

# LE GISEMENT CHLORO-SULFATÉ SODIQUE DE L'ILE DE NAPAL

(Archipel DU LAC TCHAD)

Contribution à la connaissance du bassin tchadien

G. MAGLIONE

Section Géologie du Centre ORSTOM de Fort-Lamy

## RÉSUMÉ

Deux précédentes notes (\*) ont permis de préciser le faciès géochimique régional des paragenèses évaporitiques qui se forment actuellement dans les sédiments argileux des dépressions interdunaires de l'erg fixé du Kanem (bordure septentrionale du lac Tchad). Les facteurs génétiques ont également été définis d'une façon, pour l'instant, qualitative.

Au milieu de ce *faciès régional*, essentiellement *carbonaté sodique*, apparaissent en maints endroits des « anomalies » *géochimiques locales* (« ouadi sulfaté ou chloruré sodique ») ; de telles anomalies s'expliquent par des micromilieus dans lesquels la convergence de divers facteurs (dénivelée de la cuvette interdunaire, nature sédimentologique de l'aquifère, présence de sels « fossiles » de faible solubilité) permet la cristallisation de certains sels sodiques par ailleurs absents de la majorité des salines du Kanem. Tel est le cas de l'ouadi de l'île de *Napal*, *chloro sulfaté sodique*, pour lequel une interprétation génétique est proposée dans cette note préliminaire.

## ABSTRACT

In two former papers (\*) we have specified the regional geochemic facies of evaporitics paragenesis which, actually, are formed into the argilleous sediments of interdunary basins of Kanem's fixed dunes (septentrional edge of Tchad Lake). The genetics factors have also been qualitatively precised.

Within the framework of this regional facies, especially sodic carbonated, also appears at several places some local geochemics anomalies (sodic sulfated or chlorured « wadi »). Those anomalies are explained by micro environments in which the junction of several factors (settling of interdunary basin ; sedimentological aspect of aquiferous, presence of « fossils » salts which had small solubility degree) permits the cryztallisation of sodic salts, which are absents ur the main Kanem's salinos. This is the case of Napal's island wadi, chloro-sulfated sodic for which a genetic interpretation is proposed in this preliminary paper.

---

(\*) MAGLIONE (G.) 1968 et 1969.

## ZUSAMMENFASSUNG

In zwei (\*) vorhergehenden Veröffentlichungen wurde die geochemische Regionalfazies der evaporitischen Paragenesen präzisiert, welche sich zur Zeit in den tonigen Sedimenten der interdünären Depressionen der stabilen Dünenlandschaft des Kanem bilden (nördliches Ufer des Tschad-Sees). Die genetischen Faktoren sind ebenfalls, auf eine in Augenblick nur qualitative Weise, bestimmt worden.

Innerhalb dieser Regionalfazies, die haupt sächlich sodium-karbonatisch ist, treten an vielerlei Stellen lokale geochemische « Anomalien » auf. (sodiumführende, sulfatisierte oder chloritisierte Wadis) ; diese Anomalien lassen sich erklären durch klein-Milieus, in denn das Zusainintreffen von verschiedenen Faktoren (Höhen = unterschied der unterdünären Senke, sedimentologische Natur des Wasserträgers, Anwesenheit « fossiler » Salze von geringer Lösbarkeit) die Kristallisation gewisser Sodiumsalze erlaubt, die sonst meistens in den Salimen des Kanem fehlen. Dieses ist der Fall in sodium führenden, sulfatisierten Wadi auf der Insel Napal, für welches eine genetische Interpretation in dieser Vorveröffentlichung vorgeschlagen wird.

## РЕЗЮМЕ

*В двух предыдущих сообщениях были даны уточнения по поводу местной геохимической фации эвапоритических парагенезисов, образующихся в настоящее время в глинистых отложениях междунных котловин закрепленного эрга в Канеме (северный край озера Чад). Были также определены генетические факторы, но пока что, только качественным способом.*

*В середине этой местной фации, преимущественно карбонатно-содовой, наблюдаются, во многих пунктах, локальные геохимические « аномалии » (сульфатно- или хлоридно-содовые вадии); такие аномалии объясняются присутствием микросред, в которых сочетание различных факторов (неровность междунной котловины, осадочная природа водоносного слоя, наличие « ископаемых » малорастворимых солей) делает возможной кристаллизацию некоторых натриевых солей, обычно отсутствующих в большинстве солончаков Канема. Таков именно хлоро-сульфатно-содовый вадии острова Напаль, для которого, в настоящем предварительном сообщении, предлагается генетическая интерпретация.*

## INTRODUCTION

Le gisement de sel connu sous le vocable « sel de Kangalom » semble avoir fait l'objet avant notre étude d'une seule « visite » et analyse chimique de la part d'un méhariste en septembre 1930. MOSRIN dans sa remarquable étude socio-économique de 1965 en cite les coordonnées en indiquant qu'il s'agit d'un natron spécial employé dans le tannage des peaux. Le sel gemme, pratiquement pur, sous forme de trémiés isolées cubiques (fig. 1) est commercialisé sur les marchés indigènes de Bol, Doum-Doum, Kouloudia et Kouillorom.

L'analyse de 1930 (service des Mines de Brazzaville) montrait déjà qu'il s'agit d'un mélange d'*halite* (55,6 % du poids sec) et de *thenardite* (42,1 %) d'où les sels *carbonatés sodiques* sont absents (*trona*, *natron*, *thermonatrite* ou *nahcolite*).

## SITUATION GÉOGRAPHIQUE (fig. 2)

L'ouadi de Napal est situé à 30 km au SE du village de Bol, dans la zone du lac que géographes et géologues travaillant dans ces régions depuis le début du siècle ont dénommée « Archipel » ; ses coordonnées sont 13°18' de latitude nord et 14°58' de longitude est. L'archipel correspond à un erg ancien maintenant fixé, orienté N-NW - S-SE, dont les creux interdunaires sont occupés par les eaux de l'actuel lac

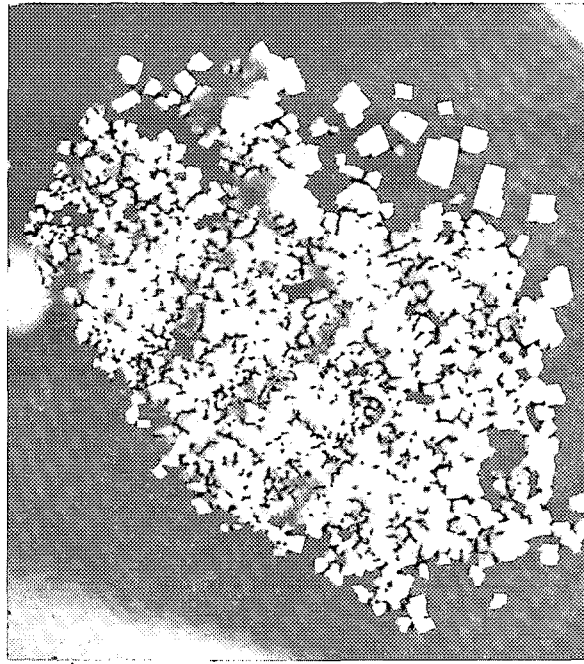


FIG. 1. — Trémies de sel gemme.

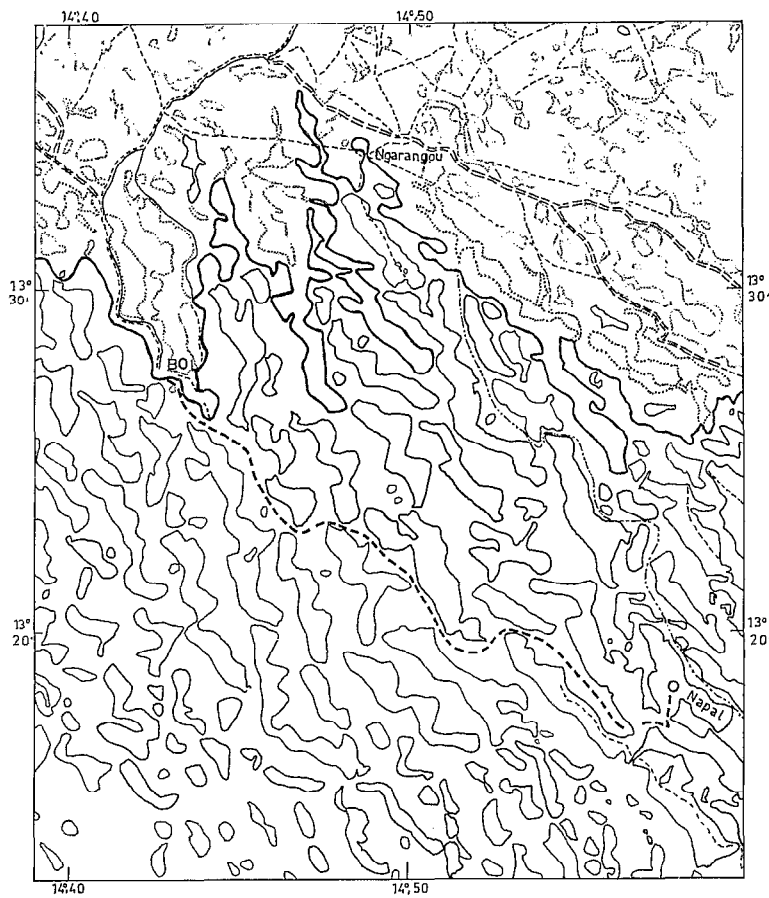


FIG. 2. — Carte de situation.

----- itinéraire d'accès depuis Bol      ○ ouadi de Napal

Tchad ; les sommets de dunes émergés et plus ou moins arasés, constituent autant de petites îles aux formes complexes. Sur ces îles, existent de légères dépressions peu marquées (dénivelées < 2 à 3 m) dont l'assèchement ou la mise en eau par affleurement de la nappe phréatique est commandée par les fluctuations annuelles et inter-annuelles du lac Tchad. La morphologie peu accentuée de ces « ouadis » tout comme celle des lacs permanents du plateau de Bir-Louri conduit à une *dépression hydrogéologique*, peu marquée voire nulle qui est le *facteur déterminant* de la dynamique des sels solubles de la nappe phréatique ; ce rôle a déjà été défini par ailleurs (MAGLIONE, 1969).

L'ouadi de Napal se présente sous une forme ovoïde, orienté N-NW - S-SE, de dimensions modestes (300 m sur 100 m). La surface effectivement exploitée n'était que d'un hectare environ au moment de notre étude.

## ANALYSES CHIMIQUES, DIFFRACTOMÉTRIQUES X

### Méthodes

Sur le terrain et « *in situ* », pH et Eh ont été mesurés à l'aide d'un pHmètre millivoltmètre Tacussel portatif à piles P 50 ; le pH est mesuré au 1/10<sup>e</sup> d'unité pH, le potentiel d'oxydo-réduction (Eh) à 5 mV près. La conductivité a été mesurée grâce à un conductomètre transistorisé portatif Cenco ; la précision est de  $\pm 1$  % et la lecture directe à 25 °C en micromhos. cm<sup>-1</sup>.

Les analyses chimiques des eaux, sels cristallisés et sels solubles de l'extrait saturé des sédiments ont été conduites au laboratoire de Physico-chimie du Centre ORSTOM de Fort-Lamy\*. Les ions majeurs CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et Cl<sup>-</sup> sont dosés par potentiométrie (appareil Metrohm E 436), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> par complexométrie ; les alcalino-terreux sont dosés par complexométrie, les alcalins par photométrie de flamme, SiO<sub>2</sub> soluble par spectrophotométrie.

Les sels cristallisés, deshydratés par passage à l'étuve à 105 °C sont ensuite solubilisés dans 1 litre d'eau bidistillée et leur analyse alors conduite comme dans le cas d'une analyse chimique classique.

Les sels solubles des extraits saturés des sédiments tapissant le fond de l'« ouadi » sont obtenus selon la méthode de Riverside (RICHARDS, 1954) et les déterminations ioniques selon les mêmes méthodes que pour les eaux.

La précision des analyses, pour la gamme des teneurs rencontrées est de 2 % pour l'alcalinité totale et les chlorures, de 5 % pour les sulfates ; elle est de 2 % pour le calcium, de 5 % pour le magnésium, de 2 % pour les alcalins et la silice soluble.

Les analyses diffractométriques aux rayons X ont été menées au laboratoire de Diffractométrie X des CST du BRGM à Orléans sous la direction de M. JACOB (Ch.) et lors d'une mission en Hollande par nous-même au Laboratoire Vening-Meinez de Géochimie de l'Université d'Utrecht, sous la direction du Prof. SCHUILLING (R.D.).

Dans les deux cas, l'appareil utilisé a été un diffractomètre Philips PW 1120 avec longueur d'onde K<sub>α</sub> du cuivre ; la seule variante fut un travail en chambre de Guinier pour les déterminations effectuées en Hollande.

L'échantillon brut est broyé et mélangé manuellement avec du silicium et le maximum de douceur afin d'éviter une deshydratation par échauffement, vis-à-vis de laquelle ces minéraux salins sont particulièrement sensibles ; le passage des formes decahydratées à des formes anhydres pour les carbonates et sulfates alcalins s'opère en effet à des températures voisines de 32 °C.

\* Nous remercions MM. BLANCH (C.) et DURAS (J.B.) sous la direction desquels ces analyses furent effectuées.

*Résultats. Interprétation*

Les tableaux I et II résument les résultats d'analyses chimiques des eaux, sels cristallisés et sels solubles des extraits saturés des sédiments. Dans le tableau III nous avons fait apparaître les rapports ioniques caractéristiques qui permettent une meilleure compréhension de l'évolution des eaux « douces » jusqu'à leur terme ultime, sous forme de sels cristallisés.

TABLEAU I

*Résultats d'analyses hydrochimiques en mé · l<sup>-1</sup>*

N°	pH	Eh mV	C 25 °C µmhos · cm <sup>-1</sup>	RS mg · l <sup>-1</sup>	SiO <sub>2</sub> mg · l <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	S <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	S <sup>-</sup>
1	8,1	+ 390	383	304	91,0	1,06	0,94	1,68	0,35	4,03	0,26	0,22	0,54	3,01	4,03
2	8,2	+ 490	11 300	9 920	72,5	12,40	13,20	124,00	4,00	154,60	43,60	75,10	32,50	31,80	153,00
3	9,3	+4000	249 000	287 870	60,0	17,10	6,90	4 120	290,00	4 430	3 000	960,00	291,00	137,00	4 390
4	9,4	+ 425	143 000	427 580	160,0	2,80	6,10	6 000	470,00	6 480	4 200	1 500	565,00	208,00	6 470

(1) E<sub>40</sub> : Eau du lac Tchad, rivage NE de Napal.(2) E<sub>41</sub> : Eau de la nappe phréatique, flanc SE de l'ouadi.(3) E<sub>42</sub> : Saumure, bord Est de l'ouadi.(4) E<sub>43</sub> : Saumure surmontant les trémies de sel gemme.

TABLEAU II

*Résultats d'analyse chimique des sels cristallisés et des sels solubles des sédiments  
en g/100 g de sel ou de sédiment sec*

N°	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	% sels solubles	% impuretés
K <sub>1</sub>	0,01	Tr	0,12	0,01	0,09	0,16	—	0,01	—	—
K <sub>2</sub>	0,34	0,46	30,40	0,39	5,71	60,00	—	1,65	98,95	1,05
K <sub>3</sub>	0,80	0,06	38,20	0,39	58,14	1,90	—	1,04	100,53	0,0

K<sub>1</sub> : Argile du flanc de l'ouadi.K<sub>2</sub> : Dalle saline, tapissant le fond de l'ouadi.K<sub>3</sub> : Trémies de sel gemme.

TABLEAU III

Rapports ioniques caractéristiques des eaux, sels et sédiments de l'ouadi de Napal  
(calculés à partir des résultats en mé · l<sup>-1</sup>)

N°	$\frac{Mg}{Ca}$	$\frac{Na}{Ca}$	$\frac{Na + K}{Ca}$	$\frac{SO_4}{Cl}$	$\frac{CO_3 + HCO_3}{Cl}$	$\frac{CO_3 + HCO_3}{SO_4}$	SAR	TH	TA	TN
E <sub>40</sub>	0,88	1,58	1,91	0,84	13,60	16,13	1,69	10,0	17,75	8,85
E <sub>41</sub>	1,06	10,00	10,32	1,72	0,78	0,46	1,40	128,0	171,50	422,0
E <sub>42</sub>	0,40	240,93	257,89	0,32	0,14	0,44	4,93	120,0	2 140	7 050
E <sub>43</sub>	2,17	2 142	2 310	0,35	0,18	0,51	0,41	44,5	3 865	11 350
K <sub>1</sub>	0,15	13,66	14,20	1,30	0,08	0,06	—	2,25	1,10	14,70
K <sub>2</sub>	2,20	776,47	782,35	7,76	0,16	0,02	—	0,275	1,35	58,50
K <sub>3</sub>	0,12	415,00	417,50	0,02	0,01	0,42	—	0,225	0,85	1,50

SAR : Sodium Adsorptio Ratio =  $\frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$ , d'après RICHARDS (1954).

TH : 5(Ca + Mg) = Titre hydrotimétrique

TA : 5(CO<sub>3</sub> + HCO<sub>3</sub>) = Titre alcalimétrique

TN : 5(Na + KCl) = Titre natronique, d'après DELECOURT (1946).

La figure 3 représente le diffractogramme d'un échantillon de dalle saline qui en fin de saison sèche tapisse le fond de l'ouadi ; il s'agit d'un mélange d'*halite* et de *thernardite*.

#### Evolution des caractéristiques ioniques des eaux

Sur le rivage est de l'île de Napal, les eaux présentent un faciès classique, analogue à celui défini pour cette zone de l'« archipel » est par de récentes études hydrobiologiques (CARMOUZE J.P., 1968). Il convient cependant de signaler déjà une apparente anomalie ; bien que peu concentrées (383  $\mu\text{mhos. cm}^{-1}$ ), les alcalins dominent déjà les alcalino-terreux, notamment en ce qui concerne Na<sup>+</sup> (1,68 mé. l<sup>-1</sup>) par rapport au Ca<sup>2+</sup> (1,06 mé. l<sup>-1</sup>) ; au fond des « bahrs » (bras du lac s'enfonçant à l'intérieur des terres) de la bordure septentrionale du lac Tchad, il faut atteindre des conductivités électriques de l'ordre de 1 000  $\mu\text{mhos. cm}^{-1}$  pour assister à une telle inversion du spectre cationique.

Entre le rivage est de l'île et un puits creusé sur le flanc est de l'ouadi (sensiblement à la rupture de pente), les eaux se concentrent de façon notable ; la conductivité passe de 383 à 11 300  $\mu\text{mhos. cm}^{-1}$ .

Cette augmentation de la concentration n'est pas imputable à des processus évaporatoires puisque la nappe est, du moins dans sa partie supérieure, contenue dans un aquifère sableux dont le rôle protecteur efficace contre l'évaporation a été récemment rappelé (FONTES et al., 1969).

Plus intéressante à suivre est encore l'évolution des caractéristiques ioniques de cette eau. Afin d'obtenir une meilleure image des variations de concentration des différents ions le long de la « chaîne » eau du lac — nappe phréatique — saumures et enfin sels cristallisés nous avons utilisé le rapport  $\Delta C_x/C_x$  (CARMOUZE 1968) avec  $\Delta C_x$  = augmentation de la concentration de l'ion x entre les points 1 et 2 ;  $C_x$  = concentration initiale de l'ion x en 1.

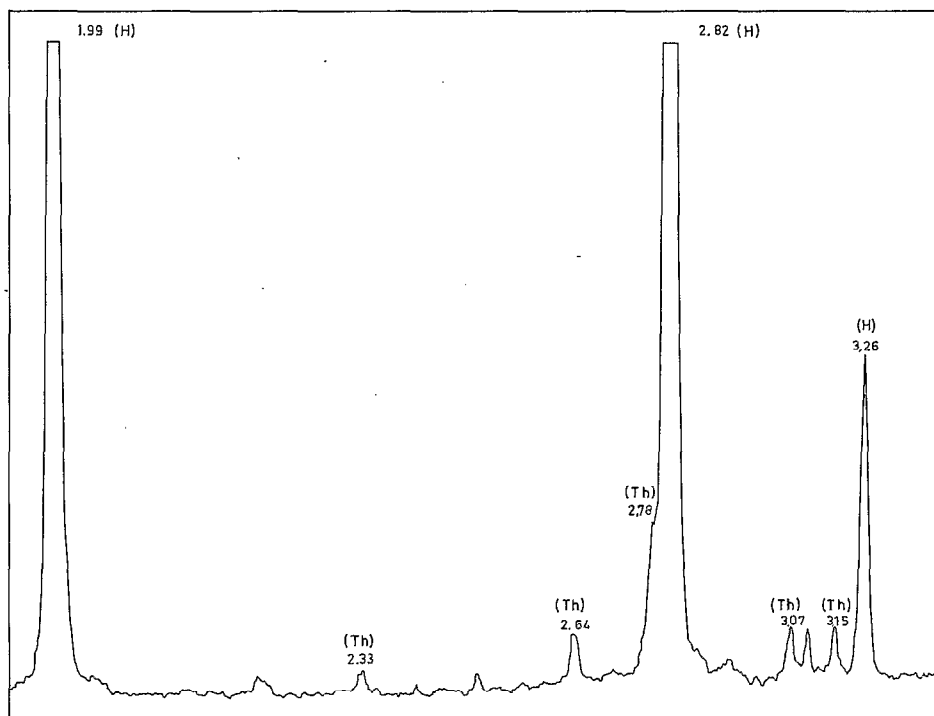


FIG. 3. — Diffractogramme X de la dalle saline.

Ces paramètres ont été calculés pour chacun des ions en prenant les échantillons 2 à 2 et sont résumés dans le tableau IV.

La concentration de l'ion  $\text{Ca}^{2+}$  subit une augmentation de +10,70 entre le rivage du lac et la nappe phréatique, sur une distance d'environ 800 m. Entre l'eau de la nappe et la saumure du bord est, que l'on peut considérer comme la moins « évoluée » (d'après ses concentrations en chlorures et sulfates), elle n'augmente que de +0,38 ; elle diminue ensuite entre cette même saumure et celle qui surmonte les trémies de sel gemme, en voie de cristallisation à l'époque (janvier 1969) où nous avons mené cette étude.

TABLEAU IV

Variations relatives des concentrations des différents ions depuis l'eau du lac jusqu'aux sels cristallisés

	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$
E <sub>40</sub> -E <sub>41</sub>	+10,70	+13,04	+72,81	+10,43	+166,70	+340,36	+3,63	+9,56
E <sub>41</sub> -E <sub>42</sub>	+0,38	-0,48	+32,22	+71,50	+67,81	+11,78	+115,40	+3,30
E <sub>41</sub> -E <sub>43</sub>	-3,31	-0,54	+47,39	+116,50	+95,33	+18,97	+225,00	+5,54
K <sub>1</sub> -K <sub>2</sub>	+33,00	—	+252,33	+38,00	+62,44	+374,00	—	+164,00
K <sub>2</sub> -K <sub>3</sub>	+1,35	-0,87	+0,26	—	+9,18	-0,97	—	-0,37

Le même raisonnement peut être conduit sur les variations ioniques entre la phase soluble du sédiment limono-argileux tapissant le fond de l'ouadi et les différents sels cristallisés. Entre le sédiment et la dalle saline la concentration de l'ion  $\text{Ca}^{2+}$  augmente de +33,00 ; elle n'est plus que de +1,35 entre cette dalle et les cristaux de sel gemme.

La concentration de l'ion  $\text{Mg}^{2+}$  augmente tout d'abord depuis l'eau du lac jusqu'à celle de la nappe de +13,04 ; elle diminue ensuite régulièrement (-0,48, -0,54 et -0,87).

En ce qui concerne le comportement des alcalins, la teneur en sodium augmente brutalement de +72,81, puis de +32,22 et +47,39 entre les deux saumures. L'augmentation de +252,32 entre la phase soluble du sédiment et la dalle saline ne fait que traduire le résultat des précipitations de halite et de thenardite qui la composent.

La concentration de l'ion  $\text{K}^+$  suit une évolution analogue à celle du  $\text{Na}^+$  ; elle augmente d'abord peu, sensiblement de la même intensité que pour les alcalino-terreux (+10,43). Elle croît par contre intensément entre la nappe phréatique et la première saumure (+71,50) et d'une façon plus grande encore entre les deux saumures (+1165,0). Son comportement dans la phase solide est par contre plus difficile à cerner.

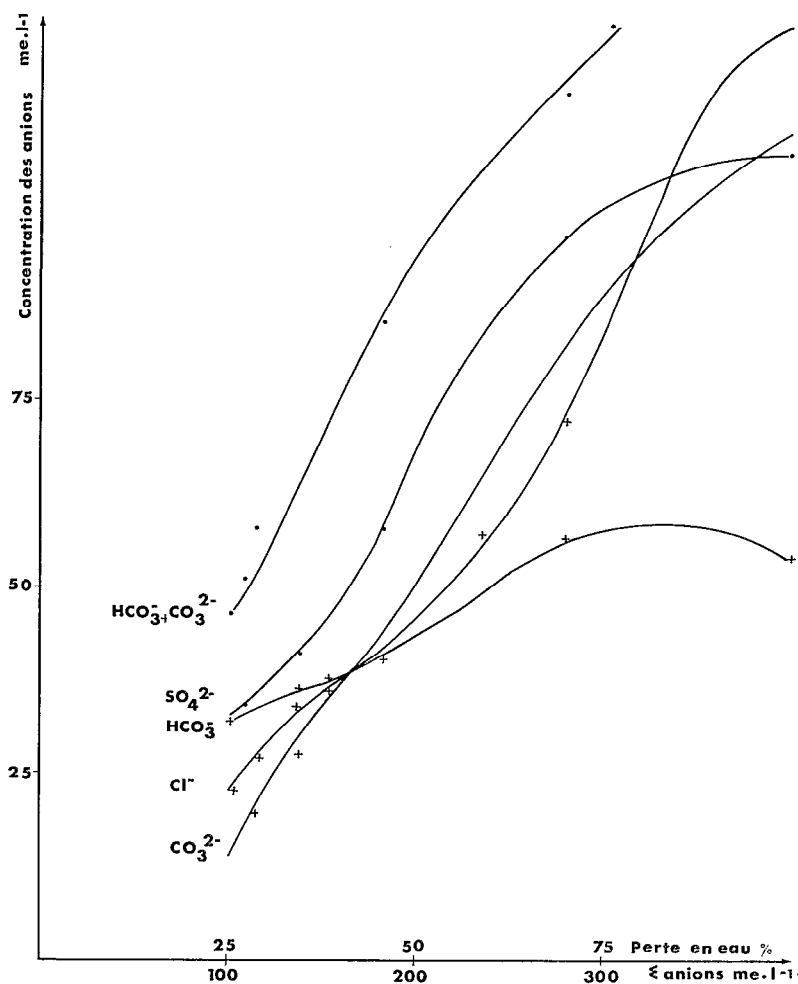


FIG. 4. — Variation de la concentration des anions en fonction de la concentration anionique totale.



Ces variations, positives ou négatives, ne peuvent pas s'expliquer par le seul jeu de processus évaporatoires conduisant à des cristallisations fractionnées en fonction des différences de solubilité. Il semble que nous assistions en fait à des phénomènes de dissolution et d'interactions entre l'eau de la nappe et le matériau aquifère : ces variations ne sont pas concomitantes entre les ions et pour certains d'entre eux, il s'agit de variation, non point relative, mais absolue.

Très différente se trouve être l'évolution des anions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  d'une part et  $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$  d'autre part. En ce qui concerne les premiers, leur concentration augmente respectivement de +166,70 et de +340,36 entre le rivage de l'île et le puits creusé sur le flanc sud-est de l'ouadi. Carbonates et bicarbonates, n'augmentent que dans des proportions minimales sans commune mesure avec l'augmentation que devrait leur conférer le jeu de processus évaporatoires (+3,53 et +9,56), et sans aucune relation avec l'augmentation de la salure globale (+27,5).

Les courbes expérimentales (fig. 4) que nous avons pu établir à partir d'eaux lacustres du rivage nord-est du lac Tchad, moyennement concentrées (conductivité de départ  $\approx 1\,000\ \mu\text{mhos}$ ) montrent qu'aux températures auxquelles sont soumises les eaux libres affleurantes (entre  $30^\circ$  et  $40^\circ\text{C}$ ) ce sont les carbonates alcalins qui présentent les solubilités les plus élevées, suivis par les chlorures et les sulfates. Il est bien entendu que ce comportement est sujet à de sérieuses modifications, sous l'effet dit de « l'ion commun » qui peut abaisser en de notables proportions la solubilité de certains sels (GARRELS et CHRIST, 1967 ; POUGET, 1968).

Par la suite, entre l'eau de la nappe et les saumures, les teneurs en  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  n'augmentent que peu, notamment pour ces derniers. On voit bien là, l'influence de la précipitation et du nourrissage constant de la dalle saline, en majorité constituée de sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$  dans  $\text{K}_2 = 60\%$  du poids sec) qui soustrait autant d'ions sulfates aux saumures surnageantes et les enrichit parallèlement en ions chlorures dont la solubilité est plus élevée (enrichissement de +67,81 et 95,33 pour les chlorures et seulement de +11,78 et +18,97 pour les sulfates).

Les carbonates s'enrichissent de façon notable entre la nappe et les saumures (+115,40 et 225,00), tandis que les bicarbonates dont la solubilité est nettement moindre ne progressent que modérément (+3,30 et 5,54).

#### *Evolution des caractéristiques ioniques de la phase soluble des sédiments et sels cristallisés*

Le tableau II rend compte de la composition chimique de la phase soluble du sédiment argilo-limoneux (formant le soubassement des saumures) et des deux types de sels récoltés par les sauniers, dalle saline et trémies de sel gemme.

L'échantillon  $\text{K}_1$  correspond à un sédiment argilo-limoneux dans lequel baigne la nappe phréatique et qui fut récolté dans le profil réalisé sur le flanc sud-est de l'ouadi. Ce même sédiment qui se termine en biseau sur les flancs sableux de l'ouadi et qui forme le soubassement sur lequel se dépose la dalle saline présente à l'aplomb des saumures une phase soluble nettement plus concentrée ; elle est essentiellement constituée de  $\text{Na}^+$ , de  $\text{SO}_4^{2-}$ , de  $\text{Cl}^-$  tandis que carbonates, bicarbonates et alcalinoterreux sont pratiquement absents.

La dalle saline (fig. 5), examinée à la loupe, se présente comme une alternance millimétrique de lits massifs de thénardite séparés par des géodes tapissées des microcristaux cubiques de halite.

L'échantillon  $\text{K}_2$  représente un échantillon moyen de cette dalle saline qui, en fin de cycle (avril-mai), mesure de 15 à 20 cm d'épaisseur. On constate que la thénardite domine largement l'halite ( $\text{SO}_4^{2-} = 60\%$  ;  $\text{Cl}^- = 5,71\%$ ).

Les trémies (fig. 1), bien que fortement colorées en rose (algues ou bactéries) sont constituées par de l'halite d'une grande pureté, légèrement « souillée » de bicarbonates et sulfates alcalins. Le diffractogramme correspondant à l'échantillon  $\text{K}_2$  (fig. 2) fait apparaître clairement le mélange thénardite + halite.

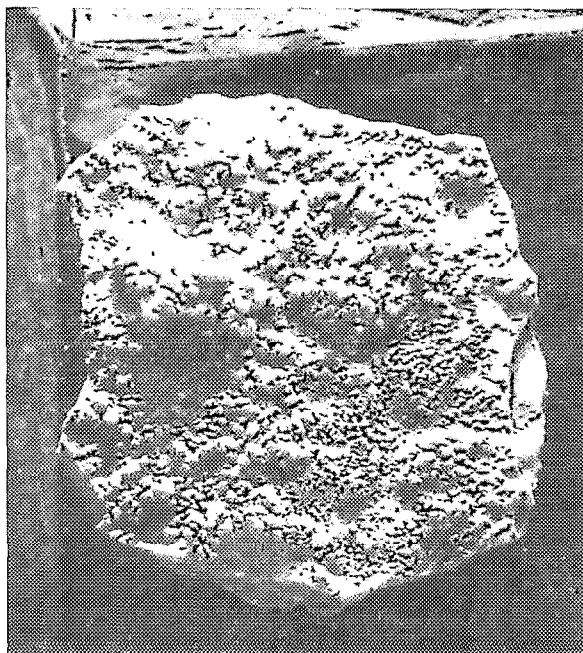


FIG. 5. — Dalle saline formant le soubassement des saumures résiduelles.

#### HYPOTHÈSES GÉNÉTIQUES EN PRÉSENCE

L'ouadi de Napal présente toutes les caractéristiques des eaux se concentrant en milieu subdésertique que PERELMAN (1967) appelle « métamorphisme » chloro-sulfaté.

Pour cet ouadi, l'évaporation n'est pas seule responsable du passage d'un faciès bicarbonaté sodique ( $E_{40}$ ) à un faciès sulfaté-sodique ( $E_{41}$ ), pour aboutir enfin à un faciès chloruré sodique ( $E_{42}$ ,  $E_{43}$ ). La nappe est contenue à faible profondeur dans un aquifère essentiellement sableux, et ce type de matériau bloque toute possibilité d'évaporation par remontée capillaire.

Les eaux de départ présentent en milliéquivalents les pourcentages suivants :  $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- = 88\%$ ,  $\text{Cl}^- = 6,5\%$ ,  $\text{SO}_4^{2-} = 5,5\%$ . En bout de chaîne évolutive, aucun carbonate alcalin n'apparaît, que ce soit dans les analyses chimiques ou en diffractométrie X.

Dans la saline carbonatée-sodique type de Liwa, la nappe phréatique présente une composition voisine :  $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- = 83,7\%$ ,  $\text{Cl}^- = 10,8\%$ ,  $\text{SO}_4^{2-} = 5,5\%$ . Le résultat final est cependant bien différent puisque seuls les carbonates alcalins cristallisent sous forme d'un mélange intime de *gaylussite nahcolite*, *trona* et *natron* (instable et rapidement transformé en *thermonatrite*) ; dans cette matrice carbonatée sodique, seuls quelques pourcents d'*halite* se retrouvent, mais jamais de sel sulfatés (*mirabilite* ou *thenardite*).

Dans ce type de saline, au niveau de la nappe fortement réductrice ( $Eh > -350$  mV) et dans le premier mètre du sédiment argileux qui la surmonte ( $Eh = -250$  mV ;  $\delta^{13}\text{C} = -20\%$  PDB)\* les phénomènes de réduction sulfato-bactériens sont responsables du blocage des ions  $\text{SO}_4^{2-}$  sous forme de sulfures métalliques et alcalins (couleur noire et odeur caractéristique d' $\text{H}_2\text{S}$  des argiles).

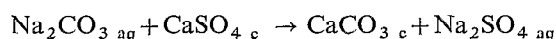
\* Nous remercions M.J. Ch. FONTES (Laboratoire de Géologie Dynamique de Paris) pour cette analyse isotopique.

1. L'hypothèse qui peut être avancée en premier est celle d'un gisement fossile mixte de thenardite et d'halite dans un horizon argileux lenticulaire (remplissage d'un ancien interdune), enfoui dans la dune de Napal.

Celle-ci est à exclure pour les raisons suivantes. D'une part, aucun gisement de ce type n'a été trouvé par les géologues travaillant sur les séries quaternaires ; d'autre part, étant donné la grande solubilité de ces sels ( $\text{NaCl} = 360 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$  ;  $\text{Na}_2\text{SO}_4 = 410 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$  à  $30^\circ\text{C}$ ), il aurait été rapidement remis en solution au cours des fluctuations à grande échelle du lac Tchad, notamment lors de l'élévation du plan d'eau à la cote 290 m.

Par ailleurs, rejeter la présence d'un éventuel gisement en profondeur et sa mise en place dans le passé laisse le problème entier ; au cours du Quaternaire récent, on est en droit de supposer une certaine pérennité du faciès chimique des eaux lacustres, par suite de celle des bassins versants soumis au lessivage et donc des apports fluviaux.

2. La seconde hypothèse, plus plausible selon nous, sans être le facteur génétique unique, fait appel à la réaction classique en Géochimie de Gedroitz et Hilgard ; réaction d'eaux bicarbonatées sodiques avec des sels sulfatés de faible solubilité (Gypse,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ) :



Bien que rejetant encore les « faits » en profondeur, cette explication génétique trouve des arguments dans la présence de séries argilo-gypseuses et dans des bancs gypseux massifs (« séries de Padelanga ») mis en évidence par SCHNEIDER (1966) dans la région de Beurkia. Dans la région de Bol, cependant, l'équivalent probable de cette série argileuse continue se trouverait à  $-70 \text{ m}^*$  et nous ignorons encore si elle est également gypsifère. Il faudrait également admettre d'importantes circulations ascendantes des eaux d'une nappe à l'autre par suite de mises en charges locales (ou régionale).

Toujours à Bol, notons que DIELEMAN et de RIDDER (1964) ont trouvé dans un même forage de grandes variations entre les faciès chimiques de deux nappes superposées et séparées par un horizon argilo-limoneux de 5 m de puissance ; à  $-50 \text{ m}$ , pour une conductivité de  $5\,650 \mu\text{mhos} \cdot \text{cm}^{-1}$ , la nappe inférieure est bicarbonatée calcique ; à  $-10 \text{ m}$ , le faciès de la nappe supérieure est sulfaté sodique, pour une conductivité de  $3\,660 \mu\text{mhos} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Des processus évaporatoires sont peu vraisemblables.

Dans certaines parties des polders de Bol qu'il qualifie de « drainé », CHEVERRY, (1968) signale l'individualisation de faible quantité de gypse, selon un mécanisme analogue à celui décrit dans les polders hollandais par ENTE (1964). Dans le cas présent, la réaction de Gedroitz et Hilgard explique la chute des teneurs en carbonates et bicarbonates et la montée de celle des sulfates ; les chlorures quant à eux, augmentent d'une manière relative dans la nappe, puis par évaporation dans les saumures affleurantes.

3. Comme nous l'avons souligné plus haut, la cause de cette anomalie n'est certainement pas unique. Il convient de noter le peu d'importance de la dénivelée interdunaire qui a eu, comme pour les lacs permanents du Kanem (MAGLIONE, 1969), une double conséquence :

a. Epaisseur réduite, voire nulle, du matériau argileux tapissant le fond de telles dépressions (d'où un milieu peu organique).

b. Bon drainage et bonne aération de tels milieux du fait de la dépression peu marquée de la nappe phréatique.

Ces deux caractéristiques réunies permettent ainsi l'installation d'un milieu de cristallisation non réducteur ; à la différence des salines carbonatées sodiques types, les ions  $\text{SO}_4^{2-}$  ne sont pas bloqués à l'état de sulfures et peuvent se concentrer ensuite sous l'influence de l'évaporation.

\* Communication orale de M. SERVANT qui doit effectuer l'étude sédimentologique des récents forages réalisés dans les polders de Tchingham, No et Soro.

Dans cette région, l'ouadi de Napal n'est pas un cas isolé ; d'autres ouadis présentent des paragenèses sulfatées sodiques exclusives (*mirabilite et thénardite*). Celui de Ngarangou par exemple, où la nappe contenue dans un aquifère argilo-limoneux (pour des conductivités s'échelonnant de 300 à plus de 45 000  $\mu\text{mhos}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), présente des potentiels d'oxydo-réduction témoignant de son caractère oxydant ( $+540 \text{ mV} < \text{Eh} < +570 \text{ mV}$ ). Dans les salines carbonatées sodiques par contre, toutes les eaux de l'aquifère argileux présentent un caractère réducteur accusé (zone D de la fig. 6).

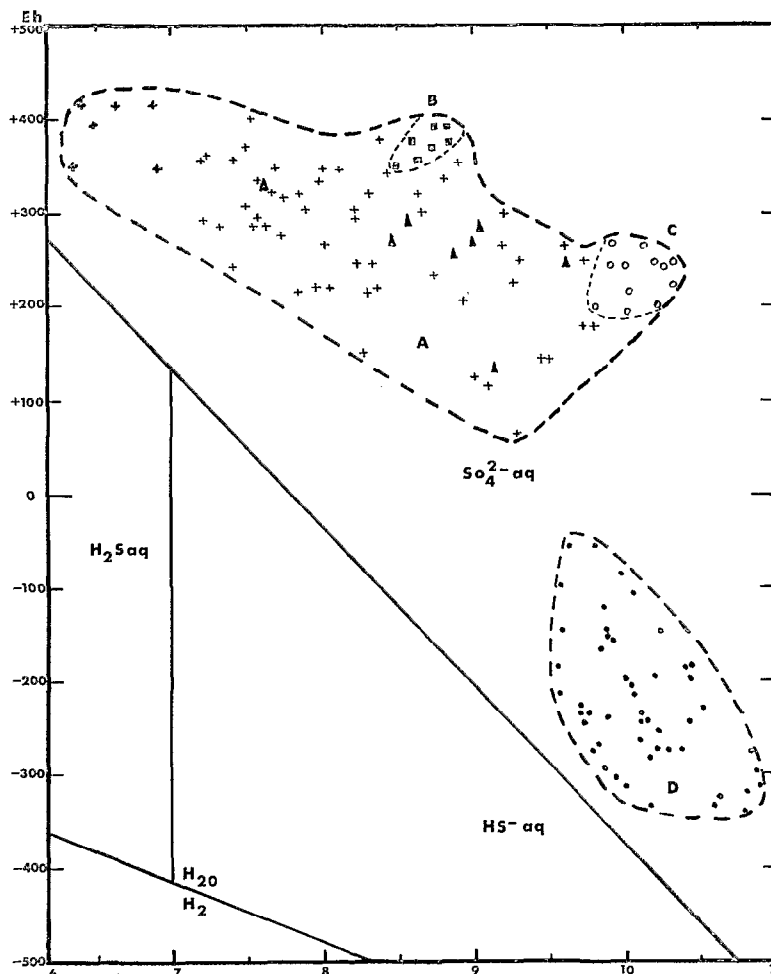


FIG. 6. — Diagramme Eh/pH des eaux de la nappe phréatique du Kanem.

La présence de milieux géochimiques, dont l'ouadi de Napal n'est qu'un exemple, s'explique en définitive par la convergence de plusieurs facteurs :

- a. Présence de sels « fossiles » sulfatés de faible solubilité,
- b. Rareté ou absence de matériaux argileux organiques permettant d'éventuels échanges de bases et la possibilité d'installation d'un milieu réducteur,

c. Dépression interdunaire peu marquée, d'où un *endoréisme hydrogéologique* peu accusé permettant une meilleure drainance et une meilleure oxygénation de la nappe et ainsi l'absence de phénomènes de réduction sulfatobactériens.

Tous ces facteurs ici réunis permettent ensuite la concentration des sulfates et des chlorures sous le jeu de l'évaporation, qu'elle soit directe ou de type capillaire.

#### INTÉRÊT COMMERCIAL. TONNAGE EXPLOITABLE

La présence de chlorure de sodium est d'un intérêt certain dans la région de l'Archipel du lac, notamment pour la salaison des poissons. La situation est d'autant plus favorable qu'en ramassant, en fin de saison sèche les trémies qui cristallisent en dernier lieu au-dessus de la dalle saline, les sauniers peuvent récolter du sel de grande pureté (*cf.* analyse K<sub>3</sub>, tableau II).

A ce titre, il nous a paru intéressant de tenter de fournir un chiffre sur le tonnage potentiellement exploitable en année moyenne. Pour cette évaluation, nous nous sommes basés sur les rendements potentiels à l'hectare déduits des chiffres fournis dans le rapport MOSRIN (1965), puis par la SONACOT, concernant l'ensemble de la production des salines du Kanem pour les quinze dernières années.

Pour les dix salines exploitées actuellement, ce chiffre est compris entre 175,7 et 197 t/ha de trona, selon que l'on tient compte des seules plaques cristallisant à partir des saumures affleurantes ou bien si on y inclue le « natron noduleux », résultat de l'évaporation capillaire.

Le chiffre que nous avons calculé par nos propres observations sur la saline de Liwa (campagne 1967-1968) est de 175,3 t/ha pour les plaques.

Dans la saline de Napal, seuls sont exploités les sels résultant de l'évaporation directe des saumures affleurantes ; aussi avons-nous retenu le chiffre de 175 t/ha, la tranche d'eau soumise à l'évaporation étant sensiblement la même.

Une correction a été apportée, relative aux différences de densité entre les sels qui cristallisent à Liwa (Trona : 1,78 ou 2,11 selon la littérature) et ceux présents à Napal (Halite et Thenardite : 2,16 et 2,70).

Nous avons considéré d'autre part qu'en fin de saison sèche, l'ensemble dalle saline et trémies était constitué de 50 % de Halite et de 50 % de Thenardite, soit une densité moyenne de 2,43.

Soit X<sub>L</sub>, le rendement potentiel pour la saline de Liwa ; d<sub>L</sub> la densité des sels de Liwa et d<sub>N</sub>, celle des sels de Napal, le rendement potentiel de la saline de Napal, X<sub>N</sub> sera :

$$\frac{X_L}{d_L} = \frac{X_N}{d_N}$$

$$\text{Soit } X_N = \frac{175 \times 2,43}{1,78} = 239 \text{ t/ha}$$

et

$$X_N = \frac{175 \times 2,43}{2,11} = 201 \text{ t/ha}$$

Nous arriverions donc à une production potentielle en 1969 pour l'hectare exploité comprise entre 200 et 240 tonnes.

Seule une étude plus précise pourrait permettre de déterminer quelle proportion représente le chlorure de sodium dans cette quantité globale.

## CONCLUSION

A l'issue de cette étude préliminaire, le milieu géochimique particulier de la saline de Napal a été décrit. Les facteurs génétiques à l'origine de l'installation dans ce type de cuvettes interdunaires de micro-milieus représentant autant d'anomalies géochimiques vis-à-vis du faciès régional carbonaté sodique du Kanem ont été précisés.

Leur existence n'est que la résultante de divers facteurs :

- dissolution de sels fossiles peu solubles,
- dénivelée peu accentuée de la cuvette interdunaire,
- drainage et aération efficaces de la nappe phréatique,
- absence de sédiments argilo-organiques, d'où impossibilité de développement d'un milieu sulfato-réducteur.

## BIBLIOGRAPHIE

- ABD-EL-MALEK (Y.), RIZK (S.J.), 1963. — Bacterial sulfate reduction and the development of alkalinity. *J. appl. Bacteriol.*, t. 26, pp. 7-26.
- ANONYME, 1967. — International source-book on irrigation and drainage of arid lands in relation to salinity and alkalinity, FAO/UNESCO, SS. 67/D.55/A, 663 p.
- CARMOUZE (J.P.), 1969. — Salure globale et spécifique dans le lac Tchad en 1968. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol.*, vol. III, n° 2, pp. 3-14.
- CARRELS (R.M.), CHRIST (C.L.), 1967. — Equilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses. *Monogr. de chimie minérale*, Paris, Gauthier-Villars, 355 p.
- CHEVERRY (C.), 1968. — Rôle original de la pédogenèse sur la nature et le mode de l'accumulation saline dans les polders de Bol. *Sci. du Sol*, n° 2, pp. 33-53.
- DIELEMAN (P.J.), de RIDDER (N.A.), 1964. — Studies of salt and water movement in the Bol-Guini polder (Chad Republic). Reprint from *J. Hydrol.*, vol. I, n° 4, pp. 311-343.
- DUPONT (B.), 1967. — Etude des formations sédimentaires du Kanem. Premiers résultats. *multigr.* Centre ORSTOM, Fort-Lamy, 150 p.
- ENTE (P.J.), 1964. — Initial decalcification due to oxydation of sulphides in young marine soils in the Netherlands. 8th international. *congr. Soil Sci.*, Bucharest, Romania, pp. 779-782.
- FAURE (H.), 1966. — Evolution des grands lacs sahariens à l'Holocène. *Quaternaria*, Roma, VIII, pp. 167-175.
- FONTES (J. Ch.), MAGLIONE (G.), ROCHE (M.A.), 1969. — Données isotopiques préliminaires sur les rapports du lac Tchad avec les nappes de la bordure nord-est. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol.*, vol. VI, n° 1, pp. 17-34.
- FONTES (J. Ch.), MAGLIONE (G.), ROCHE (M.A.), 1969. — Eléments d'hydrologie isotopique dans le bassin du lac Tchad. Communication présentée au Colloque de l'OUA sur les utilisations pacifiques de l'énergie atomique. Kinshasa, 28 juillet, 1<sup>er</sup> août.
- GEDROITZ (K. K.), 1928. — Solonetz soils, their origin, properties and how to improve them. Nosovsk Agric. Exp. Station.
- HILGARD (E.W.), 1906. — Soils ; their formation, properties, composition and relations to climate and plant growth on the um and arid regions. Mac Millan. New York.
- MAGLIONE (G.), 1968. — Présence de gaylussite et de trona dans les natronières du Kanem (pourtour nord-est du lac Tchad). *Bull. Soc. fr. Minéral. Cristallogr.*, 91, pp. 388-395.
- MAGLIONE (G.), 1969. — Premières données sur le régime hydrogéochimique des lacs permanents du Kanem. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol.*, vol. III, n° 1, pp. 121-141.
- MILLOT (G.), 1963. — Géologie des Argiles. Masson. Paris, 499 p.
- MOSRIN (L.), 1965. — Rapport sur la production et la commercialisation du Natron. Ministère de l'Economie et des Transports, JN/on -10-3-1965, Fort-Lamy.
- PERELMAN (A.I.), 1967. — Geochemistry of epigenesis. *Monogr. in Geoscience*, Plenum Press, 266 p.
- POUGET (M.), 1968. — Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le sud Tunisien. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 3-4, pp. 309-366.
- PONS (L.J.), ZONNEVELD (I.S.), 1965. — Soil ripening and soil classification. Issued by International Institute for Land Reclamation and improvement, publication 13, 128 p.
- RICHARDS (L.A.) et al., 1954. — Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA. Agriculture Handbook, n° 60.
- SCHNEIDER (J.L.), 1966. — Rapport de synthèse de la carte hydrogéologique de la République du Tchad à 1/500 000. Feuilles de Mao et Fort-Lamy. BRGM LAM. 66. A 346, 47 p.