

CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE DU BASSIN TCHADIEN

G. MAGLIONE

**LE GISEMENT CHLORO-SULFATÉ SODIQUE
DE L'ILE DE NAPAL
(ARCHIPEL DU LAC TCHAD)**

A paraître dans les Cahiers ORSTOM

Série Géologie

JANVIER 1970

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

CENTRE DE FORT-LAMY



LE GISEMENT CHLORO-SULFATE SODIQUE
DE L'ILE DE NAPAL
(Archipel du Lac Tchad)

Par

Gilbert MAGLIONE

Section Géologie

Janvier 1970.

Résumé.

Deux précédentes notes ont permis de préciser le faciès géochimique régional des paragéneses 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 (denivelée 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.

Introduction.

Le gisement de sel connu sous le vocable "sel de Kagalom" 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 trémies isolées cubiques 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).

I. Situation géographique. (fig. 1)

L'ouadi de Napal est situé à 30 km au S.E. du village de Bol, dans la zone du Lac que géographes et géologues travaillant dans ces régions depuis le début du siècle ont dénommé "Archipel"; ses coordonnées sont 13°18' de latitude nord et 14°58' de longitude est. L'archipel correspond à un ancien système dunaire, maintenant fixé, orienté NNW - SSE, dont les creux interdunaires sont occupés par les eaux de l'actuel lac Tchad et dont 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 < 5 à 6 m) dont l'assèchement ou la mise en eau par affleurement de la nappe phréatique contenue dans l'erg est commandée par les fluctuations annuelles et interannuelles 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 à la fois morphologique et hydrogéologique, peu marquée voire nulle qui est le facteur déterminant de la dynamique des sels solubles de la nappe phréatique et dont le rôle a déjà été défini par ailleurs (MAGLIONE, 1969).

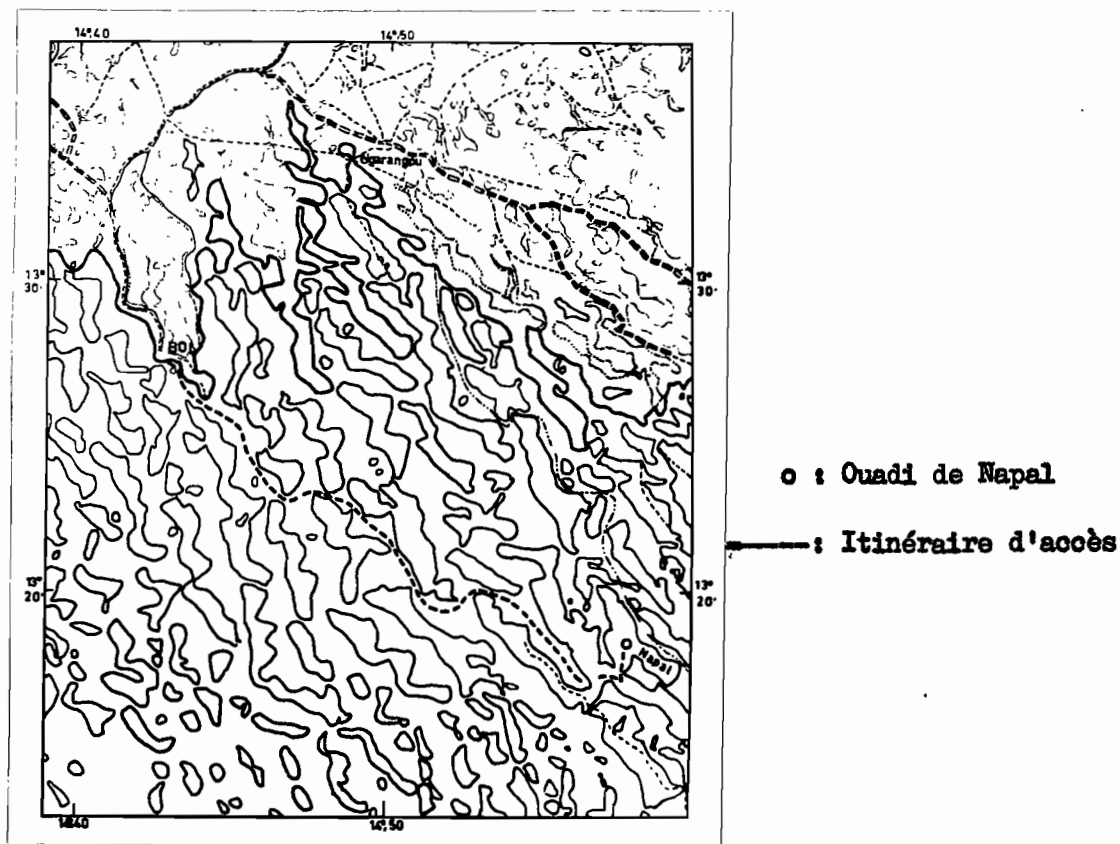


Fig. 1. Carte de situation.

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

II. Analyses chimiques, diffractométriques X.

I.I. Sur le terrain et "in situ", pH et Eh ont été mesurés à l'aide d'un pH mètre millivoltmètre Tacussel portatif à piles P 50; le pH est mesuré au 1/10 ème 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 est directe à 25°C en micromhos. cm^{-1} .

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_3^{2-} , HCO_3^- et Cl^- sont dosés par potentiométrie (appareil Metrohm E 436), SO_4^{2-} par complexométrie; les alcalino-terreux sont dosés par complexométrie, les alcalins par photométrie de flamme, SiO_2 soluble (faiblement polymérisée) par spectrophotométrie.

Les sels cristallisés, déshydratés 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 tapisant 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.

1.2. Les analyses diffractométriques aux rayons X ont été menées au Laboratoire de Diffractométrie X des C.S.T. du B.R.G.M. à Orléans sous la direction de M. JACOB Ch. et lors d'une mission en Hollande par nous-mêmes au Laboratoire Vening-Meinez de Géochimie de l'Université d'Utrecht, sous la direction du Prof. SCHULLING R.D.

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

Dans les deux cas l'appareil utilisé a été ^{un} Diffractomètre Philips P.W. 1120 avec longueur d'onde K_{α} 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 déshydratation par échauffement, vis à vis de laquelle ces minéraux salins sont particulièrement sensibles; le passage des formes décahydratées à des formes anhydres pour les carbonates et sulfates alcalins s'opère en effet à des températures voisines de 32°C.

2. 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.

La fig. 2 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 ~~the~~thenardite.

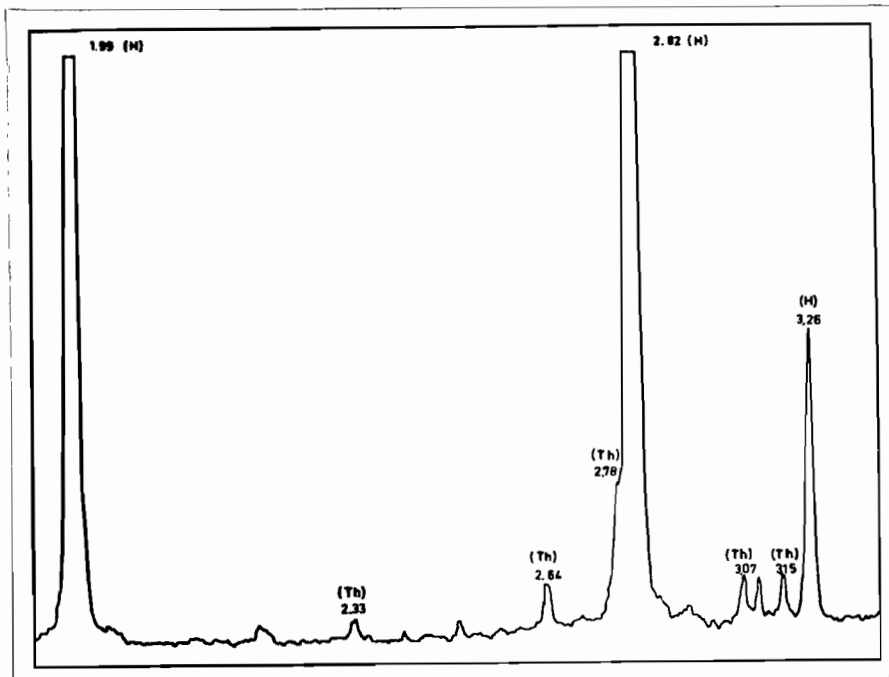


Fig. 2. Diffractogramme X de la dalle saline.

2.1. 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^+ ($1,68 \text{ me. l}^{-1}$) par rapport au Ca^{2+} ($1,06 \text{ me. l}^{-1}$); 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 uniquement 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 $\frac{\Delta C_x}{C_x}$ (CARMOUZE J.P., 1968) avec ΔC_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.

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

2.1.1. La concentration de l'ion 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.

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 sols cristallisés. Entre le sédiment et la dalle saline la concentration de l'ion Ca^{2+} augmente de

+ 33,00; elle n'est plus que de + 1,35 entre cette dalle et les cristaux de sel gemme.

Ces variations, positives ou négatives, ne peuvent pas s'expliquer par le 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.

La concentration de l'ion 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 K^+ suit une évolution analogue à celle du 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 (+ 116,50). Son comportement dans la phase solide est par contre plus difficile à cerner.

2.1.2. Très différente se trouve être l'évolution des anions Cl^- , SO_4^{2-} d'une part et $CO_3^{2-} + HCO_3^-$ 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 eux, 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. 3) que nous avons pu établir à partir d'eaux lacustres du rivage nord-est du lac Tchad, moyennement concentrées (conductivité de départ : 1.000 μ mhos.) montrent qu'aux températures auxquelles sont soumises les eaux libres affleurantes (entre 30° et 40°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. (CARRELS et CHRIST, 1967; POUGET, 1968).

Par la suite, entre l'eau de la nappe et les saumures, les teneurs en Cl^- et SO_4^{2-} n'augmentent que très 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 (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 eux 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).

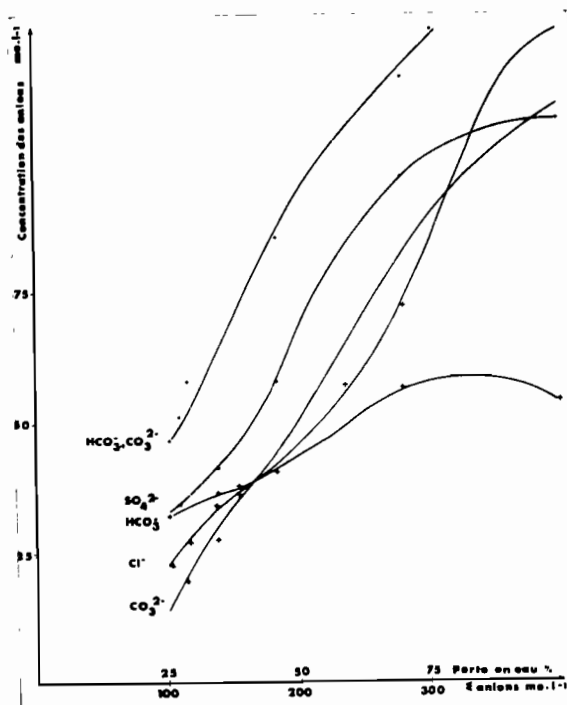


Fig.3. Variation de la concentration des anions en fonction de la concentration anionique totale.

2.2. 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 sel récoltés par les sauniers, dalle saline et trémies de sel gemme.

L'échantillon 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 Na^+ , de SO_4^{2-} , de Cl^- tandis que carbonates, bicarbonates et alcalino-terreux sont pratiquement absents.

La dalle saline 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 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 ($SO_4^{2-} = 60 \%$; $Cl^- = 5,71 \%$).

Les trémies, 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 K_2 (fig. 2) fait apparaître clairement le mélange thénardite + halite.

III. Hypothèses génétiques en présence.

L'ouadi de Napal présente toutes les caractéristiques des eaux se concentrant en milieu subdésertique que PEREL'MAN (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 capillaires.

Les eaux de départ présentent en milliequivalents les pourcentages suivants : $CO_3^{2-} + HCO_3^- = 88 \%$, $Cl^- = 6,5 \%$, $SO_4^{2-} = 5,5 \%$. 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 sels sulfatés (mirabilite ou thenardite). Dans ce type de saline, au niveau de la nappe fortement réductrice ($E_h \gg -350 \text{ mV}$) et dans le premier mètre du sédiment argileux qui la surmonte ($E_h = -250 \text{ mV}$; $\delta^{13}\text{C} = -20 \text{ ‰ PDB}$ *) les phénomènes de réduction sulfato-bactériens sont responsables du blocage des ions SO_4^{2-} sous forme de sulfures alcalins (couleur noire et odeur caractéristique d' H_2S des argiles).

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 exclue 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 ($\text{NaCl} = 360 \text{ g. l}^{-1}$; $\text{Na}_2\text{SO}_4 = 410 \text{ g. l}^{-1}$ à 30°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 côte 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

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

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, $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) :

$$\text{Na}_2 \text{CO}_3 \text{ aq} + \text{Ca SO}_4 \text{ s} \longrightarrow \text{CaCO}_3 \text{ s} + \text{Na}_2 \text{SO}_4 \text{ aq} .$$

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") mises 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 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 charge 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 m, pour une conductivité de $5.650 \mu\text{mhos. cm}^{-1}$, la nappe inférieure est bicarbonatée calcique; à - 10 m, le faciès de la nappe supérieure est sulfaté sodique, pour une conductivité de $3.660 \mu\text{mhos. cm}^{-1}$. 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 processus analogue à celui décrit dans les polders hollandais par ENTE (1964). Dans le cas présent, la réaction de GEDROITZ

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

et HILGARD explique la chute des teneurs en carbonates et bicarbonates et la montée de celle des sulfates; les chlorures quand à eux, augmente 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 :

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

- .. bon drainage et bonne aération de tels milieux du fait de l'"endoréisme hydrogéologique" peu marqué 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 SO_4^{2-} se sont pas bloqués à l'état de sulfures et peuvent se concentrer ensuite sous l'influence de l'évaporation.

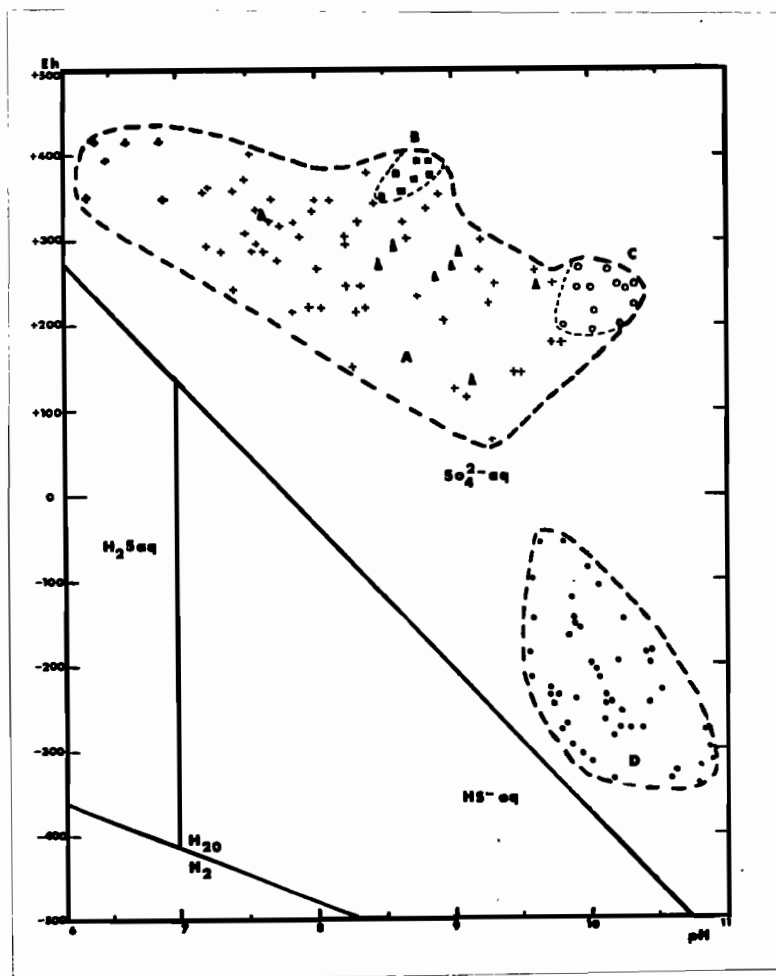
Dans cette région, l'ouadi de Napal n'est pas un cas isolé; d'autres ouadis présentent des paragenèses sulfatées sodiques exclusives (mirabilite et thenardite). Celui de Ngarangou par exemple où la nappe contenue dans un aquifère argilo-limoneux (pour des conductivités s'échelonnant de 300 à plus de 45.000 $\mu\text{mhos. cm}^{-1}$), présente des potentiels d'oxydo-réduction témoignant de son caractère oxydant (+ 540 mV $< Eh < + 570$ 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. 4).

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 :

- . présence de sels "fossiles" sulfatés de faible solubilité,
- .. rareté ou absence de matériaux argileux organiques permettant d'éventuels échanges de bases et la possibilité d'installation d'un milieu réducteur,

- ... dépression interdunaire peu marquée, d'où un "endorémisme hydrogéologique" peu accusé permettant une meilleure drainance et une meilleure oxygénation de la nappe et ainsi l'absence de phénomènes de réduction sulfato-bactérienne.

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.



- A - ▲ : Lac Tchad.
- + : Nappe phréatique de l'erg (aquifère sableux).
- B - ■ : Lacs permanents de faible salure.
- C - o : Lacs permanents de forte salure.
- D - ● : Nappe phréatique des salins (aquifère argileux).

Fig. 4. Diagramme Eh/pH des eaux de la nappe phréatique du Kanem.

IV. 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~~ ^{trémies} qui cristallisent en dernier lieu au dessus de la dalle saline, les sauniers peuvent récolter du sel de grande pureté (cf. analyse K_3 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_L , le rendement potentiel pour la saline de Liwa; d_L , la densité des sels de Liwa et d_N , celle des sels de Napal, le rendement potentiel de la saline de Napal, X_N sera :

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

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

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

Nous arriverions donc à une production potentielle en année moyenne pour la partie exploitée 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 micromilieux 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.

B I B L I O G R A P H I E

- ABD-EL MALEK, Y. et RIZK, S.J. (1963). - Bacterial sulfate reduction and the development of alkalinity. Journ. of Applied Bacteriology, 1963, t. 26, 7 - 26 .
- ANONYME. (1967). - International source-book on irrigation and drainage of arid lands in relation to salinity and alkalinity, FAO/UNESCO, 1967, SS. 67/D.55/A, 663 p.
- CARMOUZE, J.P. (1969). - Salure globale et spécifique dans le lac Tchad en 1968. A paraître Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrobiol. Rapp. Centre O.R.S.T.O.M. Fort-Lamy, 16 p., 6 fig.
- CHEVERRY, C. (1968). - Rôle original de la pédogénèse sur la nature et le mode de l'accumulation saline dans les polders de Bol. Science du Sol, n° 2, 1968, 33 - 53.
- (1968). - Commentaires sur la pédogénèse actuelle des sols jeunes, dans les polders de Bol, du point de vue de l'halomorphie. Rapp. Centre O.R.S.T.O.M. Fort-Lamy, 13 p., 2 fig., 2 tabl.
- DIELEMAN, P.J. et de RIDDER, N.A. (1964). - Studies of salt and water movment in the Bol-Guini polder (Chad Republic). Reprint from journal of Hydrology, vol. I n° 4, 311-343.
- DUPONT, B. (1967). - Etude des formations sédimentaires du Kanem. Premiers résultats. Rapp. Centre O.R.S.T.O.M. Fort-Lamy, 150 p.

- ENTE, P.J. (1964). - Initial decalcification due to oxydation of sulphides in young marine soils in the Netherlands. 8th intern. congress of Soil Science, Bucharest, Romania, 1964., 779 - 782.
- FAURE, H. (1966). - Evolution des grands lacs sahariens à l'Holocène-Quaternaria, VIII, Roma, 1966., 167-175.
- FONTES, J.Ch., MAGLIONE, G. et ROCHE, M.A. (1969). - Données isotopiques préliminaires sur les rapports du lac Tchad avec les nappes de la bordure nord-est. Cah. O.R.S.T.O.M. sér. Hydrol., vol VI, n° 1, 1969.
- FONTES, J.Ch., MAGLIONE, G. et ROCHE, M.A. - Eléments d'hydrologie isotopique dans le bassin du lac Tchad. Communication présentée au Colloque de l'O.U.A. sur les utilisations pacifiques de l'énergie atomique. Kinshasa, 28 Juillet-1er Août 1969.
- CARRELS, RM. et CHRIST, C.L. (1967). - Equilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses. Monographies de chimie Minérale, Paris, Gauthier-Villars, 1967, 355 p.
- GEDROITZ, K.K. (1928). - Solonetz soils, their origin, properties and how to improve them. Nosovsk Agric. Exp. Station, 1928.
- HILGARD, E.W. (1906). - Soils; their formation, properties, composition and relations to climate and plant growth on the humid and arid regions. Mac Millan. New. York, 1906.

- 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., (1968), 91, 388 - 395.
- (1969). - Nouvelles données sur le régime hydrogéochimique des lacs permanents du Kanem. Cah. O.R.S.T. O.M., ser. Hydrobiol., vol III, n° 1, 1969, 121-141.
- MILLOT, G. (1963). - Géologie des Argiles. Masson. Paris, 1963, 499 p.
- MOSRIN, (1965). - Rapport sur la production et la commercialisation du Natron. Ministère de l'Economie et des Transports, JN/on - 10-3-1965, Fort-Lamy.
- PELELMAN, A.I. (1967). - Geochemistry of epigenesis. Monographs 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. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., vol VI n° 3-4 1968, 309 - 366.
- PONS, L.J. et 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. U.S.D.A. Agriculture Handbook, n° 60.

SCNEIDER, J.L. (1966). - Rapport de synthèse de la carte hydrogéologique de la République du Tchad au 1/500.000 ème. Feuilles de Mao et Fort-Lamy. B.R.G.M. LAM. 66. A 3⁴⁶, 47 p.

T A B L E A U X

N°	pH	Eh mV	C 25°C μmhos	R.S. mg/l	SiO ₂ mg/l	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	S ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	S ⁻
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	2,50	31,80	153,00
3	9,3	+ 400	149.000	287.870	60,0	17,10	6,90	4.120,0	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	6.000,0	470,00	6.480	4.200	1.500	565,00	268,00	6.470

Tableau I. Résultats d'analyses hydrochimique en me.l⁻¹.

(1) E.40 : Eau du lac Tchad, rivage NE de Napal. (2) E.41 : Eau de la nappe phréatique, flanc sud-est de l'ouadi

(3) E.42 : Saumure, bord est de l'ouadi.

(4) E.43 : Saumure surmontant les trémies de halite.

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

Tableau II. Résultats d'analyses chimiques des sels cristallisés et des sels solubles des sédiments en g/100 g de sel ou de sédiment sec.

K₁ : argile du flanc de l'ouadi.

K₂ : Dalle saline, tapissant le fond de l'ouadi.

K₃ : Trémies de sel gemme.

N°	$\frac{Mg}{Ca}$	$\frac{Na}{Ca}$	$\frac{Na + K}{Ca}$	$\frac{SO_4}{Cl}$	$\frac{CO_3 + HCO_3}{Cl}$	$\frac{CO_3 + HCO_3}{SO_4}$	S.A.R.	TH	TA	TN
E 40	0,88	1,58	1,91	0,84	13,6	16,13	1,69	10	17,75	8,85
E 41	1,06	10,00	10,32	1,72	0,78	0,46	1,40	128,0	171,50	422,0
E 42	0,40	240,93	257,89	0,32	0,14	0,44	4,93	120,0	2.140	7.050
E 43	2,17	2142,85	2310,71	0,35	0,18	0,51	0,41	44,5	3.865	11.350
K ₃	0,12	415,00	417,50	0,02	0,01	0,42	-	0,225	0,85	1,50
K ₂	2,2	776,47	782,35	7,76	0,16	0,02	-	0,275	1,35	58,50
K ₁	0,15	13,66	14,20	1,30	0,08	0,06	-	2,25	1,10	14,70

Tableau III. Rapports ioniques caractéristiques des eaux, sels et sédiments de l'ouadi de Napal (calculés à partir des résultats en me. l⁻¹).

S.A.R. = Sodium Adsorption Ratio = $\frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$, d'après Richards (1954)

$$\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}$$

TH = 5 (Ca + Mg) = Titre hydrotimétrique

TA = 5 (CO₃ + HCO₃) = Titre alcalimétrique

TN = 5 (Na + K-Cl) = " natronique, d'après Delecourt (1946).

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻
E 40-E 41	+ 10,70	+ 13,04	+ 72,81	+ 10,43	+ 166,70	+ 340,36	+ 3,63	+ 9,56
E 41-E 42	+ 0,38	- 0,48	+ 32,22	+ 71,50	+ 67,81	+ 11,78	+115,40	+ 3,30
E 41-E 43	- 3,31	- 0,54	+ 47,39	+116,50	+ 95,33	+ 18,97	+225,00	+ 5,54
K ₁ - K ₂	+ 33,00	-	+252,33	+ 38,00	+ 62,44	+ 374,00	-	+164,00
K ₂ - K ₃	+ 1,35	- 0,87	+ 0,26	-	+ 9,18	- 0,97	-	-0,37

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