

GENÈSE D'UNE CROÛTE DE GYPSE DANS UN BASSIN DE L'ALTIPLANO BOLIVIEN

François RISACHER
Géologue O.R.S.T.O.M.

Mission O.R.S.T.O.M., Cajón Postal 8714, La Paz, Bolivie

RÉSUMÉ

Les accumulations salines d'un bassin évaporitique semi-fermé de l'Altiplano bolivien sont replacées dans le contexte hydrogéologique local. La localisation du gypse dans le paysage, sel principal qui se dépose par évaporation capillaire de la nappe, est contrôlée par le mélange de deux eaux de même origine, mais qui ont subi deux trajets évolutifs distincts dans le bassin.

RESUMEN

Relacionamos las acumulaciones salinas de una cuenca evaporítica semi-cerrada del Altiplano boliviano con el contexto hidrogeológico local. La ubicación del yeso en el paisaje, sal en mayor cantidad depositada por evaporación capilar de la capa subterránea de agua, es controlada por la mezcla de aguas del mismo origen, por que han seguido dos caminos distintos de evolución en la cuenca.

GENESIS OF A GYPSUM CRUST IN A BASIN OF THE BOLIVIAN ALTIPLANO

ABSTRACT

The salt accumulations in a semi-closed basin of the Bolivian Altiplano are set back in the local hydrogeological conditions. The localization in landscape of gypsum, main salt which settles through capillary evaporation of the sheet, is governed by the mixing of two waters of the same origin, but which followed different evolutive routes in the basin.

ОБРАЗОВАНИЕ ГИПСОВОЙ КОРЫ В БАСЕЙНЕ БОЛИВИЙСКОГО АЛЬТИПЛАНО

РЕЗЮМЕ

Солевые накопления полу-закрытого эвапоритового бассейна боливийского Альтиплано рассматриваются в местном гидрогеологическом контексте. Локализация, в ландшафте, гипса - главной соли, осаждающейся посредством капиллярного испарения грунтовой воды, контролируется смесью двух вод одного и того же происхождения, но развившихся соответственно двумя различными путями в бассейне.

CADRE GÉNÉRAL

Le salar de Jayu Kkota est situé sur la bordure Ouest du lac Poopo, en terrain sédimentaire à 3 710 m d'altitude (fig. 1). C'est un bassin semi-clos qui s'est individualisé après le retrait du dernier grand lac (Tauca).

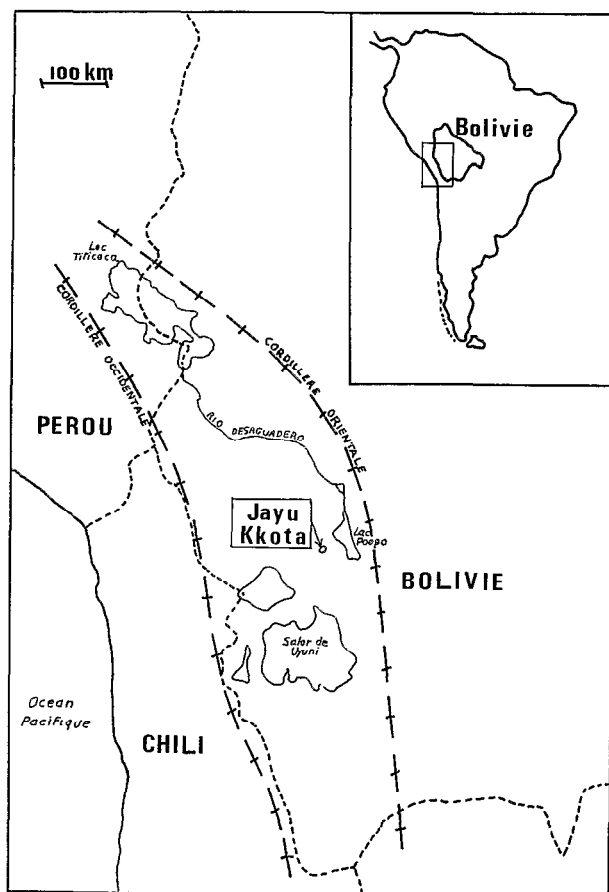


Fig. 1. — Situation géographique de Jayu Kkota.

Il est limité au Nord et au Sud par deux anticlinaux crétacés à cœur dévonien; d'axe SE-NO (grès gypsifères, quartzites, conglomérats à éléments volcaniques); à l'Ouest et au Nord-Ouest par un glacis; à l'Est il s'ouvre vers le lac Poopo par un exutoire, lit d'une ancienne rivière.

La lagune de Jayu Kkota, vestige de l'ancien lac, a pu subsister grâce à l'existence d'un axe anticlinal de direction SE-NO créant un relèvement topographique au Nord-Est du lac.

La morphologie des dépressions au Nord-Est dessinant un réseau de lignes triangulaires, fait penser à une origine tectonique des principales directions des zones basses (fig. 3).

Jayu Kkota est essentiellement un salar à dépôts diagénetiques capillaires actuels. La part sédimentologique, syngénétique des concentrations salifères est infime (2 petits niveaux de gypse).

On peut donc considérer que les sels résultent de l'interaction du fait sédimentologique (nature du support) avec le fait hydrogéologique (mouvement du vecteur).

Stratigraphie (fig. 2 et 3)

Des sables dunaires constituent le substrat général de la zone. Les anciens lacs, transgressifs sur ces dunes, ont déposé un placage argileux dans la dépression dont la lagune occupe actuellement le centre.

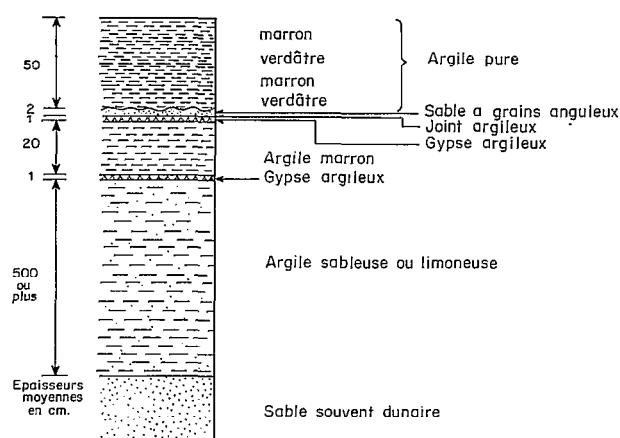


Fig. 2. — Coupe stratigraphique schématique du bassin de Jayu Kkota.

La fig. 2 montre les différents niveaux de ce remplissage. La couche argilo-sableuse venant immédiatement au-dessus du sable dunaire est d'une structure complexe, mais étant située sous le niveau de la nappe il est difficile d'en faire le détail. Signalons la présence de coquilles vers le bas de cette couche.

Les argiles sont un mélange de montmorillonite (80 %) et d'illite (20 %), avec quelques traces de kaolinite.

Les deux niveaux de gypse et la petite couche sableuse, bien que très minces (1 à 2 cm), sont parfaitement continus sur toute l'étendue du salar et constituent d'excellents niveaux repères.

On peut donc distinguer plusieurs séquences récentes :

— Deux phases d'assèchement marquées par les deux niveaux de gypse. Le joint argileux au sommet du deuxième niveau indique une période sèche assez longue.

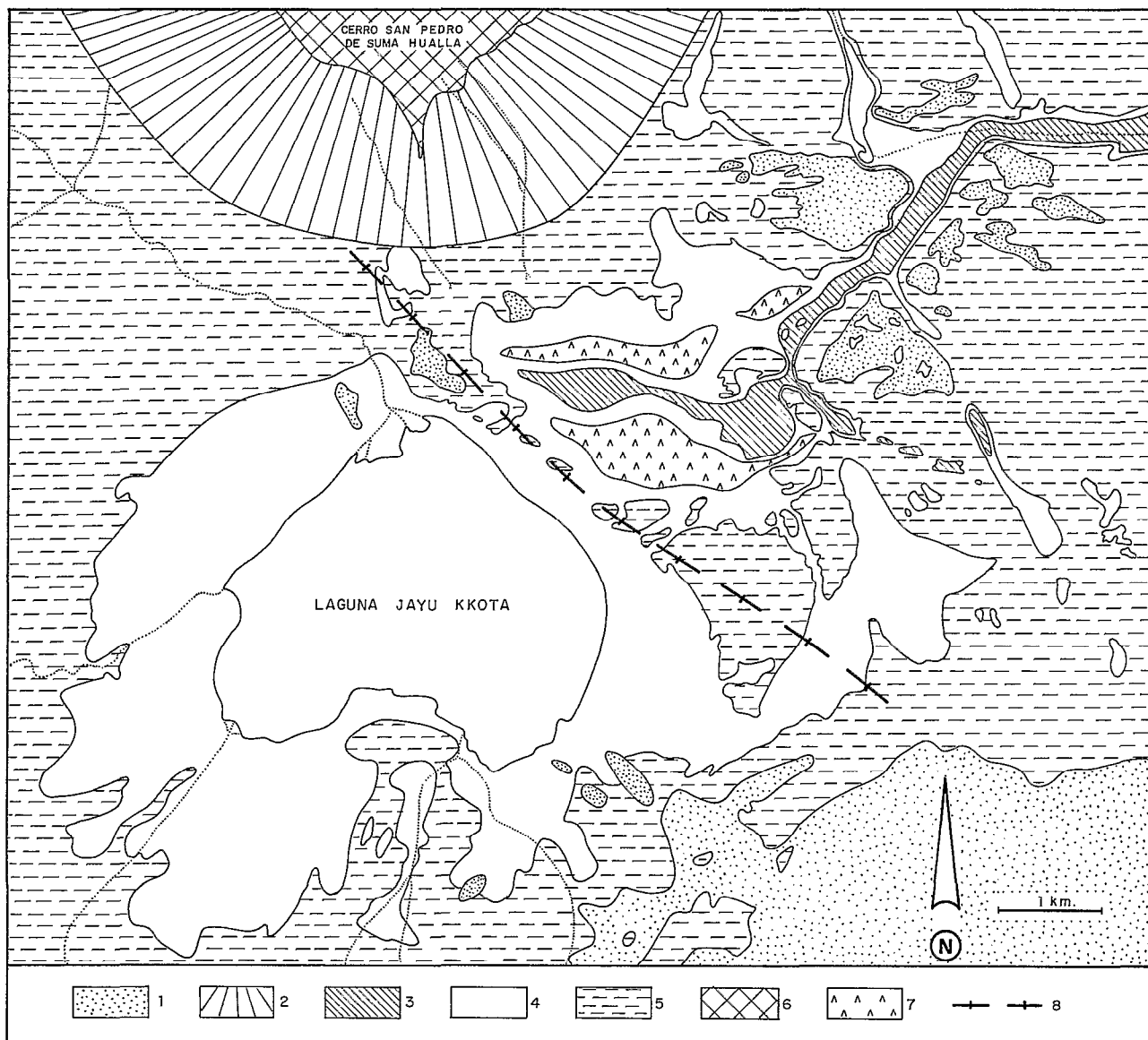


Fig. 3. — Formations superficielles du salar de Jayu Kkota, 1 : Dunes actuelles. 2 : Cône d'épandage. 3 : Fond plat sans végétation. 4 : Argile de remplissage. Zone à yaretilia. 5 : Sable du substratum. Zone à thola. 6 : Relief anticlinal. 7 : Groûte de gypse souterraine. 8 : Axe anticlinal.

— Une phase d'apport brutal, représentée par la petite couche sableuse à grain anguleux.

Cette couche pose un problème, car son contact supérieur avec l'argile est assez net : les apports détritiques se sont-ils arrêtés aussi brutalement qu'ils avaient commencé ? L'argile superficielle n'est sableuse que sur les bordures. Celle-ci marque la dernière extension lacustre. Elle est parfois cryoturbée (cellules de 10 cm de diamètre). Cette

couche se divise généralement en quatre sous-niveaux selon le degré d'oxydo-réduction.

De nombreuses dunes actuelles, reprennent le sable du substratum.

Un vaste cône d'épandage de matériel fin sablo-argileux rouge s'appuie sur le massif Nord.

Deux puits creusés à l'aplomb des deux points hauts de l'anticlinal souterrain ont atteint sous plusieurs mètres de sable la roche en place fortement altérée.

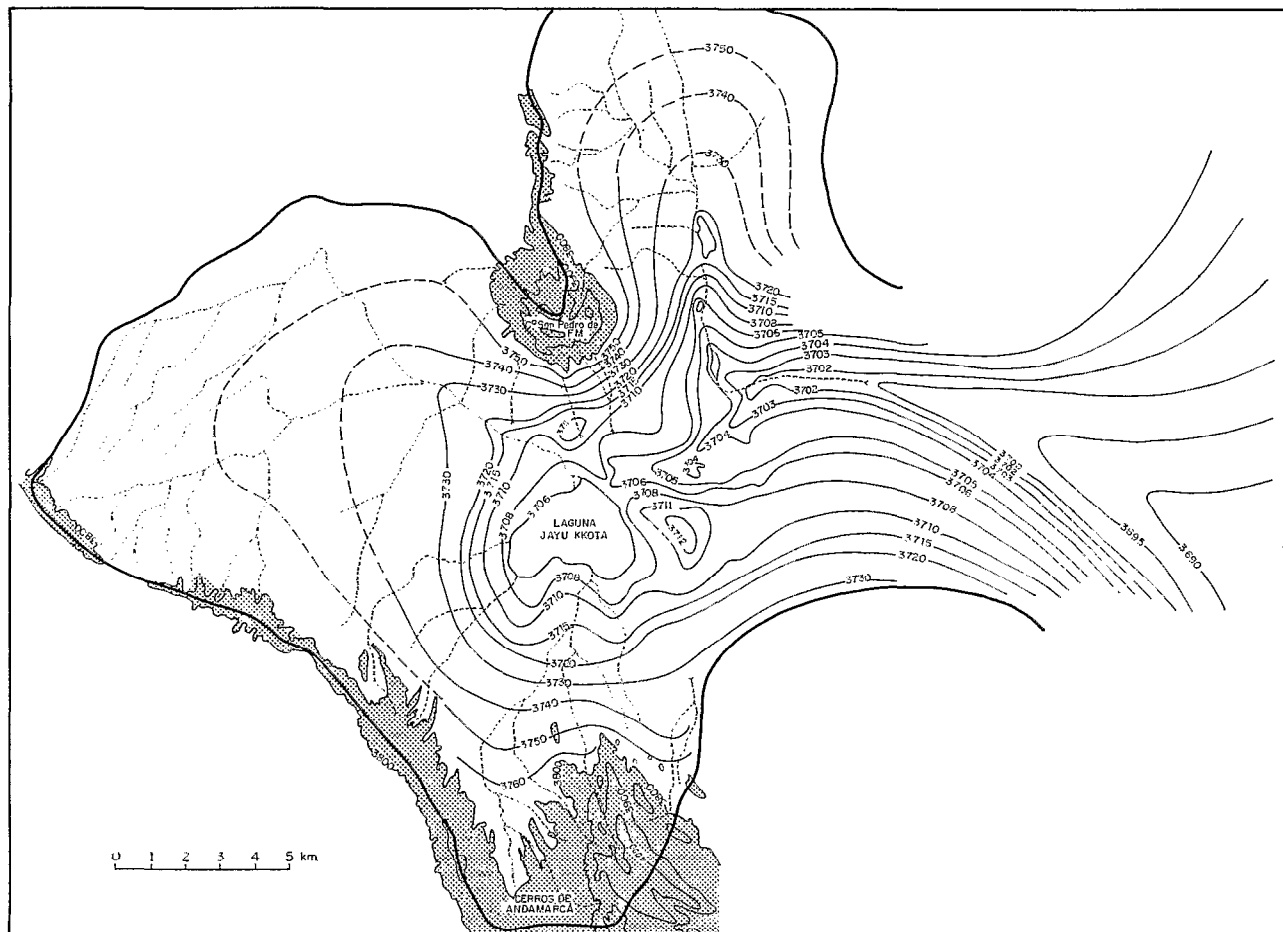


Fig. 4. — Courbes piézométriques, Saison sèche : Août-Septembre 1975. Vue générale du bassin. Les côtes absolues sont en mètres.

Végétation

Le changement de la végétation marque bien les limites des différentes zones :

- Sur le sable poussent de petits arbustes appelés « thola » (*Lepidophyllum quadrangulare*).
- Sur l'argile on trouve une graminée formant des touffes compactes dures aux racines profondes : la « yaretilla ». Les dépressions plates sont dépourvues de toute végétation.

HYDROGÉOLOGIE

L'hydrogéologie du salar de Jayu Kkota condense sur une superficie de 250 km² presque tous les phénomènes hydrogéologiques en zone sédimentaire, d'où son grand intérêt.

Géométrie et mouvement de la nappe (fig. 4 et 5)

La piézométrie montre deux origines distinctes des apports :

- une alimentation par le bassin versant,
- une alimentation par deux nappes en dôme implantées sur deux points hauts de l'anticlinal au Nord et à l'Est de la lagune.

L'aquifère est constitué essentiellement par le sable du substratum et par l'argile sableuse inférieure.

La nappe est soit captive, soit libre ; selon le type d'argile du placage, mais la remontée piézométrique ne dépasse jamais quelques dizaines de centimètres.

On a observé également dans l'exutoire des nappes superposées à salinités et à mouvements différents.

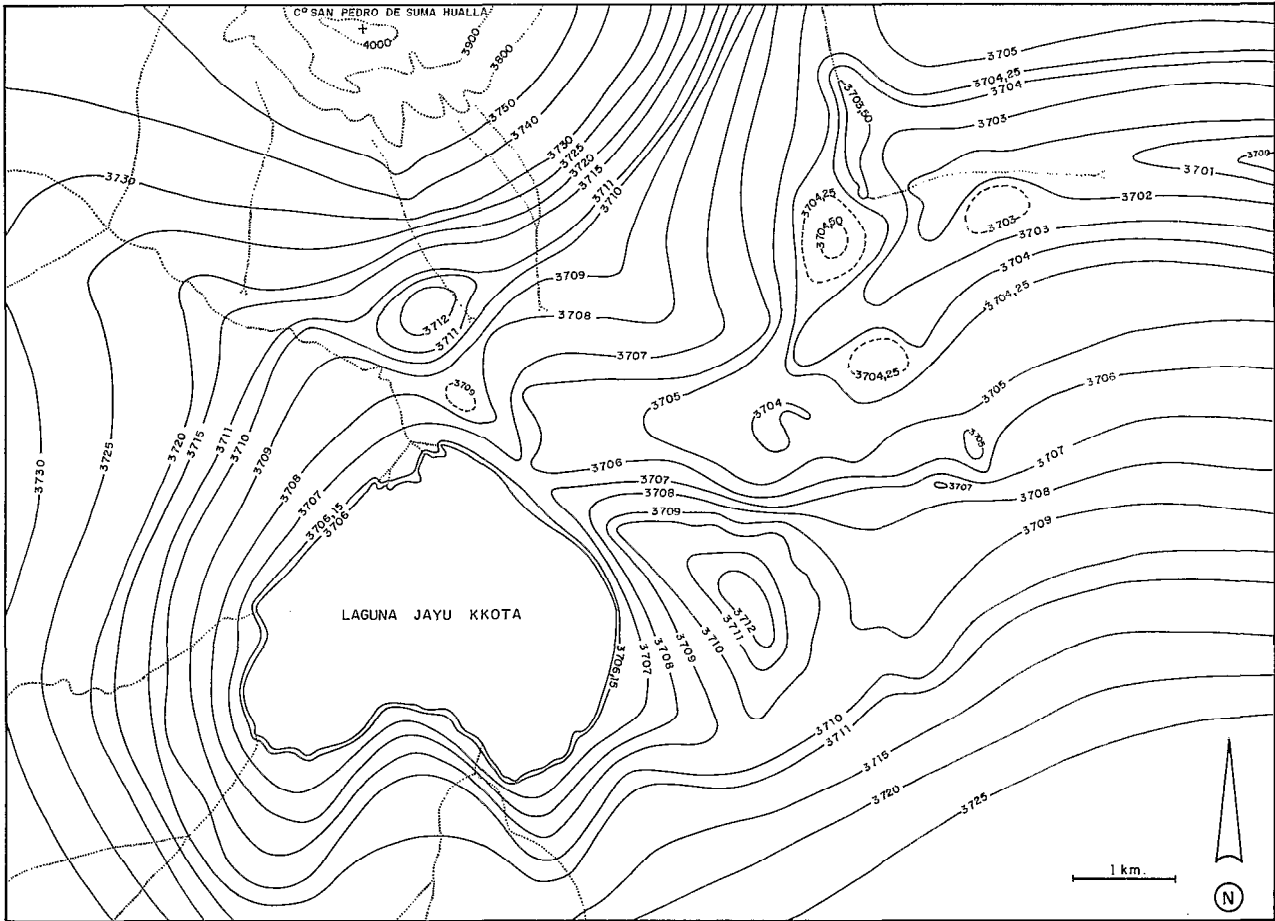


Fig. 5. — Courbes piézométriques. Saison sèche : Août-Septembre 1975. Zone centrale. Cotes absolues en mètres.

L'étude de ce cas, rare, est très délicate, car les eaux se mélangent.

Les nombreux massifs de dunes constituent des réserves d'eau très douces qui sont également de petits dômes divergents.

La lagune (7 km²) est une nappe d'eau pelliculaire (1 m d'épaisseur en moyenne) qui peut parfois s'assécher presque complètement.

On distingue deux seuils de changement d'écoulement des eaux ou crêtes piézométriques de très faible amplitude qui déterminent deux zones d'immobilité des eaux (fig. 6) :

— l'une immédiatement au Nord-Est du lac, qui ferme la lagune,

— l'autre à 3 km de la lagune, au départ de l'exutoire, qui ferme la grande dépression au NE du lac. Ce schéma correspond à la saison sèche. Bien qu'il soit à peu près impossible d'aller dans cette région en saison des pluies, il est possible

d'estimer l'élévation du plan d'eau de la lagune grâce aux marques laissées par son niveau haut de stationnement.

On constate alors que les deux seuils ne sont plus marqués et que toute la nappe s'écoule directement du bassin vers le Poopo. Les deux seuils sont donc créés par une évaporation différentielle de la nappe, ce qui inverse son mouvement en deux endroits et délimite ainsi en saison sèche deux zones de concentrations des eaux.

Le mouvement ainsi déterminé n'affecte que la partie superficielle de la nappe. En profondeur l'écoulement se fait régulièrement depuis le bassin versant jusqu'au lac Poopo. Cela entraîne une stratification des eaux suivant leur salinité (fig. 7).

Conductivité de la partie superficielle de la nappe (fig. 7)

Les cartes d'isoconductivités appellent plusieurs remarques :

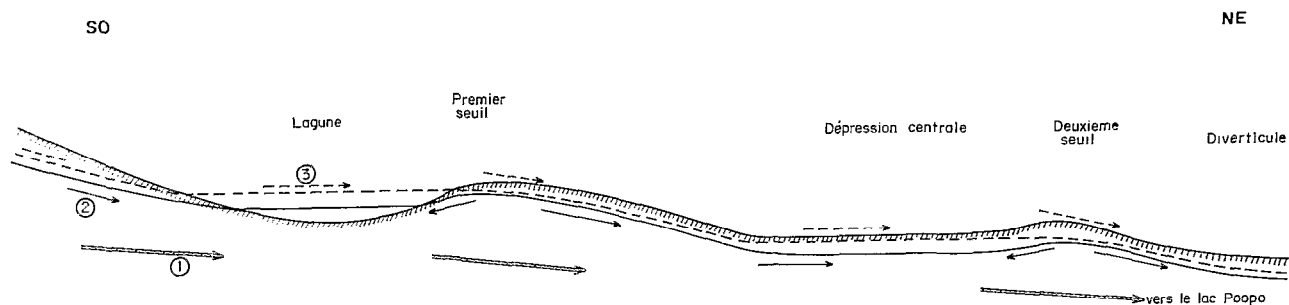


Fig. 6. — Section longitudinale schématique dans le salar de Jayu Kkota. Mouvement de la nappe. 1 : Composante principale du mouvement de la partie profonde de la nappe en saison sèche et en saison humide. 2 : Composante principale du mouvement de la nappe en saison sèche. 3 : Composante principale du mouvement de la nappe en saison humide. Les dimensions relatives des diverses unités (lagune, dépression, etc...) n'ont pas été respectées.

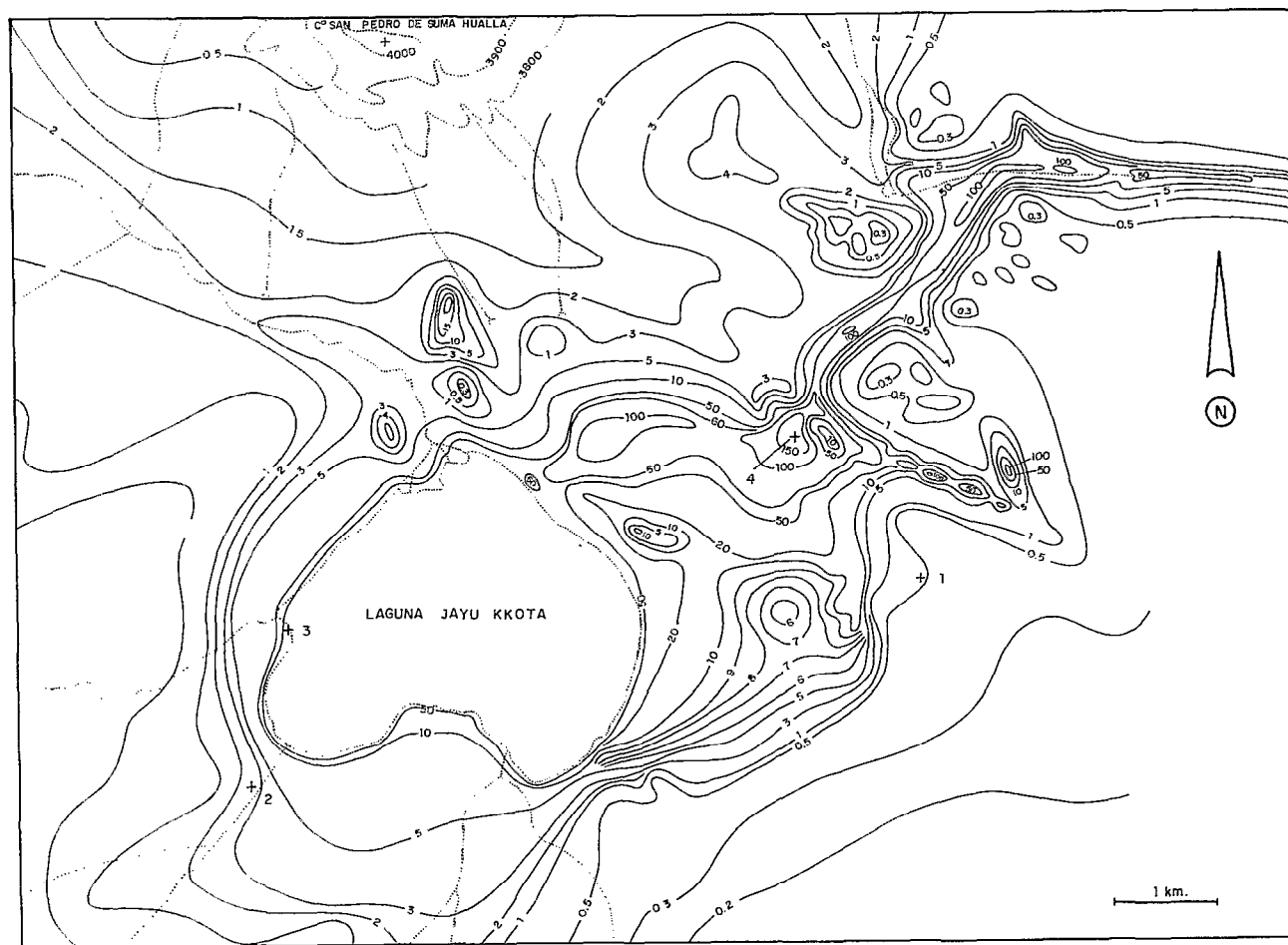


Fig. 7. — Courbes d'isoconductivité. Zone centrale. En millisiemens par cm : mS. cm⁻¹. Août-Septembre 1975.

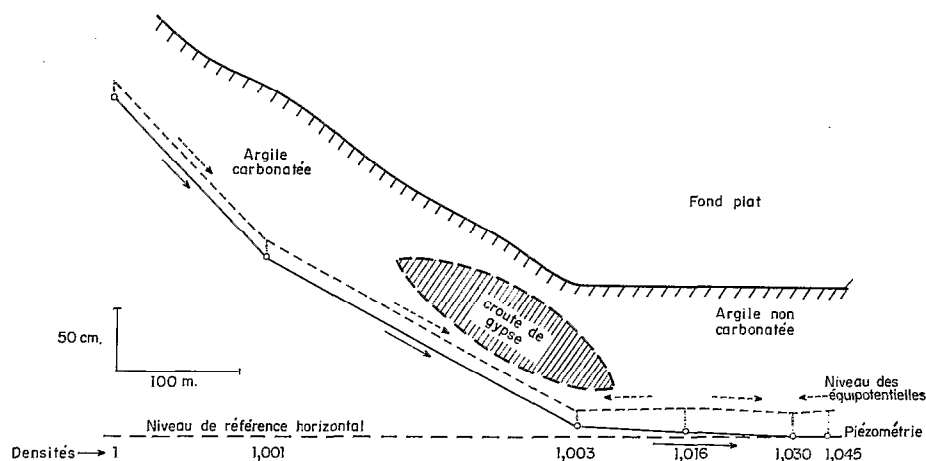


Fig. 8. — Niveau piézométrique en niveau équipotentiel. Coupe théorique dans le diverticule de Jayu Kkota. (On a pris comme hypothèse une épaisseur d'eau de 1 m.) L'écart entre le niveau piézométrique et le niveau équipotentiel a été amplifié pour la clarté de la figure.

— La zone de concentration maximale se trouve dans la dépression au NE du lac entre les deux seuils piézométriques (190 mS. cm^{-1}).

— La conductivité initiale de l'eau des deux nappes divergentes est élevée : 6 mS. cm^{-1} . Ces eaux baignent la roche très altérée de l'anticlinal souterrain.

— La lagune a une conductivité uniforme de 50 mS. cm^{-1} .

— Les variations de conductivités sont souvent rapides : la nappe se concentre brutalement en bordure de la lagune. Par contre les nappes divergentes se concentrent assez progressivement.

— Dans l'exutoire la conductivité diminue dans le sens de l'écoulement. La nappe salée se dilue dans les apports latéraux d'eaux douces.

— Au Sud du bassin une eau concentrée provenant de l'altération intense d'une roche semblable à celle de l'anticlinal se dilue dans la nappe générale.

— Les dunes provoquent des anomalies en alimentant en eau très douce ($0,2 \text{ mS. cm}^{-1}$) les nappes salées. Celles-ci qui sont juste au Nord de la lagune font écran à la concentration des eaux du dôme Nord.

Ces cartes correspondent à l'année 1975, venant après une saison des pluies bien marquée.

En 1976, après une saison humide peu intense (novembre 1975-mars 1976) on a pu observer que :

- la lagune a une conductivité de 125 mS. cm^{-1} , soit 2,5 fois plus que l'année précédente ;
- dans la zone la plus concentrée (dépression NE) on atteint 170 mS. cm^{-1} contre 190 l'année précédente. Le niveau piézométrique est également beaucoup plus bas.

On a donc une tendance à l'inversion de salinité entre les deux niveaux de stationnement. Il n'est pas impossible que cette inversion se réalise parfois complètement à l'issue d'une longue période sèche.

Les schémas décrits ici correspondent donc à un cliché à un instant donné. Toute l'étude évolutive en fonction du temps reste à faire. On peut donc s'attendre à une grande complexité dans la répartition des sels.

Effet de densité

Les densités maximales mesurées sont de l'ordre de 1,14. Ce chiffre est cependant susceptible d'augmenter pendant les périodes très sèches. On observe des variations rapides de densité du fond des dépressions vers les bordures. Dans ce cas le mouvement de la nappe n'est plus défini par la piézométrie, mais par les courbes équipotentielles. Cependant pour les établir il faut connaître l'épaisseur de la tranche d'eau, ce que nous ignorons.

On peut calculer que pour une épaisseur d'eau comprise entre 1 et 2 mètres, pour une variation de densité de 1 à 1,14 l'équipotentielle correspondante à la saumure se trouve de 14 à 28 cm au-dessus de la surface piézométrique.

Au théodolite nous avons mesuré des dénivelés de cet ordre (fig. 8) pour les variations de densité correspondantes, ce qui nous amène à supposer, en faisant une hypothèse sur l'épaisseur de la nappe, que l'on peut avoir des nappes inclinées immobiles, autour des dépressions du salar. Ce phénomène, s'il a lieu, est certainement temporaire pendant les périodes très sèches.

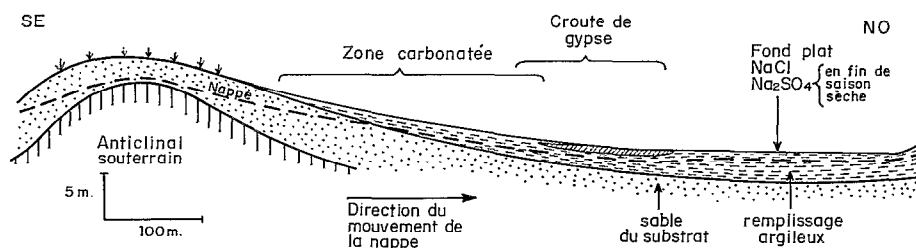


Fig. 9. — Coupe hydrogéologique schématique dans le salar de Jayu Kkota.

LES SELS

Inventaire et description

Le gypse: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

C'est l'espèce dominante de Jayu Kkota. On le trouve sous plusieurs faciès.

— En petites plages blanches ou jaunes claires farineuses dans l'argile;

— Par concentration de ces plages on passe à une couche compacte, qui s'indure en une croûte de 50 cm à 2 m d'épaisseur. Cette croûte et ces plages se trouvent dans les zones où la conductivité de l'eau est comprise entre 5 et 40 mS. cm^{-1} (environ 5 à 40 g/l de sels). Dans la zone centrale au salar, plus concentrée elle n'existe plus. La croûte de gypse forme donc une sorte d'anneau autour des dépressions (fig. 9 et 10);

— Dans la zone centrale concentrée ($\mu > 120 \text{ mS. cm}^{-1}$) le gypse peu abondant constitue de petites lentilles cristallines claires (épaisseur : 1 cm). Le gypse, qu'il soit farineux ou cristallin se dépose de préférence dans les niveaux les moins oxydés. Ce n'est que lorsque ceux-ci sont saturés qu'il apparaît dans les autres niveaux;

— Localement le gypse forme des cristaux enchevêtrés (jusqu'à 5 cm) dans l'argile (exutoire) et dans le sable (dôme Nord) : « rose des sables ».

La halite: NaCl

Elle est très peu abondante. Elle constitue une pellicule superficielle de 1 mm au-dessus de l'argile.

En début de saison sèche on la trouve plutôt

au-dessus des nappes douces que des nappes salées. Après une longue période sèche, elle se concentre plutôt dans la dépression autour de la lagune. Elle cristallise localement en trémies de 1 à 5 mm.

La Thénardite: Na_2SO_4

Elle forme des cristaux en baguettes allongées de 1 à 10 cm dans les zones centrales. Ils tapissent les bordures de petites dépressions de quelques mètres de diamètre entourant au centre des cristaux de halite.

Les carbonates de calcium

Nous n'avons pas observé de minéraux bien constitués.

Certains niveaux sédimentaires peuvent être carbonatés au départ. Mais les sédiments en amont de la croûte de gypse sont bien plus carbonatés que ceux du fond du salar (fig. 9).

Interprétation

L'aspect de la croûte de gypse qui se superpose aux sédiments en place indique une origine par évaporation capillaire de la nappe. La halite et la thénardite, ainsi que les lentilles de gypse de la zone centrale se forment également de cette façon. Le support est presque toujours constitué par le placage argileux du bassin, le sable faisant écran à l'évaporation. Les racines de la yaretilla favorisent beaucoup la remontée capillaire.

Nous disposons de quelques résultats d'analyses d'eau qui permettent d'envisager une interprétation (Analyses de M. PINTA, Centre O.R.S.T.O.M. de Bondy). (Cf. tabl. I).

TABLEAU I

Composition chimique (p.p.m.) des eaux de la lagune Jayu Kkota

N°	mS. cm^{-1}	pH	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	SiO_2	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
1	6,15	7,80	146,4	50	176	45,0	9,7	93	66,5	3,7
2	2,080	7,70	285,5	525	155	52,5	10,6	169	195	37,3
3	41,600	7,60	181,8	21 000	1 560	2,2	193	14 400	1 130	275
4	178,000	7,00	118,3	114 000	3 160	16,5	705	70 500	3 200	2 330

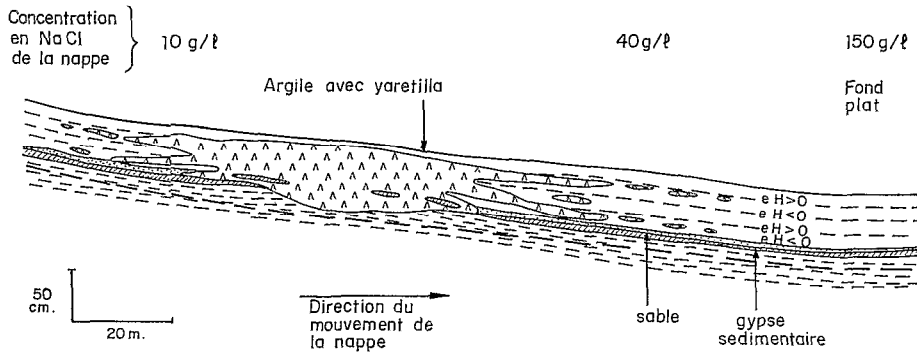


Fig. 10. — Aspect de la croûte de gypse de Jayu Kkota.

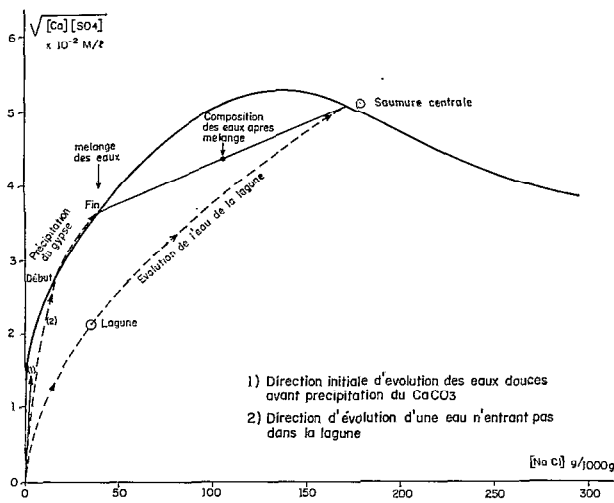


Fig. 11. — Courbe de solubilité de CaSO_4 en fonction de NaCl (d'après A. ALEX, in SCHÖELLER). Mécanisme de la mise en place de la croûte de gypse de Jayu Kkota.

La formation du gypse va dépendre essentiellement du fait que sa solubilité est fonction de la concentration en chlorure de sodium.

La solubilité du gypse croît tout d'abord avec la teneur en NaCl , jusque vers 140 g/l, puis décroît pour des concentrations supérieures.

Sur la fig. 11 nous avons représenté la courbe de saturation $\sqrt{[\text{Ca}] \times [\text{SO}_4]}$ en fonction de $[\text{NaCl}]$.

Lorsqu'une eau se concentre, son point représentatif sur ce diagramme se déplace sur une droite passant par l'origine, si aucun des ions considérés ne précipite. (En effet, si la concentration de chacun des ions est multipliée par un même coefficient k , $[\text{NaCl}]$ est multiplié par k et $\sqrt{[\text{Ca}] \times [\text{SO}_4]}$ par $\sqrt{k} = k$).

En réalité nous avons toujours une précipitation du carbonate de calcium, avant la précipitation du

gypse. Cela va diminuer la concentration en Ca , ainsi que le terme $\sqrt{[\text{Ca}] \times [\text{SO}_4]}$. Donc le trajet du point représentatif d'une eau qui se concentre en éliminant du calcium va s'incurver vers la droite. Ce n'est plus une droite.

Cette courbure du trajet va retarder le moment où le point représentatif de la teneur en Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} de la solution qui se concentre, va rencontrer la courbe de saturation. Le gypse commence alors à précipiter, le point représentatif se déplace ensuite sur la courbe.

Nous avons représenté la direction théorique initiale d'évolution d'une eau douce entrant dans la lagune, et le point correspondant à la lagune. On a donc eu une incurvation importante du trajet. En effet la lagune est un milieu bien aéré, propice au dégagement du CO_2 . Les carbonates peuvent donc précipiter activement et retardent le départ du gypse. Le trajet du point représentatif pourra couper la courbe de saturation, dans la partie descendante, pour des concentrations en NaCl supérieures à 140 g/l. On aboutit donc à une saumure centrale qui est saturée en gypse, sans avoir auparavant précipité ce minéral pour des concentrations inférieures en NaCl . Cette concentration commence dans la lagune et se poursuit dans la dépression centrale.

Nous avons également représenté la direction initiale théorique d'évolution d'une eau douce de bordure entrant directement dans la zone centrale sans passer par la lagune. La pente est la même que pour une eau douce entrant dans la lagune; elles ont en effet pratiquement la même composition. Nous avons observé, dans ce cas, que le gypse commence à précipiter à partir d'une concentration en NaCl de 10 g/l. On a donc également une incurvation du trajet, mais bien moins forte que pour l'eau entrant dans le lac. Le point va se déplacer sur la courbe, le gypse précipitant jusque vers des teneurs de l'ordre de 40 g/l NaCl . Arrivée là, la précipitation s'arrête, parfois brutalement, parfois progressive-

ment. Comme aucun des deux ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} ne tend à disparaître, on devrait avoir au contraire un renforcement de la précipitation du gypse.

Or ce point correspond à l'arrivée des solutions provenant des versants dans la zone centrale qui est beaucoup plus concentrée, alimentée par la lagune. On a donc un mélange de deux eaux saturées en gypse, mais à concentrations différentes en NaCl. Une construction géométrique très simple, faite en joignant les points représentatifs des deux eaux qui se mélangent, montre que l'eau résultante est toujours sous-saturée en gypse. Donc au contact des deux eaux, la précipitation du gypse s'arrête. Ce phénomène se poursuit également en bordure de l'exutoire. La croûte de gypse forme donc un anneau autour des zones les plus concentrées.

La mise en place des autres sels correspond bien

au chimisme général de la nappe. On aboutit à une saumure du type Na-Cl- SO_4 , avec comme sels principaux la halite (NaCl) et la thénardite (Na_2SO_4)

CONCLUSION

La localisation du gypse dans le paysage n'est pas due, comme on aurait pu le penser, à une zonation naturelle gypse-halite, mais à un phénomène hydrogéologique particulier : on se trouve en présence d'un mélange de deux eaux, ayant la même origine (nappes de bordure), mais ayant suivi deux trajets évolutifs distincts, l'un en surface, l'autre plus longuement souterrain, avant de se mélanger.

*Manuscrit reçu au Service des Publications de l'O.R.S.T.O.M.
le 29 mars 1978.*

BIBLIOGRAPHIE

- AHLFELD (F.) et BRANISA (L.), 1960. — Geología de Bolivia. *Inst. Bol. Petro.*
- CARMOUZE (J. P.), ARZE (C.) et QUINTANILLA (J.), 1978. — Circulación superficial de materia (agua, sales disueltas) através del sistema fluvio-lacustre del Altiplano. La regulación hídrica e hidroquímica de los lagos Titicaca y Poopó, *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.*, vol. X, n° 1 : 49-68.
- FONTES (J. Ch.), SERVANT (M.), 1976. — Dataciones radiométricas sobre el Cuaternario Reciente del Altiplano de Bolivia. *Primer Congreso Geológico de Bolivia*, Potosí, 1976 (sous presse).
- RISACHER (F.), 1976. — Reconocimiento de algunos salares del Altiplano boliviano. *Primer Congreso Geológico de Bolivia*, Potosí, 1976 (sous presse).
- SCHOELLER (H.), 1962. — Les eaux souterraines. Masson, 642 p.
- SERVANT (M.) et FONTES (J. Ch.), 1978. — Datation par le ^{14}C du dernier grand lac quaternaire de l'Altiplano bolivien. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.*, vol. X, n° 1 : 9-23.