

Mise en évidence d'une phase climatique holocène extrêmement aride dans l'Altiplano central, par la présence de la polyhalite dans le salar de Uyuni (Bolivie)

François RISACHER et Bertrand FRITZ

Résumé — Une phase climatique extrêmement aride a affecté l'Altiplano central de Bolivie au cours de l'Holocène pendant au moins 2000 ans. Le climat était semblable à celui qui règne actuellement au Chili dans le désert d'Atacama, une des zones les plus arides du globe. Cette phase est vraisemblablement contemporaine de celles détectées entre 7000 et 2000 ans B.P. dans d'autres régions d'Amérique du Sud.

Paleoclimatic significance of the occurrence of polyhalite in the salar of Uyuni (Bolivia). Detection of an extremely severe drought in the central Altiplano

Abstract — An extremely severe drought hit the Bolivian central Altiplano during the Holocene for at least 2,000 years. The climate was similar to that prevailing today in the Atacama Desert (Chile), one of the most arid areas in the world. This phase is likely to be contemporaneous with those detected between 7,000 and 2,000 year B.P. in other areas of South America.

Abridged English Version — The central depression of the Bolivian Altiplano (Fig. 1) is covered by an extensive salt crust of 10,000 km² in area and 11 m of maximum thickness: the salar of Uyuni (Fig. 2). The salt is mainly halite with a little gypsum. The crust has an elevated porosity (35%) and is filled with a Na-Cl interstitial brine rich in Li, K, Mg, B [4]. Polyhalite (K₂MgCa₂(SO₄)₄·2H₂O) has been detected by XRD in salt cores of the lowest part of the crust in the central area of the salar, just where the crust is thickest. Polyhalite generally forms by diagenetic alteration of gypsum or anhydrite in contact with bittern brines rich in K and Mg ([6], [7], [8]).

The saturation index of polyhalite in the brines was calculated with an ion-interaction model [10], (Table I), taking into account the temperature dependence of the solubility product of polyhalite [11]. Brines in the central area of the salar are undersaturated with respect to polyhalite, which suggests that brines much more concentrated in bittern solutes, especially in K and Mg, were once in contact with the salt in the deepest parts of the crust. The simulation of the evaporation of the present brines indicates that these brines should be concentrated about 3 to 5 times to reach the saturation with respect to polyhalite, which implies a reduction of the brine volume of 60 to 80% and a lowering of the brine table of 4 to 5 m within the crust.

At present, the brine table stands, in the dry season, at some 15 cm below the surface of the crust (Fig. 3). Capillary draw, and the subsequent evaporation of the ascending brine within the topmost centimetres of the crust induces the precipitation of secondary halite which fills the pores of the crust, cementing it into a very hard and compact pavement. The evaporation of the interstitial brine is then drastically reduced and only proceeds through the polygonal cracks. The upward rate of leakage of the brine was estimated by a process similar to that used in Great Salt Lake [12]. Salt efflorescences along the cracks' lips were collected and weighed, which allowed an estimation of the volume of the evaporated brine and the annual rate of lowering of the brine table: 2 to 3 mm/yr on average.

Note présentée par Georges PÉDRO.

To allow the brine table to drop 5 to 6 m within the crust under such a low evaporation rate, it is necessary that an extremely strong and continuous drought hit the area for at least 2,000 years. There is an inverse relation between the depth of the brine table in similar salt crusts in neighbouring areas and the height of precipitation ([13], [14]), (Table II). This relation, although approximate, suggests that the climate during the drought in the Bolivian central Altiplano was similar to that prevailing today in the Atacama desert, which is one of the driest places in the world. Precipitations were probably below 20 mm/yr, which has to be compared to the present values of 200 mm/yr at Uyuni.

It is not possible to date the drought. However, it was probably contemporaneous with the other dry phases detected elsewhere in South America ([1], [2], [3]). One may reasonably bracket the drought between 7,000 and 2,000 years B.P. It is unlikely that human settlements could have subsisted in the central Altiplano under such a long and severe drought.

INTRODUCTION. — Une forte augmentation de l'aridité au cours de l'Holocène a été détectée en plusieurs endroits du continent latino-américain, au sud de l'équateur. En Amazonie brésilienne la présence de débris charbonneux dans les sols, datés de 6 000 à 3 000 ans B.P., suggère un climat plus sec qui a pu favoriser les incendies de la couverture végétale [1]. En Amazonie bolivienne deux épisodes arides ont été mis en évidence grâce à la découverte de charbons et de sables dunaires sous la couverture végétale actuelle. Ils sont datés de 7 000 à 5 000 et de 3 400 à 1 400 ans B.P. [2]. Enfin, dans l'Altiplano Nord, le lac Titicaca se trouvait à environ 50 m en dessous de son niveau actuel entre 7 700 et 3 650 ans B.P., ce qui démontre également une aridification notable du climat [3]. Cette Note montre qu'une phase extrêmement aride a également affecté l'Altiplano central, au niveau du salar de Uyuni. Cette phase n'a pas été datée, mais sa durée et son degré d'aridité ont pu être estimés.

LE SALAR DE UYUNI. — La dépression centrale de l'Altiplano bolivien (*fig. 1*) est occupée par une immense croûte de sel de 10 000 km² de surface et de 11 m d'épaisseur maximale (*fig. 2*). Des sondages à travers la croûte ont montré que celle-ci repose franchement sur des sédiments lacustres imperméables caractéristiques d'eaux sursalées (coprolites d'*Artemia*). La croûte ne présente pas d'intercalations lacustres ou fluvio-lacustres. Quant aux apports en sel dans le salar depuis 10 000 ans, ils ont été discutés et leur ordre de grandeur estimé à environ 1 % de la masse totale du salar ([14], p. 222-223). La croûte de sel semble donc bien provenir d'un épisode d'assèchement majeur d'un lac salé, le lac Tauca, qui recouvrait une grande partie de l'Altiplano central entre 13 000 et 10 000 ans B.P. [5]. Le sel est constitué à 95 % de halite, le reste étant essentiellement du gypse. La croûte a une porosité élevée, de l'ordre de 35 %, remplie par une saumure intersitielle sub-affleurante chlorurée-sodique riche en lithium, potassium, magnésium et bore. Une augmentation abrupte des concentrations en ces éléments s'observe au sud du salar (*fig. 2*). Cette anomalie est due à l'accumulation des apports par le Rio Grande depuis 10 000 ans [4].

LA PRÉSENCE DE POLYHALITE. — Sept sondages carottés ont été réalisés dans la croûte de sel (*fig. 2*). Des traces de polyhalite ($K_2MgCa_2(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$) ont été détectées par diffraction X dans le sel de la base des puits UH (à -8, -9 m), U1 (-5, -8 m) et U2 (-2, -6 m) et dans une grande partie du puits UB, situé juste dans la zone de plus forte concentration en Li, K, Mg, B à l'embouchure du Rio Grande.

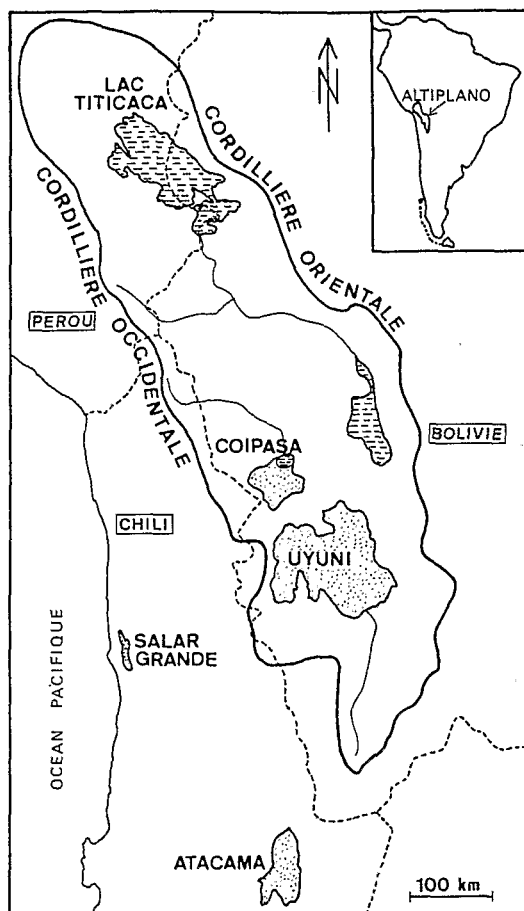


Fig. 1. — Carte de localisation de l'Altiplano et des principaux salars.

Fig. 1. — Location map showing the Altiplano and the main salars.

La polyhalite se forme en général par altération diagénétique du gypse ou de l'anhydrite au contact de saumures riches en K et Mg ([6], [7], [8]). Un cas de précipitation directe a cependant été reporté [9]. Le degré de saturation des saumures par rapport à la polyhalite (tableau I) a été calculé au moyen d'un modèle d'interaction ionique [10] en tenant compte de la variation du produit de solubilité de la polyhalite en fonction de la température [11]. Seules les saumures très concentrées des puits UB sont en équilibre, ou sursaturées, par rapport à la polyhalite. Par contre, la polyhalite ne peut pas précipiter à partir des saumures actuelles des puits UH, U1 et U2, celles-ci étant nettement désaturées par rapport à ce minéral. Donc des saumures beaucoup plus concentrées ont dû être autrefois en contact avec les sels de la base des puits UH, U1 et U2.

Il se pose un problème quant à la préservation de la polyhalite au contact de saumures sous-saturées. D'une part cette dissolution est incongruente. Il se forme du gypse aux dépens de la polyhalite, ce qui peut protéger des noyaux résiduels de ce minéral au sein d'amas gypseux. D'autre part la polyhalite tapisse les interstices entre les cristaux de halite, ce qui réduit la porosité de certains niveaux, et donc la surface du minéral en contact avec la saumure. La vitesse de dissolution de la polyhalite peut alors être très lente. Les faibles traces qui ont été détectées ne sont vraisemblablement que les derniers vestiges d'amas beaucoup plus importants.

On a simulé l'évaporation des saumures des puits UH, U1 et U2, toujours au moyen d'un modèle d'interaction ionique. A la température moyenne de 10°C des saumures du

TABLEAU I

Composition chimique des saumures du salar de Uyuni (en millimoles par litre). Le nombre suivant le nom du puits indique la profondeur en centimètres de la saumure sous la surface de la croûte. Q/K est le degré de saturation des saumures par rapport à la polyhalite. Q = produit d'activité ionique; K = produit de solubilité du minéral. Pour $Q/K < 1$, la saumure est sous-saturée; pour $Q/K > 1$, la saumure est sur-saturée par rapport à la polyhalite. FC est le facteur de concentration nécessaire pour atteindre la saturation en polyhalite.

Chemical composition of Uyuni brines (in millimoles/litre). The number following the well code is the brine depth in centimetres below the surface of the crust. Q/K is the polyhalite saturation index. Q = ionic activity product; K = solubility product of the mineral. If $Q/K < 1$, the brine is undersaturated; if $Q/K > 1$, the brine is oversaturated with respect to polyhalite. FC is the concentration factor to reach the saturation with respect to polyhalite.

	T (°C)	Dens	Na	K	Li	Ca	Mg	Cl	SO ₄	Q/K	FC
UH-900. . .	11	1,222	4 350	286	73,9	9,15	519	5 300	231	0,02	5,3
U1-800. . .	12	1,228	3 640	500	134	6,16	889	5 440	330	0,24	3,0
U2-200. . .	6,1	1,221	3 840	445	114	7,66	728	5 440	263	0,09	3,6
U2-600. . .	6,7	1,228	3 720	470	129	5,56	852	5 280	355	0,16	3,2
UB-10. . .	12	1,247	2 480	760	256	3,42	1 580	5 630	457	1,5	—

TABLEAU II

Relation entre la pluviosité et la profondeur de la nappe dans des croûtes de sel de Bolivie et du Chili (fig. 1).

Relation between the annual precipitation and the depth of the brine table in salt crusts of Bolivia and Chile (Fig. 1).

Salar	Pluviosité (mm/an)	Position de la nappe (cm)	Référence
Coipasa.	300	0	[4]
Uyuni.	200	-15	[4]
Atacama.	20	-70	[12]
Salar Grande.	0	SEC	[13]

salar, il faut concentrer environ cinq fois la saumure du puits UH, trois fois celle du puits U1 et trois fois et demi celle du puits U2 pour atteindre la saturation en polyhalite (tableau I). Les saumures qui ont précipité la polyhalite dans la zone centrale du salar étaient donc trois à cinq fois plus concentrées que les saumures actuelles. Cela correspond à une réduction de volume par évaporation de 60 à 80 % de la saumure interstitielle. Le niveau de la saumure, aujourd'hui sub-affleurante, se trouvait alors à environ 4-5 m sous la surface du salar. Une grande partie de la croûte était à sec. Seule subsistait une lame de saumure résiduelle très concentrée au centre du salar, là où la croûte est la plus épaisse.

MÉCANISME D'ÉVAPORATION DE LA SAUMURE. — Sous les conditions climatiques actuelles (200 mm/an de pluviosité et environ 1 200 mm/an d'évaporation potentielle) un plan d'eau libre situé à l'emplacement du salar s'abaisserait de 5 à 6 m en quelques années seulement. Il n'en va pas du tout de même pour la saumure interstitielle du salar de Uyuni (fig. 3). En raison des pluies le niveau de la nappe remonte de 10 à 20 cm au-dessus de la surface du salar. Au début de la saison sèche la lame de saumure superficielle s'évapore en 3 à 4 semaines. Puis le niveau de la saumure s'enfonce dans la croûte de sel. La saumure remonte alors par capillarité dans les interstices de la partie superficielle

de la croûte. Son évaporation précipite de la halite secondaire qui colmate les centimètres supérieurs de la croûte en une dalle extrêmement compacte. L'évaporation de la nappe à travers cette dalle est alors considérablement réduite. Elle ne se poursuit plus que par les fissures limitant les polygones de dessiccation. La nappe se stabilise à une quinzaine de centimètres sous la surface.

On a pu estimer l'ordre de grandeur de la hauteur annuelle d'évaporation de la saumure à travers les fissures des polygones de dessiccation pendant la saison sèche. On s'est inspiré pour cela d'une méthode utilisée au Grand Lac Salé, aux États-Unis [12]. La saumure remonte par capillarité dans les fissures et s'évapore à la surface en déposant des efflorescences de halite, très résistantes au vent, tout au long des fissures. Ces efflorescences ont été recueillies et pesées et leur abondance estimée par rapport aux surfaces des polygones. Connaissant la teneur en halite de la saumure sous-jacente, il a été possible d'estimer ainsi le volume et la hauteur de la saumure évaporée depuis le début de la dernière saison sèche. Les mesures réalisées en quatre points représentatifs de vastes zones du salar ont conduit à des hauteurs d'évaporation annuelle de la saumure interstitielle, à travers la dalle compacte de halite, pendant la saison sèche, comprises entre 1 et 6 mm/an, avec une moyenne de 2 à 3 mm/an.

IMPLICATION PALÉOCLIMATIQUE. — Pour qu'un taux d'évaporation aussi faible que 2 à 3 mm/an puisse entraîner une baisse de la nappe de 5 à 6 m, il faut que l'Altiplano central ait été affecté par une aridité quasi-absolue pendant au moins 2000 à 3000 ans. En effet, la croûte de sel constitue un véritable piège pour les eaux qui y pénètrent. Si elles entrent facilement dans la croûte, elles n'en ressortent par évaporation que très lentement. Une seule pluie d'une certaine importance peut compenser plusieurs centaines d'années d'abaissement de la nappe. L'aridité a donc dû être très élevée et très soutenue.

On peut avoir une idée du degré d'aridité par comparaison avec d'autres salars situés dans cette région d'Amérique du Sud ([4], [13], [14]). On a reporté (tableau II) la pluviosité et la position de la nappe dans quelques grands salars du même type qu'Uyuni. On observe une relation inverse entre la profondeur de la nappe et la hauteur des pluies. La position de la nappe dans ces croûtes de sel dépend de plusieurs facteurs : pluviosité, évaporation, alimentation par les nappes de bordures, porosité et perméabilité de la croûte. Mais, en dernier ressort, les pluies sont le facteur essentiel, car elles alimentent la saumure aussi bien directement par précipitation sur la croûte, qu'indirectement par les nappes de bordure. La pluviosité sur le salar de Uyuni pendant la phase très aride était probablement du même ordre de grandeur que celle que l'on observe aujourd'hui au Chili entre la côte (Salar Grande) et l'Altiplano chilien (salar de Atacama), soit une valeur comprise entre 0 et 20 mm/an. Rappelons qu'actuellement la pluviosité à Uyuni est de 200 mm/an.

CONCLUSION. — 1. L'Altiplano central de Bolivie a été affecté au cours de l'Holocène par une phase extrêmement aride pendant une durée d'au moins 2000 ans.

2. Le niveau de la nappe de saumure interstitielle du salar de Uyuni s'est alors abaissé de 5 à 6 m et la polyhalite a pu précipiter à partir de la saumure résiduelle très concentrée.

3. Le climat qui régnait sur l'Altiplano central devait être assez semblable à celui qui existe actuellement dans le désert d'Atacama, au Chili, une des régions les plus arides du monde, avec une pluviosité probablement inférieure à 20 mm/an.

4. Cette phase aride n'a pas pu être datée dans cette étude, mais on peut raisonnablement supposer qu'elle est contemporaine de celles détectées dans les régions voisines. Elle se situerait donc dans l'intervalle 7 000-2 000 ans B.P.

5. La plupart des sources, rivières et plans d'eau de l'Altiplano central ont probablement dû s'assécher durant cet épisode. Il est peu probable que les habitants de cette région aient pu s'y maintenir. Le peuplement actuel de l'Altiplano central a donc dû débiter à la fin de cette phase aride.

Note remise le 17 février 1992, acceptée après révision le 16 avril 1992.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] F. SOUBIÈS, *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, 11, n° 1, 1980, p. 133-148.
- [2] M. SERVANT, J. C. FONTES, M. RIEU et J. F. SALIÈGE, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 292, série II, 1981, p. 1295-1297.
- [3] D. WIRRMANN et L. F. de OLIVEIRA ALMEIDA, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 59, 1987, p. 315-323.
- [4] F. RISACHER et B. FRITZ, *Chem. Geol.*, 90, 1991, p. 211-231.
- [5] M. SERVANT et J. C. FONTES, *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, n° 1, 1978, p. 9-23.
- [6] G. SCHULZE, *Zeit. angew. Geol.*, 7, 1960, p. 310-317.
- [7] W. T. HOLSER, *Amer. Mineral.*, 51, 1966, p. 99-109.
- [8] C. PIERRE et B. FRITZ, *Rev. Géogr. phys. Géol. dynam.*, 25, 3, 1984, p. 157-166.
- [9] J. P. PERTHUISOT, *Nature Physical Science*, 232, 1971, p. 186-187.
- [10] C. E. HARVIE et J. H. WEARE, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44, 1980, p. 981-997.
- [11] F. RISACHER et B. FRITZ, *Sci. Géol. Bull.*, 37, 3, 1984, p. 229-237.
- [12] J. H. FETH et R. J. BROWN, *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*, 450-B, 1962, p. 100-101.
- [13] A. MORAGA, G. CHONG, M. A. FORTT et H. HENRIQUEZ, *Boletín del Instituto de Investigaciones Geológicas (Chile)*, 29, 1974, 56 p.
- [14] G. E. STOERTZ et G. E. ERICKSEN, *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*, 811, 1974, 65 p.

F. R. : ORSTOM, Centre de Géochimie de la Surface,
1, rue Blessig, 67084 Strasbourg Cedex;

B. F. : C.N.R.S., Centre de Géochimie de la Surface,
1, rue Blessig, 67084 Strasbourg Cedex.

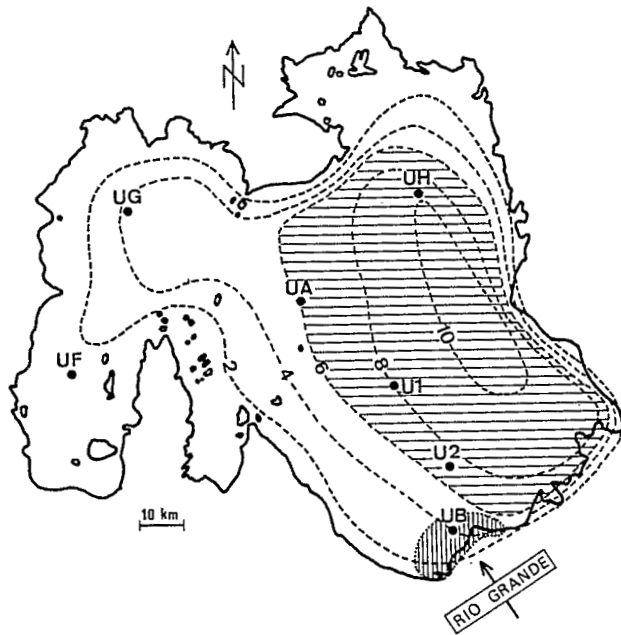


Fig. 2. — Le salar de Uyuni. Les lignes en pointillé sont les courbes d'iso-épaisseur (en mètres) de la croûte de sel. La surface de la croûte est quasiment horizontale (3 653 m). Les variations d'altitude ne dépassent pas quelques décimètres sur une surface de 10 000 km². Les sondages carottés sont figurés par un rond noir. Les hachures verticales indiquent la zone des saumures très concentrées à l'extrême sud du salar. Les hachures horizontales montrent la position probable de la saumure résiduelle pendant la phase très aride.

Fig. 2. — The salar of Uyuni. Dashed lines are isopachs in metres of the salt crust. The surface of the crust is almost perfectly flat (3,653 m). Variations of elevation above sea level do not exceed some decimetres over an area of 10,000 km². Solid circles show the location of the cored wells. Vertical hachures indicate the area of very concentrated bittern brines, south of the salar. Horizontal hachures show the probable position of the residual brine during the drought.

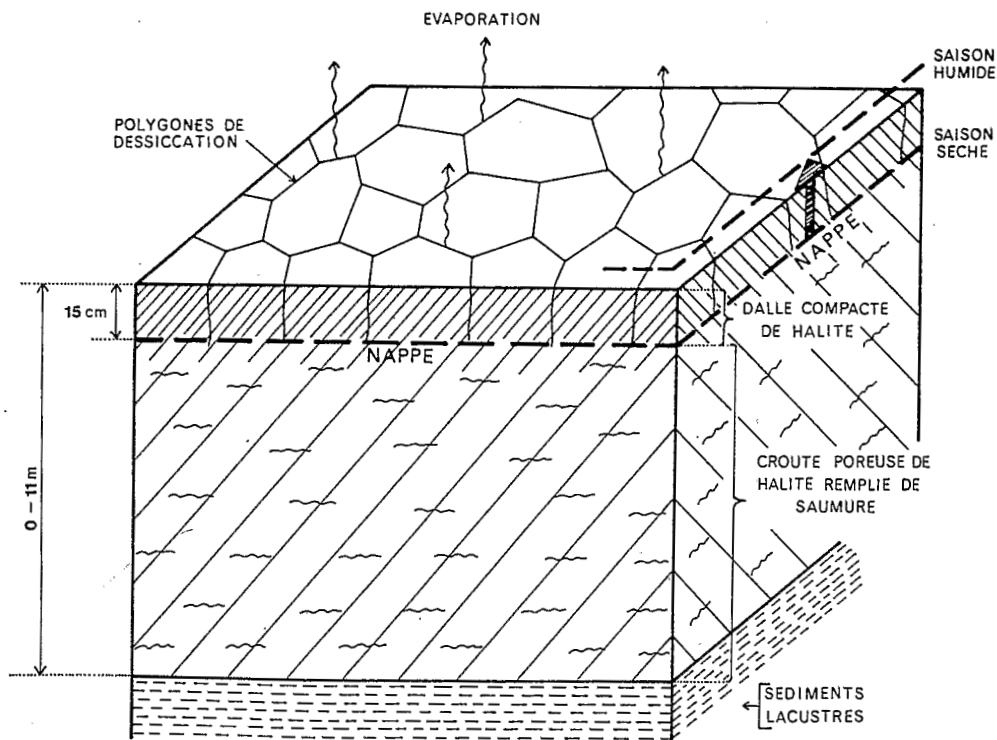


Fig. 3. — Bloc diagramme de la croûte de sel du salar de Uyuni montrant la position de la nappe de saumure.

Fig. 3. — Block diagram of Uyuni salt crust showing the position the position of the brine table.