l⁻¹. Avec l'hypothèse d'un niveau plus haut de quelques dizaines de mètres, la salinité aurait pu être de l'ordre de la moitié, soit 40 g l⁻¹. En tenant compte d'une épaisseur de l'aquifère de l'ordre de 50 m d'après des travaux géophysiques préliminaires par sondages électriques (Ledezma *et al.*, 1995), la diffusion pendant deux mille ans aurait permis d'atteindre une salinité dans l'aquifère d'environ 10 g l⁻¹. Les plus fortes salinités sont aujourd'hui de cet ordre avec une concentration en chlore de 5 g l⁻¹.

Ce sel ainsi diffusé, pourrait-il être encore présent dans l'aquifère ? Pour y répondre, une modélisation du transport de Cl dans l'aquifère a été entreprise sur une durée de 11 500 ans. Pour cela, il était nécessaire de reconstituer l'évolution de la pluie annuelle sur cette période. Une estimation de 600 mm an⁻¹ a été publiée (Hastenrath & Kutzbach, 1985) et est celle qui permettrait de maintenir le lac Tauca à une altitude de 3 720 m. Dans la présente étude, sur la base de l'évolution des fluctuations du niveau d'eau du lac Titicaca (Mourguiart *et al.*, 1997), de la relation de surface du Titicaca en fonction de sa profondeur (Wirrmann *et al.*, 1992) et de la relation entre la quantité de pluie et la surface du lac (Binford *et al.*, 1997), il a été calculé que la plus faible quantité de pluie dans la région (17° 30S) serait de 280 mm pendant la période aride de 9 000 à 4 000 ans BP. La modélisation tient compte de l'évolution de la pluie annuelle et de l'absence de débit pérenne du rio Desaguadero entre 9 000 et 1 500 ans BP. La modélisation du transport de Cl dans l'aquifère pendant 11 500 ans permet d'illustrer l'influence des divers paramètres. En particulier, la concentration actuelle est une fonction croissante de la porosité et de l'épaisseur de l'aquifère, et décroissante de l'évaporation. Pour un contenu initial en Cl dans l'aquifère de 10 10¹² eq, un excès en Cl hérité du Tauca requerrait plusieurs milliers d'années pour disparaître.

Le rapport molaire Li/Cl d'après l'étude détaillée de la chimie des salars (Risacher & Fritz, 1991) est estimé à 0,0012 dans le paléolac Tauca. Cette valeur est notablement faible comparée à celle du Titicaca (0,0070) et celle du ruisseau au sud du salar d'Uyuni (0,0200), les deux extrêmes nord et sud susceptibles d'avoir alimenté le paléolac. Ces auteurs proposent comme explication que des évaporites tertiaires (NaCl principalement) aient été dissoutes lors d'une première phase lacustre. Les données obtenues dans la présente étude montrent que le rapport Li/Cl des eaux souterraines

salées est de 0,004 soit donc une valeur comprise entre l'estimation faite pour le Tauca, plus faible, et celle des deux modes de recharge actuels, plus forte. Ceci constitue un argument majeur en faveur de l'hypothèse de la salinisation de l'eau souterraine par le lac Tauca.

5. DISCUSSION ET CONCLUSION

D'un point de vue méthodologique, l'étude menée sur l'évaporation à partir des aquifères en zones arides est un exemple de l'utilité de confronter différentes approches. Les résultats obtenus à partir de l'approche isotopique ont permis de revoir les conclusions précédemment admises par l'approche hydraulique. La relation simple proposée pour estimer l'évaporation peut être utilisée pour l'estimation locale ou régionale, passée ou actuelle, d'un aquifère en région aride où ce processus constitue le principal terme d'exhaure.

Sur le fonctionnement de l'aquifère de l'Altiplano central, l'étude du régime hydrogéologique actuel, l'évolution spatiale des signatures géochimiques (^{14}C , U, As, $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et Li/Cl) et les résultats de modélisation du transport de Cl dans la nappe d'eau souterraine tendent à montrer que l'hypothèse de la salinisation par le paléolac Tauca est plausible.

Les signatures géochimiques des paramètres utilisés dans cette étude ne seraient pas modifiées par un stockage temporaire des sels en provenance de l'aquifère dans la zone non saturée. Ce phénomène peut aussi avoir fonctionné, retardant le transfert vers le sud des sels hérités par l'aquifère pendant la dernière phase lacustre majeure Tauca.

Le schéma de fonctionnement proposé aujourd'hui sur la base des données disponibles est le suivant. Le recouvrement de l'aquifère il y a environ 15 ka BP pendant deux à quatre mille ans a permis la diffusion de sel du paléolac salé vers l'eau souterraine jusqu'à des concentrations en chlorure de l'ordre de 200 meq l^{-1} . Après le retrait du lac vers 11,5 Ka BP, et depuis cette époque, le mouvement convectif souterrain vers le sud repousse ce nuage salé. Ce mouvement était très ralenti entre environ 10 Ka et 1,5 Ka BP, période plus aride que l'actuelle. La pluie annuelle a été estimée dans la présente étude à environ 280 mm an^{-1} au lieu de 350 mm an^{-1} aujourd'hui. De plus, l'alimentation de l'aquifère par le rio Desaguadero était très faible voire inexistante puisque le lac Titicaca avait un niveau inférieur au seuil permettant un flux de ce lac vers le rio Desaguadero.

Pendant cette même période, l'évaporation de l'aquifère par une surface importante de l'aquifère (environ 4 000 km^2) a pu permettre d'accumuler des sels dans la zone non saturée. À la faveur d'une période de quelques années humides, ces sels auraient pu être infiltrés à nouveau jusqu'à l'aquifère par un faible volume d'eau ne modifiant pas les autres caractéristiques chimiques de l'eau souterraine. La période de retour pourrait être vers 4 000 BP juste à la fin de la période très aride et où le niveau du lac Titicaca est à nouveau en phase croissante. Une autre et/ou nouvelle époque d'infiltration serait vers 1,5 ka BP où le lac Titicaca aurait connu un niveau moyen un peu plus élevé que l'actuel et où une lagune a pu s'installer dans la partie aval de la portion d'aquifère étudiée. Les profils de la zone non saturée effectués en 1993 montrent qu'il n'y aurait pas eu

d'infiltration dans la plaine depuis au moins deux mille ans, ce qui corroborerait cette date d'infiltration.

Références citées

- ALLISON, G.B. & BARNES, C. J., 1985 - Estimation of evaporation from the normally "dry" Lake Frome in South Australia. *J. Hydrol.*, **78**: 229-42.
- ARANYOSSY, J.F., FILLY, A., TANDIA, A.A., LOUVAT, D., OUSMANE, B., JOSEPH, A. & FONTES, J.C., 1991 - Estimation des flux d'évaporation diffuse sous couvert sableux en climat hyper-aride (erg de Bilma, Niger). *Isotope tech. Water Resour. Develop.*: 309-24.
- BARD, E., HAMELIN, B., FAIRBANKS, R. G. & ZINDLER, A., 1990 - Calibration of the 14C timescale over the past 30,000 years. *Nature*, **345**: 405-10.
- BILLS, B. G., DESILVA, S. L., CURREY, D. R., EMENGER, R. S., LILLQUIST, K. D., DONNELLAN, A. & WORDEN, B., 1994 - Hydro-isostatic deflection and tectonic tilting in the Central Andes - Initial results of a GPS Survey of lake Minchin Shorelines. *Geophys. Res. Lett.*, **21**(4): 293-6.
- BINFORD, M. W., KOLATA, A. L., BRENNER, M., JANUSEK, J. W., SEDDON, M. T., ABBOTT, M. & CURTIS, J. H., 1997 - Climate variation and the rise and fall of an Andean civilisation. *Quaternary Research*, **47**: 235-48.
- COLIN-KACZALA, C., 1986 - Profils isotopiques (^{18}O et ^2H) de fluides (eau liquide, vapeur et CO_2) de la zone non saturée sous climat désertique : application à l'évaporation des nappes libres au Sahara Nord-Occidental. Docteur en Sciences, Univ. Paris-Sud.
- COLUMBA, M. C. & CUNNINGHAM, C. G., 1993 - Geologic model for the mineral deposits of the La Joya district, Oruro, Bolivia. *Economic Geology*, **88**: 701-708.
- COUDRAIN-RIBSTEIN, A., LOOSEMORE, T., ROCHAT, P., QUINTANILLA, J. & YOUNGER, P., 1995 - Use of a groundwater model in assessing possible sources of salinity on the central Bolivian Altiplano. in: *Models for assessing and monitoring groundwater quality*, IAHS 227 (B. J. Wagner, T. H. Illangasekare & K. H. Jensen, ed.): 11-19.
- COUDRAIN-RIBSTEIN, A., PRATX, B., JUSSEMAND, C., QUINTANILLA, J. & CAHUAYA, D., 1997 - Bilan et évaporation d'un aquifère en zone aride, Altiplano central bolivien. in: *Hydrochimie, AISH 244* (J. Peters & A. Coudrain-Ribstein, ed.): 53-61.
- COUDRAIN-RIBSTEIN, A., PRATX, B., TALBI, A. & JUSSEMAND, C., 1998 - Is the evaporation from phreatic aquifers in arid zones independent of the soil characteristics? *C.R. Acad. Sci., Paris, sér. 2* **326**: 159-65.
- DAOUD, D., 1995 - Caractérisation géochimique et isotopique des eaux souterraines et estimation du taux d'évaporation dans le bassin du Chott Chergui (zone semi-aride), Algérie. Doct. en Sc., Univ. Paris-sud Orsay, 256p.
- FONTES, J. C., YOUSFI, M. & ALLISON, G. B., 1986 - Estimation of long-term, diffuse groundwater discharge in the northern Sahara using stable isotope profiles in soil water. *J. Hydrol.*, **86**: 315-27.
- GARDNER, W. R., 1958 - Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.*, **85**: 228-32.
- GARDNER, W. R. & FIREMAN, M., 1958 - Laboratory studies of evaporation from soil columns in the presence of a water table. *Soil Sci.*, **85**: 244-9.

- GRILLI, A., POLLASTRI, A., ORTIZ, J. & AGUIRRE, E., 1989 - Evaluación de tasas de evaporación desde salares utilizando técnicas isotópicas - aplicación en el salar de Bellavista, Chile. *Estudios de hidrología isotópica en América Latina*: 155-68; OIEA-TECDOC 502
- GRUNBERGER, O., 1989 - Etude géochimique et isotopique de l'infiltration sous climat tropical contrasté - massif du Piton des neiges - île de la Réunion. Dr en Sciences, Univ. Paris-Sud.
- HASTENRATH, S. & KUTZBACH, J., 1985 - Late Pleistocene climate and water budget of the South American Altiplano. *Quaternary research*, **24**: 249-56.
- LEDEZMA, R. D., JIMÉNEZ, A., MOREAU, S. & COUDRAIN-RIBSTEIN, A., 1995 - Recursos hídricos para riego en la provincia Villarroel, Altiplano Boliviano. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, **24**(3): 473-82.
- MEHTA, B. K., SHIZAWA, S. & NAKANO, M., 1994 - Hydraulic properties of a sandy soil at low water contents. *Soil Science*, **157**: 208-14.
- MOURGUIART, P., ARGOLLO, J., CORRÈGE, T., MARTIN, L., MONTENEGRO, M. E., SIFEDDINE, A. & WIRRMANN, D., 1997 - Changements limnologiques et climatologiques dans le bassin du lac Titicaca (Bolivie), depuis 30 000 ans. *C.R. Acad. Sci. Paris*, **325**: 139-46.
- RISACHER, F. & FRITZ, B., 1991 - Quaternary geochemical evolution of the salars of Uyuni and Coipasa, Central Altiplano, Bolivia. *Chem. Geology*, **90**: 211-31.
- RONDEAU, B., 1990 - Géochimie isotopique et géochronologie des stromatolites lacustres quaternaires de l'Altiplano bolivien. Maîtrise en sciences de la Terre, université du Québec.
- SCANLON, B. R., 1994 - Water and heat fluxes in desert soils. 1. field studies. *Water Resou. Res.*, **30**(3): 709-19.
- SERVANT, M. & FONTES, J. C., 1978 - Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques. *Cah. ORSTOM Géol.*, **X**(1): 9-23.
- SERVANT, M., FOURNIER, M., ARGOLLO, J., SERVANT-VILDARY, S., SYLVESTRE, F., WIRRMANN, D. & YBERT, J. P., 1995 - La dernière transition glaciaire/interglaciaire des Andes tropicales sud (Bolivie) d'après l'étude des variations des niveaux lacustres et des fluctuations glaciaires. *C. R. Ac. Sc. Paris*, **320**, **IIa**: 729-36.
- STOLTE, J., FREIJER, J. I., BOUTEN, W., DIRKSEN, C., HALBERTSMA, J. M., VANDAM, J. C., VAN DEN BERG, J. A., VEERMAN, G. J. & WÖSTEN, J. H. M., 1994 - Comparison of six methods to determine unsaturated soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **58**: 1596-603.
- TALSMA, T., 1963 - The control of saline ground water. *Meded Landbouwhogeschool, Wageningen, Nederland*, **63**: 1-68.
- TAUPIN, J. D., 1990 - Évaluation isotopique de l'évaporation en zone non saturée sous climat sahélien et évolution géochimique des solutions du sol (Vallée du Moyen Niger). Th. Dr 3° cycle, Univ. Paris Sud, Orsay, 172p.
- THORBURN, P. J., WALKER, G. R. & WOODS, P. H., 1992 - Comparison of diffuse discharge from shallow water tables in soils and salt flats. *J. Hydrol.*, **136**: 253-74.
- VENGOSH, A. & ROSENTHAL, E., 1994 - Saline groundwater in Israel: its bearing on the water crisis in the country. *J. Hydrol.*, **156**(1-4): 389-430.
- WEI, H. F., LEDOUX, E. & MARSILY, G. d., 1990 - Regional modelling of ground-water flow and salt and environmental tracers transport in deep aquifers in the Paris basin. *J. Hydrology*, **120**: 341-58.
- WILLIS, W. O., 1960 - Evaporation from layered soils in the presence of a water table. *Soil Science Society of America*, **24**: 239-42.
- WIND, G. P., 1955 - A field experiment concerning capillary rises of moisture in a heavy clay soil. *Neth. J. Agric. Sci.*, **3**: 60-9.

- WIRRMANN, D., YBERT, J. P. & MOURGUIART, P., 1992 - III. Paleohydrology. III.1. A 20,000 years paleohydrological record from Lake Titicaca. *in: Lake Titicaca. A synthesis of limnological knowledge* (C. Dejoux & A. Ittis, ed.): 40-8; Kluwer academic Publ.
- WOODS, P. H., 1990 - Evaporative discharge of groundwater from the margin of the Great Artesian Basin near Lake Eyre, South Australia. Ph. D., The Flinders Univ. of South Australia.
- ZOUARI, K., ARANYOSSY, J. F., MAMOU, A. & FONTES, J.-C., 1985 - Étude isotopique et géochimique des mouvements et de l'évolution des solutions de la zone aérée des sols sous climat semi-aride (sud tunisien). *in: Stable and radioactive Isotopes in the study of the unsaturated soil zone*, TECDOC-357: 121-43.

