

GEOCHIMIE ET MECANISMES DE MISE EN PLACE ACTUELLE DES EVAPORITES DANS LE BASSIN TCHADIEN *

par G. MAGLIONE **

RESUME

Bassin continental endoréique, la cuvette tchadienne est actuellement le siège d'une sédimentation salifère qui affecte les interdunes du pourtour septentrional du lac Tchad.

Le faciès chimique régional des eaux (lac, nappes phréatiques), le confinement du milieu interdunaire sont à l'origine d'un paragenèse carbonatée et silicatée sodiques.

A l'échelle annuelle un équilibre hydrique et salin existe entre les apports et les pertes du lac Tchad. Le contrôle de la régulation saline des eaux lacustres est ainsi assuré par une sédimentation biochimique dans le lac lui-même, par une augmentation de la minéralisation des nappes bordières et enfin par le dépôt des évaporites dans les interdunes.

ABSTRACT

Continental and closed, Chad basin is now in a period of evaporitic sedimentation in the interdunary depressions of the northeastern edge of Chad lake.

The hydrochemical environment bring out a zonation of evaporitic deposits, mainly composed by sodium carbonates and sodium silicates minerals.

Annually, an hydric and saline equilibrium exists between the contributions and the losses of Chad lake.

Saline regulation is secured by biochimic sedimentation in the lake itself, by increase of the mineralization of the ground waters surrounding the lake and by evaporitic sedimentation in the interdunary depressions.

* Résumé d'une thèse de Doctorat d'Etat-ès-Sciences soutenue devant **28 MARS 1975**
l'Université de Paris VI le 4 février 1974.

** Laboratoire de Géochimie, Centre ORSTOM, B.P. 1386, DAKAR-HANN, Sénégal.

O. R. S. T. O. M. **EX 1**
Collection de Référence
n° B7455 Geol.

I - Introduction

La nécessité de conditions climatiques très rigoureuses cantonne les bassins évaporatoires actuels dans les zones géographiques à climat aride où l'évaporation l'emporte sur les apports (pluies, fleuves ...).

Sans en faire une revue exhaustive, on peut citer le "Great Basin" sur la côte ouest des Etats-Unis, région comprise entre la Sierra Nevada et les Monts Wasatch. En Amérique du Sud, la région des "salars" avec les lacs Titicaca et Popo, zone endoréique située entre la Cordillère des Andes et les cordillères internes.

En Russie, le Golfe du Kara-Bogaz, un des plus connus, mais également le bassin de la Mer d'Aral au Sud de l'Oural.

En Afrique, les nombreux bassins clos salifères du Rift Est-africain : lacs Natron en Tanzanie, Magadi au Kenya,

Mais c'est sans doute le bassin du lac Tchad qui, par sa taille et ses caractéristiques, représente encore le meilleur *modèle actuel* si précieux pour les géologues dans leurs reconstitutions paléogéographiques. Nous y insisterons quelque peu et d'autant plus qu'il vient de faire l'objet d'une série de travaux multidisciplinaires de la part des chercheurs de l'O.R.S.T.O.M.

Commencée en 1966, cette étude s'est achevée en 1973 pour la majorité des disciplines mises en jeu, mais se continue encore pour d'autres. Elle a été réalisée par une équipe de 10 chercheurs basée à N'DJAMENA et comprenant quatre géologues, un géochimiste, deux hydrologues, deux hydrochimistes et un pédologue.

II - Généralités (fig. 1)

La cuvette tchadienne est un bassin purement continental, sans exutoire externe sous réserve d'écoulements temporaires, saisonniers vers le bassin du Niger et l'océan par l'intermédiaire de la rivière Bénoué.

L'objectif de l'équipe relevait de la Géodynamique externe : étudier sur un axe partant de la bordure amont du bassin (massifs précambriens du Nord de la République Centrafricaine) vers l'aval (lac Tchad), la migration des particules solides et des substances dissoutes.

Les vecteurs actuels du transport sont assurés à 95 % par les fleuves Chari et Logone.

L'axe géographique d'étude correspondait donc à un *gradient topographique* : migrations de l'amont vers l'aval selon le tryptique altération/

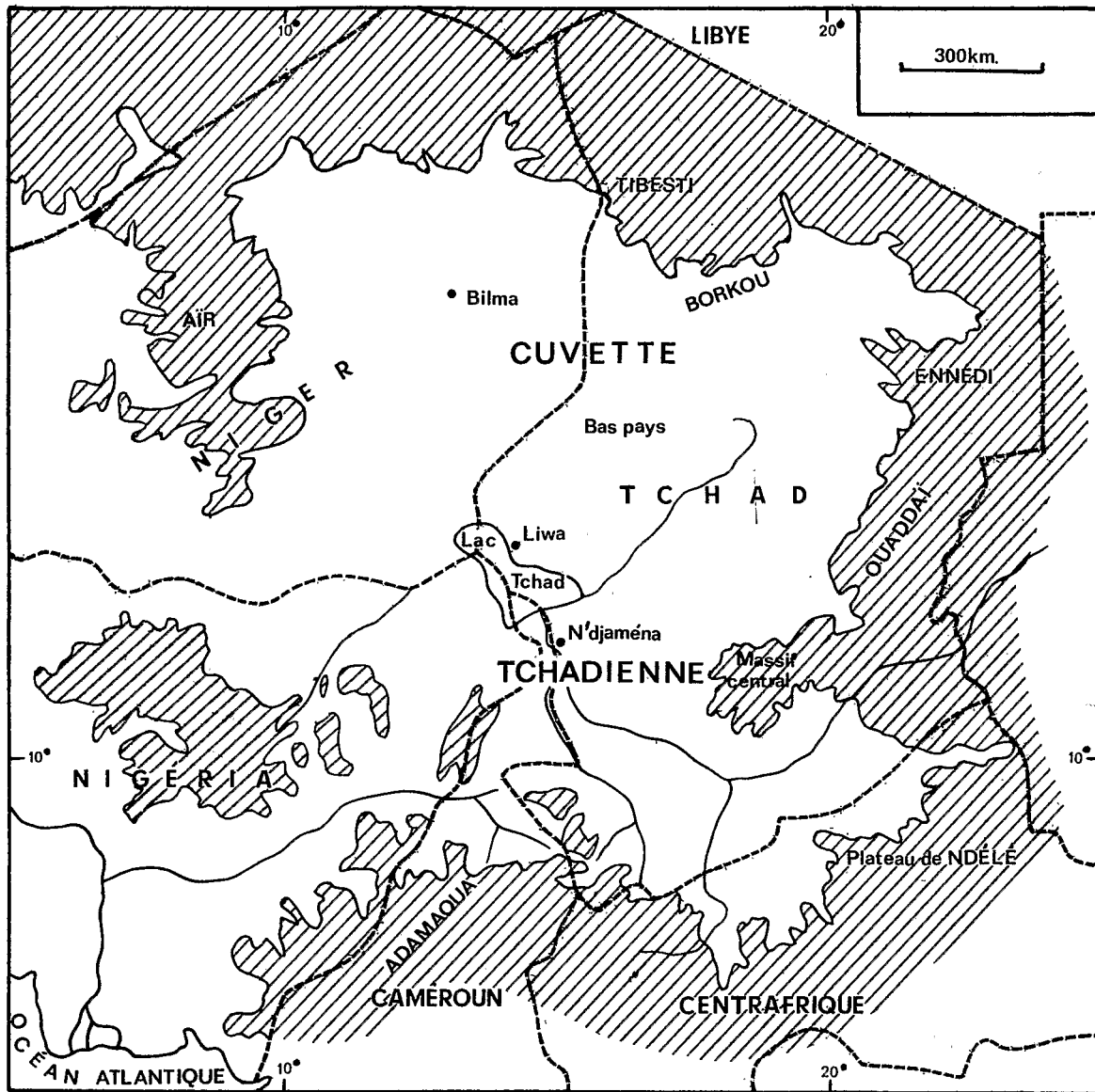


Figure 1. Carte de situation du bassin tchadien

érosion-transport-sédimentation, mais également à un *gradient climatique* : migration depuis les zones humides, milieux "lessivants" vers les zones de sédimentation mécanique et chimique sous climat subaride, milieux fortement évaporatoires et "confinants". D'où une accentuation du contraste entre le milieu d'altération et celui de sédimentation.

La cuvette tchadienne se présente comme un vaste bassin endoréique de 2 400 000 km². Ses grands traits morphologiques actuels sont pour l'essentiel le résultat des alternances climatiques du Quaternaire. Au Sud, succédant aux massifs précambriens de RCA, les grandes plaines d'inondation correspondent à des zones d'épandage deltaïques et fluviolacustres, mises en place durant des périodes "pluviales". Au Nord du 13° parallèle, l'erg fixé du Kanem témoigne d'une ancienne période climatique aride (1).

Orientées NNW-SSE, les dépressions interdunaires de cet erg ont piégé des sédiments fins constitués d'argile et de diatomites, lors d'une phase d'expansion du lac Tchad au cours de l'Holocène (≈ 6 000 ans B.P.) qui couvrit jusqu'à 350 000 km².

Le lac Tchad actuel constitue le réceptacle visible des tributaires qui drainent le bassin. Il faut toutefois préciser qu'il n'en occupe pas la partie la plus déprimée. Cette dernière, sous le nom de "Pays-Bas", se situe à 500 km au NE du lac, à une altitude de 170 m. C'est l'envoyage des cordons dunaires dans le lac qui fait obstacle à l'écoulement des eaux vers cette région par l'intermédiaire d'un exutoire fossile, le Baïr-el-Ghazal.

III - Contexte hydrologique

Les études des hydrologues (2) nous ont appris qu'en année moyenne le Chari (gros du Logone à N'Djamena), principal tributaire, apportait 40 milliards de m³ d'eau au lac Tchad véhiculant 2 millions de tonnes de sels (essentiellement des carbonates alcalino-terreux) et 1 million de tonnes de silice dissoute.

En année moyenne, le lac Tchad couvre une superficie d'environ 20 000 km², son altitude oscille entre 280 et 282 m ; sa profondeur moyenne est de 3,4 m, son volume d'environ 68 milliards de m³.

Des études hydrogéologiques (3) ont montré que l'étendue lacustre, avec une altitude de 282 m représente un point haut dans le système hydrologique. Notamment sur sa bordure septentrionale, le lac est ceinturé à quelques kilomètres de ses rives par une "gouttière drainante", dont le point le plus bas est à 275 m, soit 5 à 7 m en dessous du niveau moyen actuel du lac.

Le lac Tchad ne représente en fait qu'un lieu de transit pour les

eaux et pour la plus grande partie des sels solubles qu'il reçoit par les fleuves. Il convient donc de le considérer comme un lac ouvert, "seepage lake" des auteurs anglo-saxons. Très peu salé (moins de 300 mg/l, pas plus qu'une eau minérale de table), le contrôle de sa régulation saline à l'échelle interannuelle a longtemps rendu perplexes les chercheurs qui s'intéressaient à ce problème.

Il est en partie résolu maintenant. Diverses estimations [(2), (4)], réalisées à partir des bilans hydrique et salin du lac, ont en effet permis d'évaluer les pertes par évaporation à 92,5 % et celles par infiltration à 7,5 % des apports liquides annuels totaux (fleuves et pluies). Pour l'essentiel, les pertes par infiltration se réalisent sur le rivage nord-est du lac, précisément là où les dépressions interdunaires sont actuellement le siège d'une sédimentation évaporitique.

IV. Contexte climatique

Le climat qui affecte la région, de type subdésertique, se caractérise par l'alternance d'une longue saison sèche et d'une courte saison des pluies (300 mm entre juillet et septembre), des températures élevées (28°C de moyenne annuelle), une très grande sécheresse de l'air (36 % d'humidité moyenne annuelle). L'évapotranspiration est très élevée, 2.200 mm/an.

La caractéristique à retenir est donc celle d'un *déficit pluviométrique* très accusé.

V. Contexte morphologique

La disposition des dépressions interdunaires par rapport à la surface de la nappe d'eau souterraine (phréatique) constitue le *facteur déterminant* de la dynamique des sels dissous de la nappe.

Les dépressions profondes recourent la surface de la nappe et conduisent à l'affleurement d'un lac interdunaire. On en compte plusieurs centaines dans la région du Kanem qui borde le lac Tchad.

Dans chacune d'elles, la dénivelée de l'interdune et l'évaporation différentielle entre les flancs sableux dunaires (très faible) et la surface d'eau libre lacustre (très intense) empêchent l'évacuation des sels.

L'existence de ces lacs interdunaires (de 1 à 2 km de long sur moins de 1 km de large) est commandée par les variations interannuelles du niveau du lac Tchad. En période de baisse de ce dernier, consécutive à une pluviosité

déficitaire comme c'est le cas depuis ces quatre dernières années, ils s'assèchent. Les sels dissous cristallisent alors sous une faible tranche d'eau, *de haut en bas et de l'extérieur vers l'intérieur de la cuvette.*

Dans le cas d'un interdune moins profond, la nappe phréatique est rejetée à une profondeur plus ou moins grande. Lorsque la nappe est subaffleurante (moins de 3 m), la finesse des sédiments argileux permet l'installation d'un régime évaporatoire de type capillaire. Les sels de la nappe cristalliseront de *bas en haut*, au sein même du sédiment et à la surface du sol sous forme d'efflorescences.

VI - Géochimie

Les eaux du Chari sont bicarbonatées calci-sodiques, faiblement minéralisées (50 mg/l). Le lac Tchad va agir comme bassin de préconcentration. Du Sud vers le Nord, les eaux se concentrent par évaporation ; sur les rives septentrionales, elles sont de 10 à 15 fois plus chargées qu'à leur débouché dans le delta du Chari.

En dehors de cette évolution quantitative, le lac est également le siège de changements qualitatifs par l'intermédiaire d'une sédimentation chimique et biochimique. En prenant l'ion sodium (le plus inerte) comme traceur, on s'aperçoit que seulement 16,40, 46, 56, et 64 % des apports annuels respectivement en silice, calcium, magnésium, bicarbonate et potassium sont évacués du lac Tchad. Celui-ci agit donc comme bassin de *préconcentration*, mais également de *délestage* pour un certain nombre de sels [(2), (4)].

Sur le rivage septentrional du lac Tchad, lieu d'infiltration vers la "gouttière drainante", les eaux lacustres ont déjà acquis un faciès *bicarbonaté-carbonaté sodique*. Ce dernier ira s'accroissant tout au long du cheminement des eaux dans l'aquifère dunaire.

Dans les interdunes, les eaux se concentrent selon deux voies :

- par évaporation directe dans les lacs interdunaires,
- par évaporation capillaire dans le cas d'une nappe subaffleurante.

Le premier cas conduira à une zonation saline latérale, les sels se disposant en auréoles plus ou moins concentriques, les plus solubles occupant la partie centrale. Cette zonation se réalisera par la cristallisation des sels à partir des saumures lors de l'assèchement des lacs interdunaires. On parlera alors de paragenèse *syngénétique*.

Le deuxième cas livrera une zonation saline à la fois latérale et verticale, au sein du sédiment, par remontées capillaires. La paragenèse sera de type *diagénétique précoce*.

Dans un même interdune, il est intéressant de noter que les deux mécanismes ont joué à plusieurs reprises. Ils se sont relayés dans le temps, en réponse aux fluctuations de niveau du lac Tchad au cours des douze derniers millénaires. Ce que le géologue observe aujourd'hui dans les profils n'est que la *résultante de ces deux mécanismes*.

Dans les deux cas la paragenèse est identique, constituée en majorité de sels carbonatés alcalins tels la gaylussite, $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$, la nahcolite, NaHCO_3 , le natron, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$, la thermonatrite, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, le trona, $\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ auxquels se mêlent un peu de halite, NaCl et de gypse, $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$. Cependant les deux mécanismes donnent naissance à deux générations d'individus minéralogiques qu'il est possible de distinguer dans les profils.

En plus des sels évaporitiques proprement dit, il convient de signaler la néoformation de silicates comme la mordénite, la magadiite ($\text{NaSi}_7\text{O}_{13}(\text{OH})_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$), la kenyaite ($\text{NaSi}_{11}\text{O}_{20,5}(\text{OH})_4 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$) et enfin la kanemite ($\text{Na}(\text{Si}_2\text{O}_4(\text{OH})_2) \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), nouvelle espèce minéralogique découverte à ce jour dans les seules "natronières" du Kanem.

Une autre originalité apparaît en fonction du drainage et de l'aération des dépressions interdunaires [(5), (6)]. Dans les milieux mal drainés, mal oxygénés qui constituent la majorité des cas, les ions sulfates sont bloqués à l'état de sulfures alcalins et métalliques par des mécanismes de réduction bactérienne : la paragenèse est *carbonatée sodique*.

Dans le cas des milieux bien drainés, bien aérés, les sulfates s'expriment minéralogiquement et s'associent aux chlorures, les carbonates ayant été piégés à l'amont. La paragenèse est alors à dominance *sulfatée sodique* avec des minéraux comme le gypse, la bloedite ($\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), la mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) ou sa forme déshydratée, la thénardite (Na_2SO_4) associés à de la halite et à des minéraux plus rares comme la northupite ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 \cdot \text{NaCl}$).

Au plan des mécanismes, l'étude géochimique des évaporites du bassin tchadien est riche d'enseignements. Elle a montré que les toutes premières étapes évolutives d'une eau qui se concentre sous le jeu de l'évaporation sont déterminantes de son devenir ultérieur.

Le changement initial, majeur, qui intervient se traduit par une forte réduction des alcalino-terreux (Ca^{2+} , Mg^{2+}), en général plus notable pour le calcium que pour le magnésium. Cette inversion dans le spectre cationique est due dans la plupart des cas à la précipitation de calcite faiblement magnésienne.

Cet évènement est important puisqu'il commande, calcium et espèces carbonatées n'étant jamais en égales proportions molaires dans les eaux, le faciès carbonaté ou calcique vers lequel évoluera une eau donnée.

Dans le cas du lac Tchad, les eaux présentent un rapport molaire

$\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ de 1/5. La précipitation de calcite (CaCO_3) soustrait à la solution calcium et bicarbonate dans la proportion de 1/2. Les eaux lacustres seront nécessairement conduites à évoluer vers le pôle bicarbonaté, puis carbonaté sous le jeu d'une évaporation continue. La saturation en calcite survient pour des eaux très peu concentrées ($\approx 200 \text{ mg/l}$), très tôt dans leur évolution.

La leçon à retenir est donc que le pôle ultime vers lequel évolue une eau donnée est déterminée très tôt dans son histoire. D'autre part, à partir d'une eau-mère unique, celle du lac Tchad, le milieu de concentration, réducteur ou oxydant livre deux paragenèses opposées, carbonatée ou sulfatée sodique (fig. 2).

Dans le temps et à l'échelle du bassin tchadien dans son ensemble, on observe (1) une diminution des teneurs en calcaire dans les sédiments lacustres depuis le Plio-pléistocène ancien jusqu'à l'Actuel. Il pourrait s'agir de la mise au zéro de l'horloge endoréique au début du confinement du bassin, le carbonate ayant été le premier à précipité massivement.

VII_ Les mécanismes de régulation saline du lac Tchad

Nous avons signalé que le lac Tchad, bassin superficiellement clos, est un lac d'eau douce. Recevant plus de 3 millions de tonnes de substances dissoutes par an, soumis à une évaporation intense (2 m par an), il n'a pas montré d'augmentation de salure depuis que les premières données hydrochimiques furent établies en 1909 lors de la mission du Général TILHO.

Le lac Tchad est donc en état d'équilibre dynamique avec les nappes souterraines environnantes, c'est-à-dire qu'à l'échelle pluriannuelle les apports hydrique et salin compensent les pertes dues à l'évaporation et aux infiltrations (4).

Lorsqu'on cherche à établir un bilan, il convient de ne pas perdre de vue le caractère spéculatif et approché des valeurs auxquelles on aboutit. Ce bilan provisoire, résultat des travaux des différents chercheurs qui composaient l'équipe multidisciplinaire de l'ORSTOM est résumé dans le tableau ci-contre (fig. 3).

En ce qui concerne les évaporites, notre intérêt porte surtout sur le terme "infiltrations" de ce bilan. La sédimentation chimique et la fixation biochimique (coquilles, plantes aquatiques...) "piègent" annuellement dans le lac entre 0,76 et 0,84.10⁶ tonnes d'ions dissous et entre 1,20 et 1,44.10⁶ tonnes de silice dissoute de la totalité des apports fluviaux. Pendant la même période, ce sont donc entre 1,10 et 1,14.10⁶ tonnes d'ion dissous et entre 0,23 et 0,30.10⁶ tonnes de silice qui s'échappent du lac par

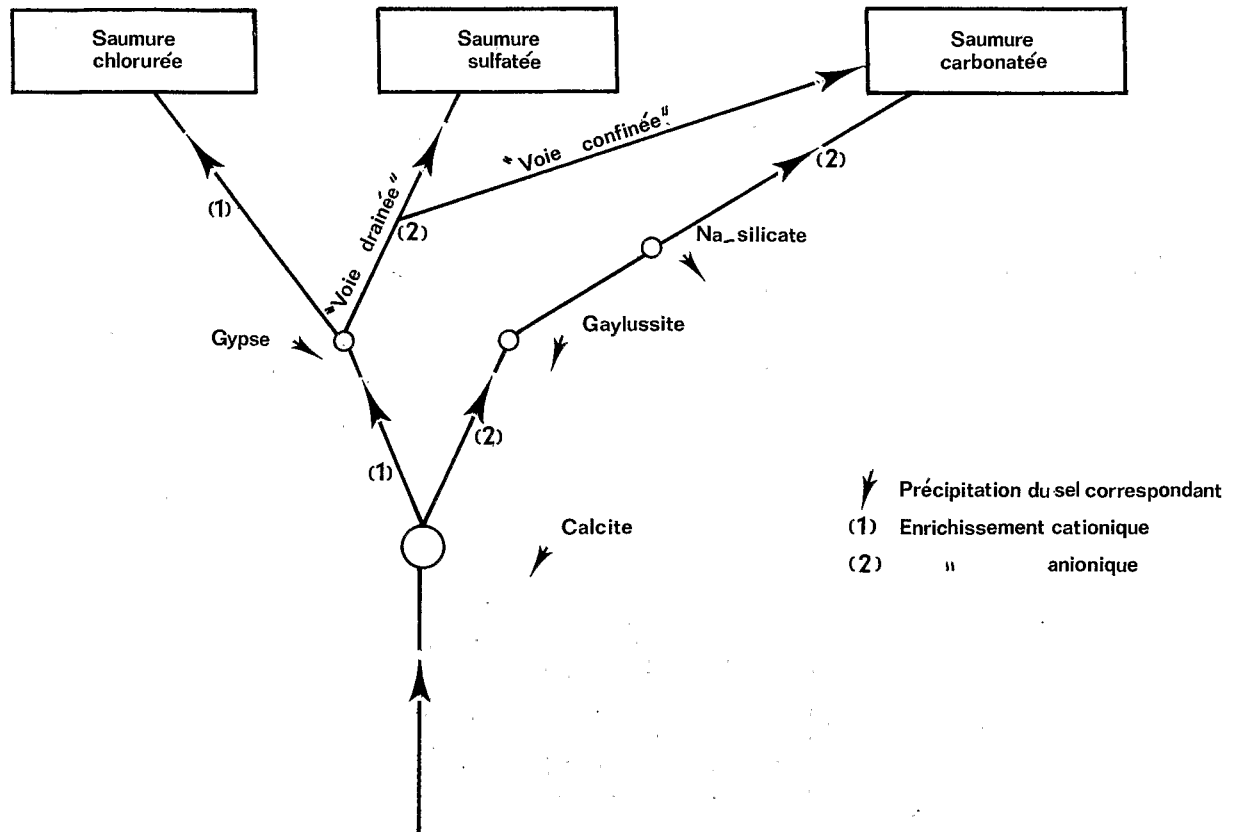


Figure 2. Evolution dichotomique des eaux sous le jeu d'une évaporation continue et de cristallisations successives.

(modifiée d'après Hardie et Eugster (8))

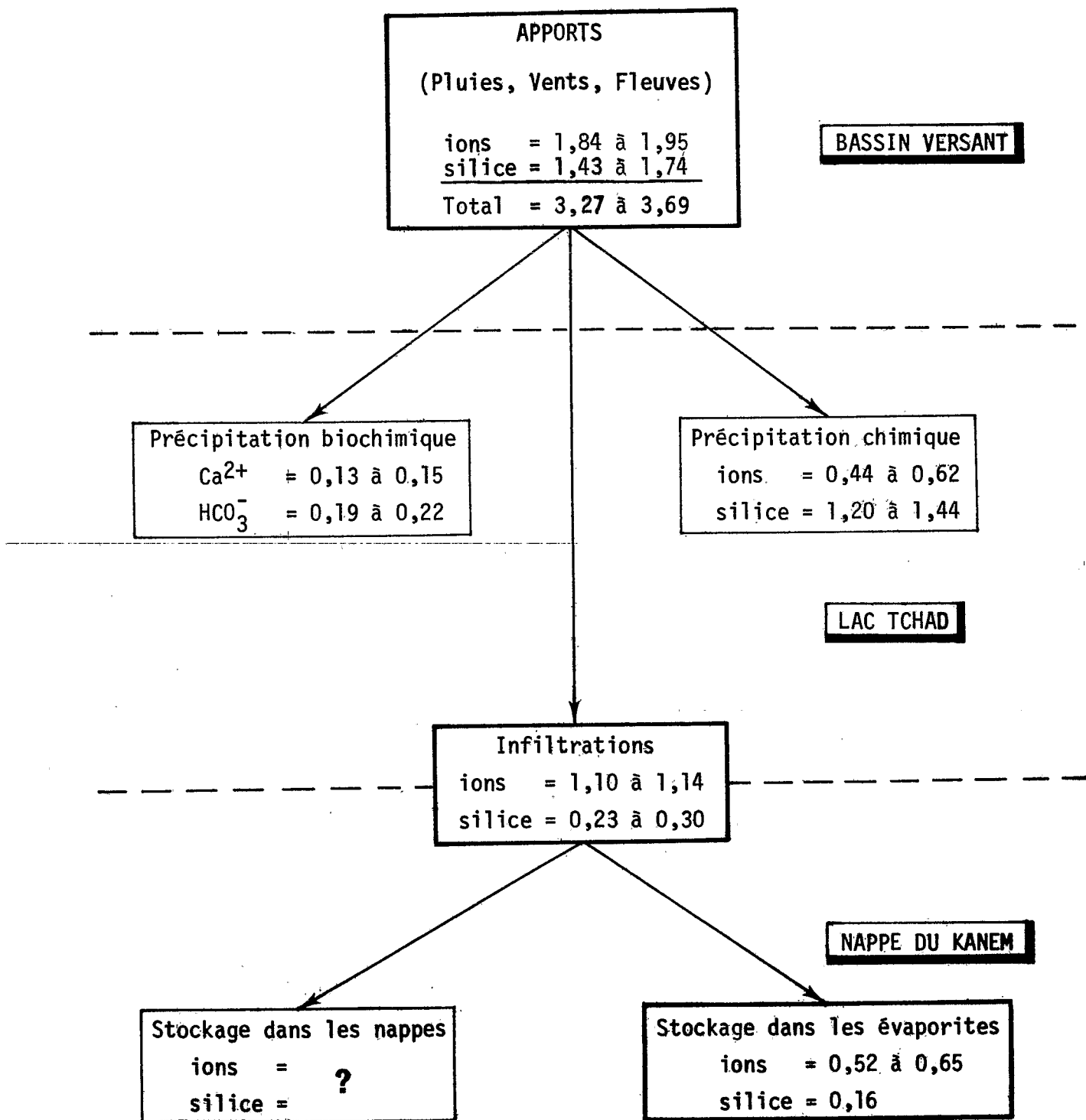


Fig.3 Schema du bilan salin annuel moyen du lac Tchad et de ses dépendances hydrologiques (exprimé en millions de tonnes)

infiltration pour venir recharger les nappes bordières qui, à leur tour vont s'évaporer au niveau des interdunes.

Dans ces apports, le sodium représente de 0,12 à 0,13.10⁶ tonnes par an, c'est-à-dire de 0,40 à 0,44.10⁶ tonnes de trona potentiellement cristallisable, sel dominant de la paragenèse. Connaissant le rendement potentiel à l'hectare des salines exploitées (175 t/ha/an) et la surface de l'ensemble des interdunes salifères (par planimétrage sur photographies aériennes), il est possible d'estimer le tonnage de trona qui cristallise chaque année dans les dépressions interdunaires du Kanem. On aboutit à un total de 0,50.10⁶ tonnes de trona, chiffre qui aux erreurs d'estimation près correspond à la quantité de sel infiltrée depuis le lac Tchad.

Alors que dans les gisements classiques, la réserve est finie, l'intérêt des évaporites du lac Tchad réside dans le fait qu'elles se *régénèrent chaque année*, tant que la situation hydrologique reste celle que nous avons décrite.

Une objection majeure vient à l'esprit après ces lignes. Comment se fait-il que l'on ne retrouve pas à l'aplomb du lac Tchad un gisement salifère au moins aussi important que celui de la formation éocène de la Green River du Wyoming ?

En premier lieu, il convient de rappeler que la grande solubilité des évaporites est un obstacle important à leur "fossilisation". De plus, s'élaborant aux dépens d'eaux continentales, nettement moins concentrées que des eaux marines, il leur faudra des conditions d'évaporation d'autant plus sévères.

L'empreinte qu'elles laissent dans les "archives géologiques" est bien souvent minime. Ainsi, si le lac Tchad s'asséchait dans son état actuel, cet événement ne se traduirait en définitive que par le dépôt d'une pellicule de trona inférieure à 1 mm d'épaisseur. L'assèchement du "Paléo Tchad" (350 000 km² il y a 6.000 ans) n'aurait quant à lui déposé qu'une couche saline de trois dixième de millimètres.

Dans le cas de la cuvette tchadienne, les évaporites déposées lors des phases d'aridification paraissent avoir été recyclées à chacune des phases humides suivantes, participant ainsi à l'augmentation de la minéralisation des nappes. Ce recyclage a vraisemblablement été facilité par la grande masse sableuse dunaire du paysage tchadien qui n'a pas opposé d'écran imperméable aux échanges hydrologiques.

VIII - Conclusion

Le dépôt d'évaporites apparaît comme un épisode normal des stades ultimes d'évolution d'un bassin continental en voie d'endoréisme. Le rôle

des conditions climatiques demeure essentiel, mais c'est sans aucun doute le pouvoir confinant de l'entité morphologique qui reste primordial.

Cependant les modèles actuels de sédimentation évaporitique, s'ils sont continentaux pour la plupart, ne sauraient être la copie conforme de ceux qui ont mis en place les grands gisements salifères marins fossiles. En changeant d'échelle, on ne change pas seulement de degré, mais de nature. Si l'on a quelque peine à reconstituer le paléoenvironnement salifère, c'est sans doute à cause des "...différences profondes qui séparent, et qui opposent même, la physionomie du monde anté-alpin à notre géographie actuelle, unique source de nos connaissances et seule réserve où vient puiser notre imagination" comme le dit si justement G. BUSSON (7).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) SERVANT, M. (1973).- Séquences continentales et variations climatiques. Evolution du bassin du Tchad au Cénozoïque supérieur. Thèse d'Etat, Univ. Paris VI, 348 p.
- (2) ROCHE, M.A. (1973).- Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du lac Tchad. Thèse d'Etat, Univ. Paris VI, 385 p.
- (3) SCHNEIDER, J.L. (1967).- Relations entre le lac Tchad et la nappe phréatique. Ext. publ. n° 70 A.I.H.S., Sympos. Garda, 122-131.
- (4) CARMOUZE, J.P. (1972).- Originalité de la régulation saline du lac Tchad. C.R. Acad. Sci. Paris, 275, 1871-1874.
- (5) CHEVERRY, C. (1974).- Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Thèse d'Etat, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 275 p.
- (6) MAGLIONE, G. (1974).- Géochimie des évaporites et silicates néoformés en milieu continental confiné. Thèse d'Etat, Univ. Paris VI, 331 p.
- (7) BUSSON, G. (1968).- La sédimentation des évaporites. Mém. Mus. Nat. Hist. Nat., XIX, 3, 128-169.
- (8) HARDIE, L.A. et EUGSTER, H.P. (1970). - The evolution of closed-basin brines. Mineral. Soc. Amer. Spec. Pap., 3, p. 273-290.