

Présence de gaylussite et de trona dans les « natronières » du Kanem (pourtour nord-est du Lac Tchad)

PAR G. MAGLIONE,

Section de Géologie, Centre O. R. S. T. O. M., Fort Lamy (1).

Résumé. — Dans cette note, la présence de *gaylussite*, non encore identifiée dans les salines du Kanem, est signalée.

Associés au *trona*, mis en évidence dans cette région par Lacroix (1905), ces dépôts salins sont succinctement replacés dans leurs contextes géologique et hydro-géochimique.

Abstract. — In this paper, the first occurrence of *gaylussite* in the salt deposits of Kanem (Chad, Africa), is notified. It occurs mixed with *trona*, first described in this region by Lacroix (1905). This salt deposit is briefly situated in its geological and hydro-geochemical context.

INTRODUCTION.

Depuis les observations des premiers探索者 et notamment celles de Courtet (1905), Foureau, du Commandant Moll, cités par Lacroix (1905), la présence d'évaporites au fond des creux interdunaires a été signalée comme un fait constant sur la bordure septentrionale du lac Tchad (sud du Kanem).

Si les analyses chimiques des sels présents furent nombreuses (Tilho (1909), Pias (1963), Schneider (1966)), contribuant ainsi à la dénomination de *natronières* qui s'attache à ses salines, aucune analyse physique (diffractométrie X, analyse thermique différentielle, analyse thermopondérale) n'avait été effectuée.

I. — SITUATION GÉOLOGIQUE ET GÉOGRAPHIQUE.

Les dépôts salins se localisent au fond de dépressions interdunaires, improprement appé-

lées *ouadi* (2), situées sur tout le littoral nord-est du lac Tchad, sensiblement depuis la frontière avec le Niger jusqu'à Doum-Doum, sur une profondeur à l'intérieur des terres n'excédant pas 30 km.

Cette région correspond à un erg ancien, orienté NNW-SSE, dont les creux interdunaires furent envahis par les eaux d'une transgression lacustre au cours de laquelle des sédiments fins se déposèrent.

Ces cuvettes présentent des degrés de salinisation et d'alcalisation variés, allant des simples efflorescences de surface jusqu'aux salines activement exploitées dans lesquelles tout le profil au-dessus de la nappe phréatique est le siège d'une intense accumulation de sels.

Les salines actuellement exploitées se localisent entre 13° 40' et 14° de latitude nord et 14° 10' et 14° 20' de longitude est (fig. 1).

Au point de vue climatique, la région étu-

(1) B. P. 65, Fort-Lamy (Tchad).

(2) Ouadi, dérivé de oued est impropre puisque ce terme implique un drainage superficiel temporaire ; les cuvettes du Kanem sont aréiques.

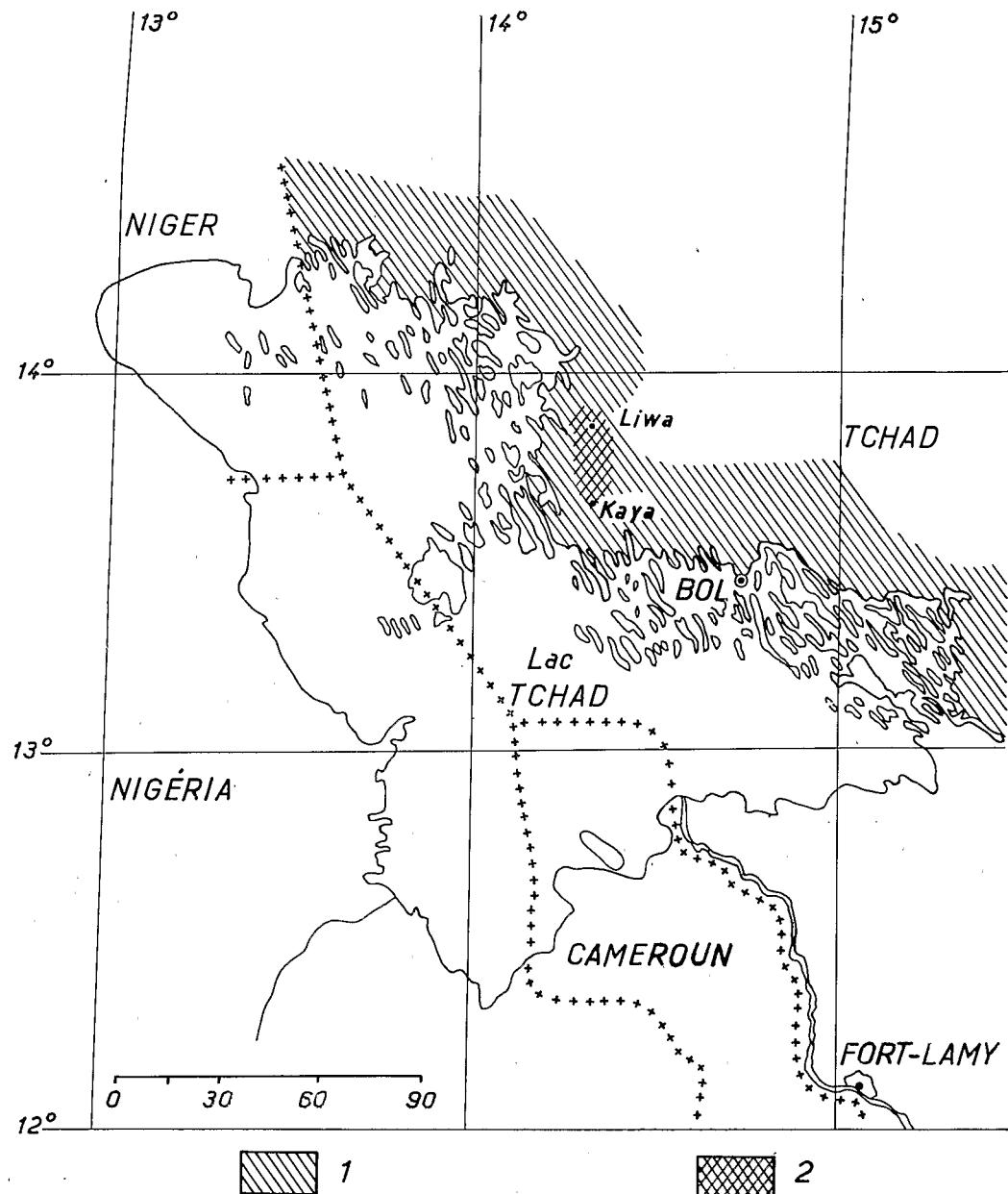


FIG. 1. — Carte de situation.

- 1 : dépression interdunaires à efflorescences salines.
 2 : dépressions interdunaires exploitées en salines.

diée appartient à la zone sahéro-saharienne de la classification d'Aubreville (pluviométrie : 300 mm ; température moyenne : 28° C ; humidité relative moyenne : 38 % à 12 h ; évaporation de l'ordre de 3 200 mm).

II. — FACTEURS GÉNÉTIQUES DES CONCENTRATIONS SALINES.

La salure des eaux souterraines et superficielles ainsi que les dépôts salins des régions

arides relèvent essentiellement d'un processus actuel, dans lequel les causes climatiques (net déficit pluviométrique) et morphologique (endo ou aréisme) sont les facteurs essentiels (Robeaux, 1952 ; Schoeller, 1941).

Outre ces deux conditions représentées dans le Kanem, la présence au fond des dépressions interdunaires :

— d'une nappe phréatique peu profonde (0 à 180 cm), alcaline (pH entre 8,6 et 10,5), très fortement salée (2 à 100 millimhos/cm), à drainage interne déficient (structure hydrogéologique fermée; perméabilité faible de l'aquifère);

— de sédiments limniques à dominance argileuse, permettant d'intenses remontées capillaires (soutenues et accentuées par une nappe en charge) conduit au cours de la saison sèche à une concentration très rapide des eaux de la nappe des bords vers le centre des salines. Certains sels dissous atteignent alors la saturation et précipitent au sein même du terrain aquifère.

En surface, les sels solubles exsudés des sédiments viennent former une croûte saline pulvérulente; dans les puisards d'exploitation, les saumures exposées à l'évaporation directe déposent une dalle continue formée des sels ayant atteint leur limite de solubilité.

Ce phénomène se situe à la limite des domaines géologique et pédologique. Plus qu'une différence de nature, il représente en fait le terme ultime de la pédogenèse des sols salins à alcalis précédemment décrite dans les polders de Bol (Cheverry, 1965).

III. — PHYSICO-CHIMIE DES EAUX DE LA NAPPE PHRÉATIQUE.

La nappe phréatique du Kanem est alimentée dans sa partie occidentale par l'inféroflux en provenance du lac Tchad (Schneider, 1966).

Sur le front d'infiltration, les eaux lacustres présentent le faciès bicarbonaté calcique; en se rapprochant du rivage, dans les *bahrs*⁽¹⁾ en plus d'une conductivité plus importante (600 à 1 000 micromhos à 25° C), on assiste à une augmentation des alcalins (surtout Na) qui égalent et parfois même dépassent les alcalino-terreux.

À mesure que l'on se rapproche de la zone des salines, cette évolution ne fait que s'accentuer au sein de la nappe phréatique. La physico-chimie de celle-ci est influencée à la fois par sa

(1) Bahr : bras du lac correspondant à d'anciens creux dunaires submergés, s'enfonçant profondément dans les terres.

profondeur par rapport au sol et par la nature lithologique de l'aquifère (*qui détermine en dernier ressort l'intensité des remontées capillaires*).

C'est ainsi que l'on passe au village de Liwa en moins de 500 m, de 970 micromhos/cm au puits du sommet de la dune à 2300 micromhos/cm; valeur de la conductivité trouvée au puits de l'ouadi, situé à la rupture de pente sable-argile. Quel que soit leur état de concentration, les eaux de la nappe se regroupent dans la zone de l'alcalinité primaire, telle que la définit Piper dans sa représentation hydrochimique en losange; elle résulte de la présence d'acides faibles (HCO_3^- , CO_3^{2-}) combinés aux alcalins (Na^+ , K^+).

L'intensité du phénomène augmente encore des bords vers le centre de la saline de Liwa : la nappe dans un puisard d'exploitation présente une conductivité de 108 115 micromhos/cm. Les eaux sont alors hypercarbonatées, une montée excessive des alcalins faisant tomber les alcalino-terreux à l'état de traces.

Ce phénomène est général comme le montre le tableau I où figurent les résultats des analyses chimiques de l'eau des puits et des saumures de quatre salines (Liwa, Kaya, Andjia et Bedarra).

Le tableau II où figurent les principaux paramètres caractéristiques ainsi que la figure 2 rendent compte de cette évolution.

On constate une montée plus rapide du Cl et du CO_3 combiné par rapport aux sulfates.

Les rapports concernant les cations traduisent la brutale montée des alcalins par rapport aux alcalino-terreux, dès que l'eau du lac s'infiltra dans la nappe dunaire; il n'est cependant pas encore possible de dire si ce phénomène est dû, en partie, à un échange de bases entre l'eau et le matériau argileux de l'aquifère, ou bien uniquement à la soustraction des ions Ca par précipitation de CaCO_3 .

Les valeurs élevées du *Sodium Adsorption Ratio* indiquent le caractère alcalisant de la nappe.

Pour Delecourt (1946), les eaux de type *natronique*, c'est-à-dire susceptibles de donner naissance par évaporation à des sels carbonatés ou bicarbonatés sodiques doivent présenter les caractères suivant (tableau II) :

$$\begin{aligned} \text{TN} &> 0 \\ \text{TH} &< \text{TA} \text{ et } \text{TB} < 0 \end{aligned}$$

On voit que l'eau du lac Tchad sur le front d'infiltration et toutes les eaux de la nappe phréatique du Kanem, cachées ou affleurantes, appartiennent à ce type ($\text{TN} > 0$).

TABLEAU I. — Analyse des eaux de la nappe phréatique du Kanem.

N°	ORIGINE	CONDUC- TIVITÉ à 250°C, micro- mhos/cm	pH	RÉSIDU SEC à 105°C, mg/l	TENEURS (mg/l)							
					Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃
1	Lac Tchad à Karet-Katia...	644	8,0	458	50,0	20,67	52,9	31,28	3,54	0	6,0	408,7
2	Puits de la dune de Liwa...	970	8,1	642	28,06	6,08	138,0	78,2	14,18	76,8	0	469,7
3	Puits de l'ouadi de Liwa...	2 300	8,6	1 462	44,09	21,89	397,9	35,19	202,07	91,2	42	866,2
4	Saumure de Liwa.....	108 115	9,5	(370 000)	16,0	19,46	69 000	5 357	14 180	2 458	75 900	31 415
5	Puits de Kaya.....	2 868	8,6	1 808	6,00	3,65	602,6	105,6	124,07	312	75,0	1 232,2
6	Saumure de Kaya.....	101 059	9,7	339 930	0	19,46	125 235	6 139	20 915	3 921	126 000	85 400
7	Puits d'Andjia.....	1 046	8,3	640	20,0	6,08	188,6	23,46	85,08	100,8	12,0	396,5
8	Saumure d'Andjia.....	108 357	9,8	372 640	0	19,46	129 720	11 730	49 360	5 116,8	120 000	62 525
9	Puits de Bedarra.....	1 800	8,5	1 220	46,09	18,24	296,57	37,14	99,60	220,9	24,0	665,11
10	Saumure de Bedarra.....	104 500	9,8	(350 000)	0	38,91	82 048	50 048	14 534	2 022,6	130 500	27 459

Nombres entre parenthèses : résidu calculé à partir de la conductivité.

TABLEAU II. — Paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique du Kanem.

N°	SO ₄ Cl	CO ₃ + HCO ₃ SO ₄	Na + K Cl	Na + K Ca	Ca + Mg Na	SAR	TH	TA	TN	TB
1	—	—	31,00	1,24	1,82	2,02	21	34,5	15,0	— 22
2	4,00	4,81	20,00	5,71	0,31	6,15	9,5	38,5	38,0	— 39,5
3	0,33	8,20	3,19	8,27	0,23	12,20	20	78,0	62,5	— 76,5
4	0,12	59,47	7,84	3 921	0,0008	2 732	12	15 225	13 685	— 15 475
5	1,85	3,49	8,25	96,30	0,02	47,89	3,0	113,7	127,6	— 145
6	0,14	68,00	9,50	—	0,0003	6 097	8,0	28 000	25 000	— 28,405
7	0,87	3,28	3,66	8,80	0,18	9,47	7,5	34,5	32,0	— 40
8	0,08	47,00	4,24	—	0,0003	6 316	8,0	25 125	22 700	— 20 655
9	1,60	2,54	4,94	6,02	0,3	9,3	19,0	58,5	55,0	— 70
10	0,10	11,40	11,90	—	0,0008	2 852	16,0	24 000	22 350	— 24 210

Tous les paramètres ont été calculés à partir des résultats analytiques exprimés en milliéquivalents/litre.

$$\text{SAR} \text{ (Sodium Adsorption Ratio)} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}}, \text{ d'après Richards.}$$

$$\begin{aligned} \text{TH} \text{ (titre hydrotométrique)} &= 5 (\text{Ca} + \text{Mg}) \\ \text{TA} \text{ (titre alcalimétrique)} &= 5 (\text{CO}_3 + \text{HCO}_3) \\ \text{TN} \text{ (titre natronique)} &= 5 (\text{Na} + \text{K} - \text{Cl}) \\ \text{TB} \text{ (titre de chloruration calcique)} &= 5 (\text{Ca} - (\text{CO}_3 + \text{HCO}_3 + \text{SO}_4)), \text{ d'après Delecourt.} \end{aligned}$$

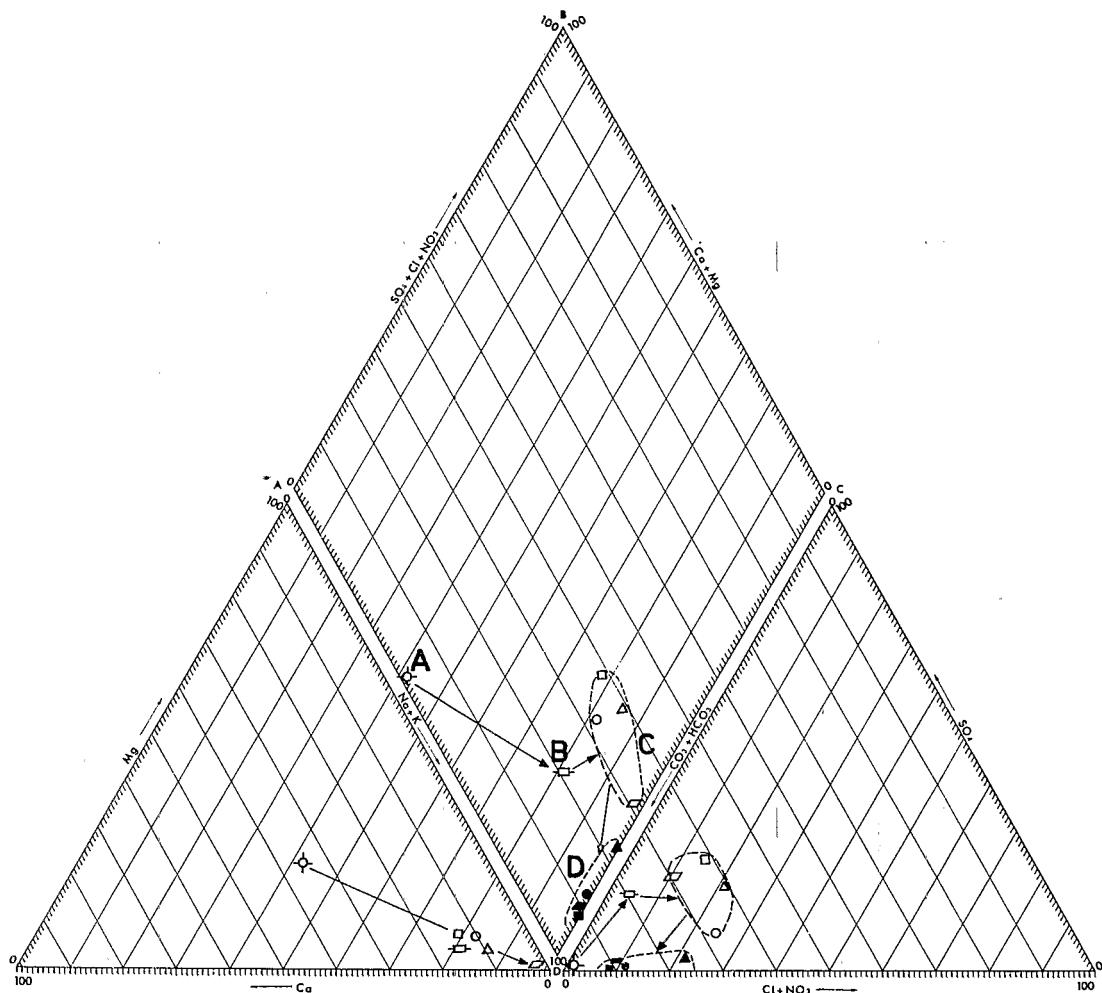


FIG. 2. — Diagramme d'analyse des eaux de la nappe phréatique du Kanem.

Sur la figure 2, les résultats analytiques ont été portés en pour-cent sur un diagramme losangique de Piper. L'évolution signalée apparaît très nettement.

Le déplacement du point A en B, puis C peut s'interpréter comme une tendance à la précipitation de CaCO_3 ; il traduit en effet une diminution du CO_3 combiné et du Ca, et une augmentation du Cl.

Le déplacement de la zone C (eau des puits) vers la zone D (eau des puisards d'exploitation) peut s'interpréter soit comme une précipitation de CaSO_4 , soit comme une réduction des sulfates (montée du CO_3 combiné, de Na et Cl; baisse de Ca et SO_4).

Cependant, du fait de l'inégalité $\text{TH} < \text{TA}$,

signifiant qu'il n'y a pas assez de Ca pour saturer le CO_3 combiné, il est vraisemblable que nous assistons au second phénomène.

IV. — NATURE DES SELS CRISTALLISÉS.

La nature des sels minéralogiquement exprimés est évidemment fonction des caractères physico-chimiques de la nappe à partir de laquelle ils prennent naissance. Cette dernière présentant le faciès *carbonaté sodique*, des sels *bicarbonatés* et *carbonatés sodiques*, plus ou moins hydratés, seront présents.

Aucun dépôt de gypse n'est susceptible d'y être rencontré puisque les analyses montrent

qu'il n'y a pas assez d'alcalino-terreux pour saturer les carbonates qui précipitent avant celui-ci.

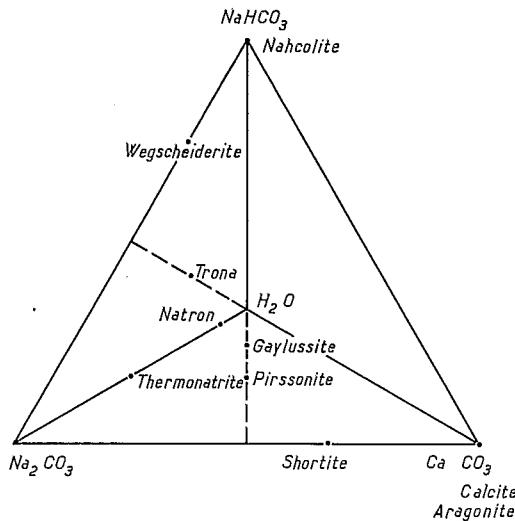


FIG. 3. — Composition des minéraux (en mole %) dans le système $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ (d'après Eugster et Smith, 1965).

Une zonation dans les dépôts apparaît tant latéralement (des bords vers le centre), que verticalement (depuis la nappe jusqu'en surface).

On distingue quatre variétés de sels :

1. Monocristaux blancs, translucides, aux facettes bien dessinées. Les analyses (rayons X, A. T. D., A. T. P.) montrent qu'il s'agit de *gaylussite*, $\text{CaCO}_3\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-}5\text{H}_2\text{O}$, monoclinique (fig. 3, 4 et 5).

C'est le premier minéral représenté à la base de la colonne sédimentaire et sur le bord des cuvettes. Il est également le premier à cristalliser dans le temps.

Lorsque la nappe est trop profonde, les remontées capillaires étant plus ou moins bloquées, c'est alors le seul minéral présent (ouadi de Koulfa-Kama, nappe à 180-200 cm).

2. Dans les salines où la nappe est subaffleurante, la *gaylussite* se maintient tout le long du profil, mais coexiste alors vers le centre des cuvettes avec d'autres dépôts salins, aux formes variées, disséminés dans l'argile : boules massives ou fibreuses, rognons à aiguilles rayonnantes pesant jusqu'à 3 kg. Toutes ces variétés se caractérisent par une couleur sombre et se rangent dans la catégorie du *natron noir* que distinguent les sauniers indigènes.

Les diverses analyses (chimique, diffractométrie X, A. T. P.) montrent qu'il s'agit de *trona*,

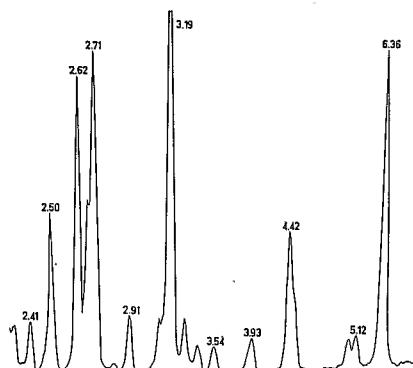


FIG. 4. — Diffractogramme X : gaylussite.

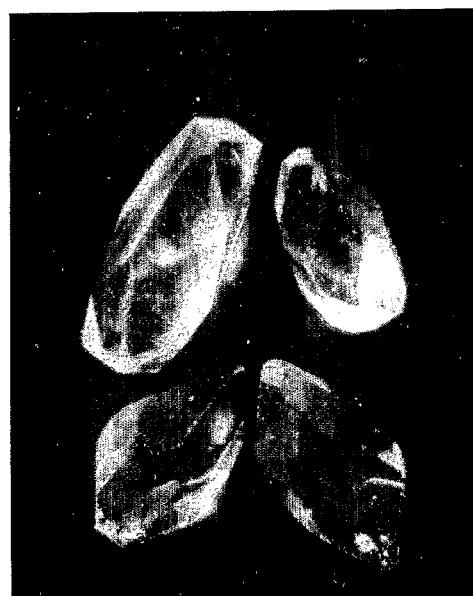


FIG. 5. — Cristaux de gaylussite.

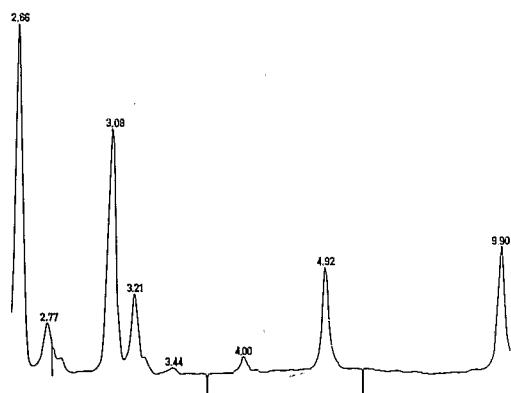


FIG. 6. — Diffractogramme X : trona.

$\text{NaHCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, monoclinique, mélangé à de faibles quantités de *gaylussite* (fig. 3 et 5).

3. En surface, dans les bassins évaporatoires où les saumures se concentrent, le *natron blanc* cristallise sous forme d'une dalle continue de 30 à 40 cm d'épaisseur, dans laquelle les sauniers découpent des plaques ovales de 35 à 40 kg qu'ils laissent ensuite sécher au soleil. Cette couche est formée d'un empilement de lits contournés, de 1 à 2 cm d'épaisseur, correspondant à des cristallisations successives et variées (massive, fibreuse, en aiguilles...).

Là encore, il s'agit de *trona* mélangé à quelques grains de quartz ; aucune analyse n'a encore mis en évidence du *natron*, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$.

4. Dans les parties non exploitées des salines et dans les cuvettes à nappe profonde, la surface se recouvre au cours de la saison sèche d'une couche pulvérulente de 15 à 20 cm d'épaisseur qui donne cette blancheur si caractéristique aux dépressions interdunaires de la bordure septentrionale du lac Tchad.

Il s'agit de l'exsudation, sous l'effet de l'intense évaporation, des solutions du sol qui, en cristallisant, viennent se mélanger aux particules sableuses amenées par la déflation des dunes environnantes. Les analyses ont montré un mélange en proportion variée de *trona* et de *quartz*.

V. — SIGNIFICATION GÉOCHIMIQUE DES MINÉRAUX PRÉSENTS.

La littérature (Rankama, 1954) s'accorde à reconnaître la *gaylussite* comme le premier minéral à cristalliser, étant parmi les carbonates sodiques, celui dont la solubilité est la plus faible.

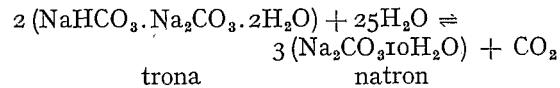
Sa présence, plutôt que celle de la *pirsonnite* ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est sous la dépendance de l'état de concentration et de la température des solutions mères.

La *gaylussite* est une forme de moyenne température ($< 40^\circ \text{C}$) et de haute teneur en eau ; la *pirsonnite*, par contre, est une forme de haute température que l'on peut cependant rencontrer dans les conditions ordinaires mais seulement en l'absence de solution.

Cette condition n'est jamais réalisée dans les salines du Kanem, où les intenses remontées capillaires à partir de la nappe amènent une humidité forte et permanente du terrain.

Dans les conditions ordinaires de température et de pression, le *trona* est le second minéral à cristalliser.

L'équation suivante rend compte de l'équilibre entre les deux espèces :



Les données physico-chimiques du système $\text{NaHCO}_3 - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ ont été établies par Freeth (1923). Les domaines de stabilité des différents minéraux carbonatés et bicarbonatés sodiques, en équilibre avec leurs solutions, ont été discutés par Milton et Eugster (1959) en fonction de la pression partielle de CO_2 et de la température.

Ross (1961) a de son côté établi les domaines de stabilité de ces mêmes minéraux en fonction des pressions partielles de H_2O et CO_2 .

De ces divers diagrammes, il ressort que le *trona* est stable à des températures plus élevées ($> 32^\circ \text{C}$) et à des pressions partielles de vapeur d'eau plus faibles (c'est-à-dire en fait à des concentrations plus fortes des solutions mères) que le *natron*.

Dans les salines du Kanem, les saumures exposées à l'évaporation directe ont des températures toujours supérieures à 32°C et des concentrations trop élevées pour que le *natron* soit la forme minéralogique stable.

Le *trona*, par contre, semble trouver dans ce milieu, les conditions nécessaires à sa stabilité.

CONCLUSIONS.

La *gaylussite*, associée au *trona*, non signalée dans les salines de la bordure septentrionale du lac Tchad a été identifiée. Ces évaporites ont été sommairement replacées dans leurs contextes géologique et géochimique.

Le travail en cours s'attache à définir dans leurs détails les conditions de genèse actuelle de ces concentrations salines. Il permettra par ailleurs de préciser si ces dépôts sont à eux seuls suffisants pour expliquer le remarquable processus de régulation de la salinité des eaux du lac Tchad (Tilho, 1909 ; Bouchardieu, 1957).

La discussion des équilibres minéralogiques, à la lumière des données géochimiques, ne pourra être valablement entreprise que lorsqu'un bilan complet des paragenèses salines aura été dressé.

* * *

Les analyses chimiques ont été réalisées par J. Chanut, laboratoire de chimie du Centre

O. R. S. T. O. M. de Fort-Lamy ; les analyses diffractométriques par C. Parent du laboratoire de géologie appliquée de Paris et M. Pinta du

laboratoire de spectrographie des S. S. C. — O. R. S. T. O. M. de Bondy, que nous tenons à remercier ici.

BIBLIOGRAPHIE

- BOUCHARDEAU, A. et LEFÈVRE, R. (1957). — *Monographie du Lac Tchad*. C. S. L. T. O. R. S. T. O. M., t. I, Édition provisoire, 112 p.
- CHEVERRY, C. (1965). — *Essai de caractérisation des sols des polders de Bol (rives du lac Tchad)*. O. R. S. T. O. M., Centre de Fort-Lamy, 120 p.
- COURTET, H. (1905). — *C. R. Acad. Sci., Fr.*, p. 316-318.
- DELECOMPT, J. (1946). — *Mém. Soc. Bel. Géol., Paléont. Hydr.*, I, 177 p.
- EUGSTER, H. P. et SMITH, G. I. (1965). — *J. Petrol. G. B.*, 6, 3, p. 473-522.
- FREETH, F. A. (1923). — *Philos. Trans. r. Soc. London*, A, 223, p. 35-87.
- FAURE, H. (1963). — Inventaire des Évaporites du Niger (Mission 1963). Rép. du Niger, Min. des T. P., des Mines et de l'Hydr. Rapport BRGM DAK, 65 A7, 162 p., annexes.
- HÉBERT, (1905). — *C. R. Acad. Sci. Fr.*, 140, 163-165.
- LACROIX, M. A. (1905). — Résultats géologiques et minéralogiques de récentes explorations dans l'Afrique occidentale française et dans la région du Tchad. *Rev. coloniale*, 11^e série, n° 25, avril 1905, 205-223.
- MARGAT, J. (1958). — Les eaux salées du Maroc, UNESCO, Actes du Colloque de Téhéran : Problèmes de la salinité dans les régions arides, 91-104.
- MILTON, C. et EUGSTER, H. P. (1959). — Mineral assemblages of the Green River formation, in : ABELSON P. M., (ed.), *Re-*searches in Geochemistry, New York, Wiley, 118-150.
- PIAS, J. (1963). — Les sols du Moyen et Bas-Logone, du Bas-Chari, des régions rive-raines du lac Tchad et du Bahr-El-Ghazal. *Mém. O. R. S. T. O. M., Fr.*, 2, 438 p.
- PIPER, A. M. (1944). — *Trans. Amer. Geogr. Union*, p. 914-929.
- POCHARD, P. (1943). — *Rev. Sc. med. pharm. veter., Afr. Fr.*, L, mars 1943.
- RANKAMA, K. and SAHAMA, Th. G. (1964). — *Geochemistry*. The University of Chicago and London, 911 p.
- RICHARDS, L. A. (1964). — Diagnosis and Improvement of saline and alkali soils. Agriculture Handbook, n° 60, U. S. Department of Agriculture, 160 p.
- ROBAUX, A. (1952). — Propriétés physiques et chimiques des eaux souterraines dans les pays arides. Colloque CNRS, Ankara.
- ROCHE, M. A. — Première estimation des apports en sels au lac Tchad par le Chari. Rapport O. R. S. T. O. M. à paraître.
- SCHOELLER, H. (1941). — *Bull. Soc. géol. Fr.*, (5), XI, 267-298.
- SCHNEIDER, J. L. (1966). — Carte hydrogéologique de reconnaissance au 1/500 000^e. Feuille de Mao et Fort-Lamy ; rapport de synthèse. B. R. G. M.
- SOULA, L. (1950). — Sels du Manga (Niger). La thénardite de Maïné-Soroa. Les sels alimentaires, Dir. Gen. de la Santé publique Dakar, 107 p.
- TILHO, J. (1909). — *Documents scientifiques de la Mission Tilho (1906-1909)*. Imprimerie nationale, Paris, 3 tomes.