Influence du climat sur le type de régulation saline du lac Tchad : relations avec les modes de sédimentation lacustre

J.P. Carmouze, G. Pédro

► To cite this version:

J.P. Carmouze, G. Pédro. Influence du climat sur le type de régulation saline du lac Tchad : relations avec les modes de sédimentation lacustre. Sciences Géologiques Bulletin, 1977, 30 (1), pp.33-49. hal-02732231

HAL Id: hal-02732231

<https://hal.inrae.fr/hal-02732231>

Submitted on 2 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INFLUENCE DU CLIMAT SUR LE TYPE DE RÉGULATION SALINE DU LAC TCHAD RELATIONS AVEC LES MODES DE SÉDIMENTATION LACUSTRE

Jean-Pierre CARMOUZE * et Georges PEDRO **

RÉSUMÉ. — La régulation saline du lac Tchad dépend de la régulation hydrique et de l'intervention de processus biogéochimiques par l'intermédiaire desquels certains éléments dissous évoluent vers des formes insolubles. Elle peut être ramenée à la combinaison de deux facteurs antagonistes à composantes multiples. L'un, de nature climato-hydrogéologique, est lié à la régulation hydrique; dans le cas du lac Tchad, il s'agit d'un facteur d'accroissement de la salure des eaux d'origine fluviale. L'autre, de nature biogéochimique, rend compte de la sédimentation chimique au sein du milieu. C'est un facteur de dessalage.

Ces deux facteurs évoluent de manière opposée en fonction des fluctuations du plan d'eau, ou encore du climat. Leur combinaison est telle que : en période humide, pour des cotes élevées du plan d'eau ($>$ à 283), le lac est assimilable à un bac de décantation et d'évaporation, dans lequel la salure ne dépasse pas une certaine valeur qui est en grande partie réglée par le premier facteur : la régulation est du type climato-hydrogéologique; en période à caractéristiques climatiques « moyennes », le plan d'eau oscille entre les cotes 279,5 et 283. Les deux facteurs envisagés s'opposent l'un à l'autre, de sorte que la salure globale reste constante et que le lac fonctionne comme réacteur : la régulation est de type mixte climato-hydrologique et biogéochimique; en période aride, lorsque le plan d'eau se maintient à un faible niveau ($<$ 279,5), le lac peut être considéré comme un bac de concentration : la régulation est de type climatique et la sédimentation de nature évaporitique.

Les modes de sédimentation, lorsqu'on considère les trois cas précités, sont dans l'ordre : à dominante « héritée » avec précipitation de calcite, mixte (héritage - dépôts biogènes - néoformations argileuses) et à dominante évaporitique.

SÉDIMENTATION — RÉGULATION SALINE — CLIMAT — LAC TCHAD

I — INTRODUCTION. GRANDS TRAITS GÉOGRAPHIQUES DU LAC TCHAD

Le bassin du Tchad constitue un vaste système endoréique (2 500 000 km²), situé au cœur du continent africain entre le 5^e et le 25^e degré de latitude nord, dans la zone de balancement

* ORSTOM, Section d'Hydrobiologie, 24, rue Bayard, 75008 Paris.

** INRA, Département de Science du Sol, CNRA, 78000 Versailles.

du front intertropical. Il correspond donc à un *milieu continental fermé* qui, échappant de ce fait à l'influence marine, est susceptible de subir de profondes variations climatiques, aussi bien à l'échelle de la saison que du millénaire. Ce sont autant de particularités qui en font un milieu privilégié pour l'étude des empreintes climatiques sur les paysages et les milieux.

Au centre du bassin est situé le lac proprement dit. Il correspond à la cuvette terminale du Chari, dont il est en quelque sorte la zone d'épandage puisqu'il ne possède pas d'effluent de surface (fig. 1). Aussi, comme tous les milieux lacustres de steppe, le lac Tchad n'a pas de rives définitives : son *niveau* et sa *surface* dépendent étroitement des apports fluviaux, eux-mêmes tributaires, dans ces zones arides, de la pluviosité. Il est donc le siège de variations *spasmodiques*, qui se traduisent par une alternance plus ou moins régulière de pulsations transgressives et régressives.

FIG. 1 — Le bassin du Tchad

Depuis l'Holocène supérieur (4 000 ans B.P. — actuel), qui est la période plus directement concernée par cette étude, la cote du plan d'eau a toujours été en dessous de 286 m, de telle sorte que le lac se comporte typiquement comme un lac climatique plat (profondeur de l'ordre de 5 m) et qu'il se présente, suivant l'expression de GAUTIER (1928), comme une « immense daya », dont de vastes zones sont susceptibles d'être exondées ou immergées pour de très faibles fluctuations du niveau. De ce fait, il est possible de rencontrer en fonction du temps un certain nombre de « situations » lacustres; à la suite des travaux de TILHO (1910), on est conduit à en retenir trois principales.

1. La situation moyenne caractéristique de la période qui va du début du siècle jusqu'à nos jours correspond à une cote voisine de 282 m : *lac moyen*. Ce lac s'étend alors sur une surface de 21 000 km² (c'est environ la superficie du lac Balkach), la longueur des grands axes étant comprise entre 100 et 250 km; son volume est de 72.10⁹ m³ et sa profondeur en moyenne de 3,5 m. En réalité cette dernière n'est pas uniforme, car le fond de la cuvette est plus ou moins marqué par un système dunaire. Aussi, suivant la position du sommet des dunes par rapport au plan d'eau, le lac présente-t-il différentes physionomies; c'est pourquoi on a coutume de considérer trois types de paysages, répartis d'ailleurs en deux « cuvettes », sud et nord, qui sont situées de part et d'autre d'une zone de hauts fonds dénommée la « grande barrière » (tableaux I et II). Ce sont :

— un paysage d'« îles » lorsque les crêtes des dunes sont exondées : c'est l'*archipel* (fig. 2 et 3). Le nombre d'îles est de l'ordre de 10-50, la surface moyenne de chacune d'elles étant de 2,4 km² environ. Au total, cela représente 5 600 km², dont 59 % en eau et 41 % de terre ferme (îles de sable);

— un paysage d'« îles de végétation » : en effet, les crêtes de dunes, lorsqu'elles sont immergées sous 0,50 - 1,50 m d'eau, sont colonisées par des phanérogames semi-aquatiques (*Cyperus papyrus* et *Phragmites* principalement). Ce paysage est alors appelé *îlots-bancs* (fig. 2 et 3).

FIG. 2 — Les grandes régions naturelles du lac Tchad. Lac moyen (cote 281,9)

Fig. 3 a et b — Courbes topographiques « lissées » suivant deux grands axes de la cuvette nord. De haut en bas : lac moyen (cote 281,8); petit lac (cote 279); grand lac (cote 283)

Fig. 3 c et d — Courbes topographiques « lissées » suivant deux grands axes de la cuvette sud. De haut en bas : lac moyen (cote 281,8); petit lac (cote 279); grand lac (cote 283)

Les îlots-bancs couvrent près de 10 000 km², dont 80 % sont en eau, le reste correspondant à des tapis de macrophytes. Lorsque la profondeur devient inférieure à 0,5 m, il se développe fréquemment des « prairies » à *Potamogeton*, *Vallisneria* et *Ceratophyllum*;

— enfin un paysage d'eaux-libres se manifeste dès que les sommets de dunes sont noyés trop profondément pour qu'il y ait développement de végétation (> 1,50 m); il s'étend en moyenne sur 7 700 km² (fig. 2 et 3).

TABLEAU I

Surfaces en eau, volumes et profondeurs moyennes du lac et de ses cuvettes sud et nord

	Surface en eau (km ²)	Volume (m ³)	Profondeur moyenne (m)
Lac	21 000	72 × 10 ⁹	3,40
Cuvette sud	10 800	25 × 10 ⁹	2,45
Cuvette nord	10 200	47 × 10 ⁹	4,55

TABLEAU II

*Superficies relatives des diverses unités de paysages
(z est la profondeur des hauts-fonds)*

Paysages	Surfaces (km ²)
Eaux libres z > 1,5 m	7 700
Ilots-bancs 0,5 < z < 1,5 m	10 000 (dont 18 % occupés par les îles de végétation)
Archipel	5 600 (dont 4 % occupés par les îles de sable)

2. Lorsque le niveau d'eau atteint et dépasse la cote 283 m, on a ce que TILHO a appelé le *grand lac*. Il s'agit effectivement d'une petite mer intérieure de 25 000 km², dont le volume est de l'ordre de 96 - 10⁹ m³. La surface des eaux libres augmente considérablement, tandis que la proportion d'îlots-bancs diminue, car la profondeur moyenne du lac dépasse alors 4,50 m (fig. 4). Cette situation a été celle des années 1963-1964 et, d'une façon plus générale, celle des XIV^e et XVIII^e siècles (MALEY, 1973).

3. Lorsque, au contraire, le niveau descend en dessous de 279,5 m, le lac se *morcelle* et la surface tombe en dessous de 10 000 km² (fig. 2). C'est ce qui s'est produit par exemple en 1910 (TILHO, 1910) et, plus près de nous, en 1973-74 (CARMOUZE *et al.*, 1973 a et b). La cuvette nord a été alors entièrement asséchée, après être passée par un stade « archipel », puis par un stade présentant un grand nombre de mares bordières isolées (fig. 4). Quant à la cuvette sud, elle s'est rétrécie jusqu'à correspondre à une surface de l'ordre de 2 000 km² (lac Léman : 580 km²) et à un volume de 2.10⁹ m³ (fig. 4).

A partir de cet ensemble de données, dont un résumé est présenté dans le tableau III, et disposant en même temps d'un certain nombre d'éléments sur la régulation saline du lac Tchad et, par là même, sur l'intensité et le type des sédimentations chimiques et biochimiques

FIG. 4 — Principales physiologies du lac Tchad

- a — le « grand » lac à la cote 283
- b — un « petit » lac : situation en 1908 (TILHO, 1910)
- c — un « petit » lac : situation en juin 1973
- d — un « petit » lac : situation en décembre 1973

enregistrées (CARMOUZE, 1976), nous avons été amenés à aller plus loin dans l'analyse des phénomènes. A ce sujet, le problème plus particulier qui se posait consistait à voir si des relations pouvaient éventuellement exister entre les pulsations transgressives et régressives périodiques du lac actuel et les modes de sédimentation lacustre. C'est ce qui nous a conduits, dans une première phase, à établir les principes de la régulation saline relatifs au lac moyen, avant d'envisager les variations de cette régulation en fonction des fluctuations du plan d'eau, c'est-à-dire finalement des variations climatiques du milieu.

TABLEAU III
Evolution du lac Tchad

Cotes du plan d'eau	279	280	281	282*	283	284
Profondeurs moyennes du lac (m)	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5
Surfaces en eau (km ²)	< 10 000 morcellement					
Surfaces occupées par les macrophytes (km ²)	4 000					
Volumes (km ³)	8 x 10 ⁹					
Points de repère { annuels de { repère { séculaires	1906-1909 et 1973-1974	VIII ^e au XVI ^e s.		XX ^e s.	1967	1964
Principaux mouvements du plan d'eau	1945 — crue (2,20 m) —> 1957					
	1973 <— décrue (2,50 m) — 1967 XX ^e s. décrue séculaire XIX ^e -XVIII ^e s.
Situations étudiées avec précision (régulation)	+					
Désignations habituelles	Petit lac	lac moyen				grand lac

* Cote moyenne du plan d'eau pour la période qui va du début du siècle à nos jours.

II — LA RÉGULATION SALINE DU LAC TCHAD : MISE EN ÉVIDENCE DES FACTEURS DE RÉGULATION; LEUR IMPORTANCE RELATIVE

Considéré dans son état moyen, le lac Tchad apparaît comme un système complexe, car il ne constitue ni un simple bassin de concentration, ni un simple bassin de décantation.

Si, en effet, il était un *bassin de concentration* *, on devrait, du fait de l'intense évaporation qui règne au-dessus de la cuvette (2,11 m), aboutir à des eaux caractérisées par une assez forte salure. Or il n'en est rien, puisque le Tchad se présente comme un lac d'eau *douce* : la teneur en éléments dissous est de 363 mg/l en moyenne. Par rapport aux eaux fluviales (61,5 mg/l), il y a certes concentration, mais celle-ci reste très limitée, le facteur moyen de concentration étant de 5,9 (tableau IV).

TABLEAU IV
Compositions chimiques moyennes des eaux fluviales et lacustres

Eléments	Eaux du Chari (mg/l)	Eaux du lac moyen (1967) (mg/l)	Coefficient de concentration
Si(OH) ₄	22,2	46,7	2,1
CO ₃ H ⁻	31,5	247,7	7,8
Ca ²⁺	2,06	12,50	6,0
Mg ²⁺	0,94	6,20	6,6
Na ⁺	2,92	33,6	11,5
K ⁺	1,84	16,81	9,1
Total	61,50	363	5,9

Si, d'autre part, il était un simple *bassin de décantation*, les suspensions solides du Chari et les sédiments superficiels du lac devraient avoir une constitution minéralogique similaire. Or ce n'est pas non plus ce que l'on trouve (tableau V).

En effet, l'examen de ce tableau montre tout d'abord que les teneurs en kaolinite, illite et feldspath, que ce soit dans les charges solides du Chari ou dans les sédiments du lac, sont liées entre elles selon des proportions voisines. Mais relativement à ces minéraux, on note aussi une nette augmentation du taux de smectites. En outre, des dépôts de carbonates résultant à la fois de la précipitation chimique (calcite) et de l'accumulation de coquilles de mollusques (aragonite) sont observés.

Dans ces conditions, on est amené à penser que le lac est le siège de *sédimentations chimiques et biochimiques* qui concourent à la régulation saline et que, de la sorte, il fonctionne normalement comme un *réacteur*.

Ceci étant posé, il reste à identifier les processus régulateurs, puis à évaluer leur impact sur l'hydrogéochimie du lac. En réalité, une telle opération ne peut être envisagée qu'à partir d'une description dynamique du milieu, qui permet de tenir compte des échanges de matière.

* Dans ce cas, la concentration ne dépend que des pluies, de l'évaporation et des infiltrations.

TABLEAU V

Composition minéralogique moyenne des transports solides en suspension du Chari et des sédiments du lac

Minéraux	Charge solide du Chari (en % pondéral)	Sédiments du lac (en % pondéral)
Quartz	9,4	1,2
Feldspaths	5,8	4,25
Illite	11,3	7,85
Kaolinite	38,4	26,55
Smectites	10,7	21
SiO ₂ amorphe	2,3	4,85
Al ₂ O ₃ amorphe	1,3	0,18
Fe ₂ O ₃ amorphe	2,75	1,39
Perte au feu	18,1	22,85
Kaolinite/illite	6,6	6,25
Kaolinite/feldspath	3,4	3,4

Or une description dynamique n'est simple que dans le seul cas où le milieu est considéré en état d'équilibre dynamique, c'est-à-dire fonctionnant en régime permanent. Pour ce qui est du lac Tchad où le régime d'écoulement des eaux fluviales varie d'une façon aléatoire, il n'existe pas de parfait ajustement entre les apports et les pertes à l'échelle annuelle; par voie de conséquence, on n'est pratiquement jamais en régime permanent. Toutefois, si l'on considère une période suffisamment longue, l'état hydrochimique du lac oscille autour d'un état moyen, qui peut être assimilé à l'état d'équilibre du milieu par rapport au régime moyen des apports et des pertes relatifs à la même période. C'est la raison pour laquelle nous avons été conduits à retenir deux périodes correspondant respectivement, l'une à un état moyen caractéristique de la cote 282 (c'est la situation qui existait par exemple en 1967), l'autre à un état se rapportant à la cote 283-284.

En se référant à ces divers éléments, il devient alors aisé d'établir que la régulation saline du lac Tchad résulte de l'intervention de trois sortes de facteurs; ceux-ci sont respectivement de nature *hydrique*, *géochimique* et *biochimique*, puisque la salure est contrôlée en définitive par l'existence d'infiltrations, de sédimentation géochimique et de séquestrations biochimiques.

a) *Existence d'infiltrations*

Pour les éléments qui ne participent pas à des réactions chimiques, l'eau constitue le *seul* facteur de régulation; c'est le cas du *sodium* par exemple *. Or la valeur du rapport des concentrations : (Na) lac/(Na) fleuve n'est que de 12 (cf. tableau IV), ce qui n'est pas excessif si l'on songe à l'importance de l'évaporation dans cette zone; autrement dit, il existe nécessairement des pertes par *effluent souterrain*, et l'on peut ajouter même que celles-ci sont relativement

* Il a été montré en effet que les sédiments du lac ne s'enrichissaient en sodium, ni par voie géochimique, ni par voie biochimique

élevées. Les évaluations effectuées conduisent ainsi à montrer que les infiltrations représentent près de 10 % des pertes hydriques (tableau VI).

TABLEAU VI
Eléments du bilan hydrique relatif à la cote moyenne 282

Apports (%)		Pertes (%)	
Fleuves	87	Evaporation	92
Lac	13	Infiltration	8

b) *Existence de néoformations géochimiques*

D'après les bilans réalisés pour une cote du plan d'eau légèrement supérieure à celle envisagée lors de l'établissement du bilan hydrique (283-284 contre 282), on constate que les néoformations mises en évidence sont essentiellement : *des silicates argileux* de type nontronite, beidellite ferrique et montmorillonite, qui captent 34,5 % de la silice, 20,5 % du magnésium et 7 % du calcium apportés annuellement en solution par les eaux fluviales; *des carbonates de précipitation* (calcite), où sont incorporés 26 % du calcium dissous déversé annuellement.

c) *Existence de séquestrations biochimiques*

Celles-ci se font par l'intermédiaire des organismes vivants et principalement : *des mollusques* *, qui consomment 18 % du calcium apporté en moyenne chaque année pour l'édification de leurs coquilles; *des diatomées* *, qui utilisent 13,5 % des apports annuels de silice dissoute au lac pour fabriquer leur test; enfin, *des macrophytes* *, qui séquestrent une quantité relativement importante de potassium (9 % des apports).

Au total, grâce à ces deux dernières voies, 50 % de la silice, 66 % du calcium, 29 % du magnésium et 9 % du potassium, apportés par les fleuves à l'état dissous, en moyenne, chaque année, se sédimentent dans le lac. L'importance relative des voies géochimique et biochimique pour les trois principaux éléments (Si(OH)_4 , Ca^{++} et Mg^{++}) a pu être déterminée et se présente comme il est indiqué dans le tableau VII.

TABLEAU VII
Importance relative des différents types de sédimentation chimique touchant la silice dissoute, le calcium et le magnésium

Eléments	Sédimentation biochimique	Sédimentation géochimique	
Si(OH)_4	26,8 %	73,2 % dont	90 % néoformation de Fe et Mg 10 % néoformation de nontronite
Ca^{2+}	20,5 %	79,5 % dont	26 % néoformation de smectite 74 % précipitation de calcite
Mg^{2+}	28,5 %	71,5 % néoformation de smectite	

* Les diverses espèces sont indiquées dans la monographie due à la section d'Hydrobiologie de l'ORSTOM sur les « Grandes zones écologiques du Lac Tchad », Cahiers ORSTOM, série Hydrobiol., VI, 2, 1972, p. 103-169.

III — VARIATIONS DE LA RÉGULATION SALINE EN FONCTION DES FLUCTUATIONS DU PLAN D'EAU

Du fait de l'existence de diverses fluctuations historiques (tableau III) et, plus spécialement, de celles qui se sont manifestées depuis 1945, nous avons été amenés à apporter une contribution à l'étude de ce problème. Certes, les données dont nous disposons sont plus ou moins précises et pas toujours complètes. Il a été possible néanmoins de dégager quelques idées générales, en s'appuyant sur trois groupes d'informations :

— la comparaison du taux de sédimentation correspondant à l'époque de la formation de la tranche superficielle des sédiments — soit du XVIII^e au XIX^e siècle, c'est-à-dire lorsque le niveau du lac était situé entre 283-284 m (grand lac : 25 000 km²) — et de celui caractérisant l'époque actuelle, dont on sait que la cote oscille autour de 282 m (lac moyen : 21 000 km²);

— la grande *crue* qui s'est manifestée entre 1945 et 1957, correspondant à une montée des eaux de 2,20 m; cette crue s'est traduite par une transgression relativement importante, puisque la surface du lac est passée *grosso modo* de 6 000 km² à 23 000 km² : *elle a donc quadruplé*;

— enfin, la forte *décrue* de 2,50 m qui a affecté le lac entre 1967 et 1974; elle a été à l'origine d'une régression puisque la surface du lac (21 000 km²) est tombée à 2 500 km², soit *une réduction de superficie de l'ordre de 7*.

A partir de cet ensemble de données, et en ce qui concerne la salure globale du lac moyen, on a pu déduire que : entre 1945 et 1957, bien que le lac soit passé de la cote 280 à la cote 282,5, la salure a peu diminué : 4,15 m mé/l à 3,25 mé/l*; entre 1967 et 1972, le niveau est descendu de la cote 282 à la cote 279,5, alors que la salure a peu varié : 365 mg/l en 1967 et 400 mg/l en 1972. Il faut ajouter naturellement que, dans le même temps, la composition a évolué vers le pôle *bicarbonaté sodique* (tableau VIII).

TABLEAU VIII
Evolution de la composition chimique relative des eaux
(en % molaire)

	$\frac{[\text{Ca}^{2+}]}{\Sigma [\text{cations}]}$	$\frac{[\text{Mg}^{2+}]}{\Sigma [\text{cations}]}$	$\frac{[\text{Na}^+]}{\Sigma [\text{cations}]}$	$\frac{[\text{K}^+]}{\Sigma [\text{cations}]}$	$\frac{[\text{CO}_3\text{H}^-]^*}{[\text{CO}_3\text{H}^-] + [\text{SiO}_4\text{H}_4]}$	$\frac{[\text{SiO}_4\text{H}_4]}{[\text{CO}_3\text{H}^-] + [\text{SiO}_4\text{H}_4]}$
1967	20,8	16,8	47,8	14,5	84	16
1972	13,7	14,6	57,3	14,4	87,1	12,9

* CO_3H^- représente en réalité la somme des carbonates et des bicarbonates

Ainsi, entre 279,5 et 283 m, la salure ne varie pratiquement pas. En revanche, elle s'accroît nettement lorsque la cote descend en dessous de 279,5 et que le lac se fragmente (d'après les évaluations réalisées en se référant aux taux de sédimentation). Le problème qui se pose alors est de tenter d'expliquer cet état de choses en déterminant *quantitativement* les variations de l'intervention des différents processus régulateurs.

* En fait, il s'agit ici de salures ioniques globales, qui ont été établies à partir de mesures de conductivité. Dans ce cas, les teneurs en silice dissoute ne sont naturellement pas incluses.

• Ainsi, lors d'une décrue, on avait tendance à imaginer une augmentation automatique de la concentration. En réalité, jusqu'à la cote 279,5, celle-ci n'apparaît pas, du fait de la baisse simultanée des stocks, qui est consécutive à un déficit des apports, à des pertes marginales dues à la formation et à l'isolement de mares bordières et, enfin, à l'augmentation de la sédimentation chimique (néoformations argileuses et calcitiques) et biochimique : la biomasse des macrophytes augmente naturellement avec l'abaissement du plan d'eau (sa surface peut atteindre 4 000 km², cf. tableau III). Il en est de même de celle des mollusques, du moins jusqu'à la cote 280,5; en dessous en effet, elle a tendance à diminuer (LÉVÊQUE, 1972).

La comparaison des taux de sédimentation entre la cote 283-284 m — époque de constitution des sédiments de surface — et la cote 281-282 m — qui correspond à l'époque actuelle — donne une idée de l'ampleur des variations de la sédimentation chimique (tableau IX). L'examen du tableau IX montre, en outre, si l'on en juge par les taux relatifs du potassium, que la sédimentation biogéochimique est deux fois plus élevée lorsque la cote descend à 281 m.

TABLEAU IX
Sédimentation chimique moyenne annuelle en % des apports annuels moyens

Cote	283-284	281-282
Si(OH) ₄	44,5	81,3
Ca ²⁺	33,5	44,8
Mg ²⁺	28,8	40,9
K ⁺	8,8	19,5

Par ailleurs, il faut tenir compte de ce que, à la suite d'apports déficitaires en eau, le volume du lac diminue moins rapidement que prévu. En effet, de faibles baisses du plan d'eau provoquent de fortes réductions de la surface lacustre et, par là, des pertes par évaporation. Ce phénomène s'ajoute donc à ceux touchant les stocks en éléments dissous pour freiner l'accroissement de la salure des eaux.

• A l'opposé, lors d'une crue, on imaginerait volontiers une baisse de la concentration. En réalité, celle-ci se manifeste peu, au moins jusqu'à la cote 283, comme on l'a constaté entre 1945 et 1957, période au cours de laquelle le lac a pourtant doublé.

Or, ceci résulte de plusieurs éléments qui provoquent tous une *augmentation des stocks* : par accroissement des apports; par récupération partielle des sels déposés dans les mares bordières, lorsque ces dernières sont à nouveau inondées; par diminution enfin de la sédimentation chimique, que celle-ci soit de nature biochimique (réduction notamment de la biomasse des macrophytes) ou géochimique. A ceci, il faut ajouter que le volume du lac croît moins rapidement que prévu à la suite des apports excédentaires : la surface du lac augmente dans de grandes proportions; il en est donc de même des pertes par évaporation.

En définitive, la régulation saline du lac Tchad peut être ramenée à la combinaison de deux facteurs de nature *antagoniste*. Le premier est lié à la régulation hydrique et correspond à un facteur de concentration : il est égal au rapport de la hauteur d'eau éliminée par évaporation (h_E) et par infiltration (h_I), diminuée de celle relative à la pluviosité (h_M), sur la lame d'eau infiltrée (h_I), soit :

$$F = \frac{h_E - h_M + h_I}{h_I}$$

Il a été désigné sous le nom de *facteur de concentration climato-hydrogéologique* lorsqu'il y a des infiltrations (h_E et h_M étant d'ordre climatique et h_I de nature essentiellement hydrogéolo-

gique), et de facteur de *concentration climatique* si h_E et h_M interviennent seuls. Le second facteur rend compte de la sédimentation chimique ou biogène; d'où le nom de *facteur de dessalage biogéochimique*.

L'évolution semi-quantitative de l'intervention respective de ces facteurs a pu être évaluée et se présente telle qu'elle est indiquée dans la figure 5. D'après cette figure, les deux facteurs agissent bien en *sens opposé*. Quant à leur combinaison, elle est alors telle que l'on peut distinguer trois domaines.

FIG. 5 — Variations des régulations hydrogéochimiques et des caractéristiques sédimentologiques en fonction de la cote du plan d'eau

a) Dans le domaine central, situé entre les cotes 279,5 et 283 m qui correspondent au « lac moyen » au sens large du terme, les facteurs de concentration et de dessalage biogéochimique *augmentent de la même façon*, au fur et à mesure que le niveau baisse, en sorte que la salure des eaux reste remarquablement *constante* (la nature de celle-ci évolue néanmoins vers le pôle bicarbonaté sodique).

b) Lorsque la cote tombe en dessous de 279,5 (ce qui provoque le morcellement du lac), le facteur de concentration croît fortement, du fait que les infiltrations cessent en presque totalité; mais dans le même temps, le dessalage biogéochimique correspondant à l'individualisation de silicates argileux, de silice biogène et de carbonates diminue. La régulation est alors essentiellement assurée par les *facteurs climatologiques* (pluviosité-évaporation), en sorte que la concentration des eaux augmente fortement.

c) Enfin, quand le niveau dépasse la cote 283 m et continue à augmenter, les deux facteurs diminuent, mais le facteur de dessalage décroît plus vite que le coefficient de concentration; dans ces conditions, la concentration doit, en tout état de cause, augmenter très légèrement.

IV — CONSÉQUENCES DE LA RÉGULATION LACUSTRE SUR LE PLAN DES PHÉNOMÈNES SÉDIMENTOLOGIQUES

Si l'on se place maintenant à un point de vue plus strictement *sédimentologique*, les trois domaines qui viennent d'être décrits peuvent être mis en parallèle avec trois grands *types de fonctionnement lacustre*.

1. Lorsque le plan d'eau dépasse la valeur 283,5 - 284 m, l'intervention du facteur de concentration climato-hydrogéologique d'une part, et l'influence des processus de néoformation argileuse et de séquestration biogéochimique d'autre part, diminuent; elles deviennent d'ailleurs de moins en moins importantes au fur et à mesure que le plan d'eau s'élève. Dans ces conditions, le lac fonctionne essentiellement comme un *bac de décantation*, la composition minéralogique des sédiments étant peu modifiée par rapport à celle de la charge solide des fleuves. La sédimentation argileuse est principalement de type *détritique* (héritage).

2. Entre 283,5 et 279 m, le lac ne se manifeste plus que partiellement comme bac de décantation; il devient plutôt *réacteur*, avec mise en œuvre de néoformations argileuses, de précipitation de carbonates et de dépôts biogènes. La participation biogéochimique est d'ailleurs d'autant plus importante que le niveau du lac baisse; à 282 m par exemple, cote pour laquelle nous disposons de données précises, on a pu évaluer que les sédiments chimiques et biogènes représentent pondéralement 30 % et que la sédimentation purement détritique est de 70 %. En outre, l'augmentation porte d'abord sur les néoformations géochimiques (argiles-carbonates de précipitation), puis plus particulièrement sur les éléments d'origine organogène (coquilles calcaires et tests siliceux de diatomées). Au total, la sédimentation argileuse est de type *mixte* (héritage et néoformation).

3. Enfin, en dessous de 279,5 m, les apports d'argile détritique d'une part, et les néoformations biogéochimiques d'autre part, diminuent fortement, surtout dans la cuvette nord. Le lac perd alors son rôle de bac de décantation et même, dans une certaine mesure, de réacteur. Les infiltrations ayant cessé, il devient tout simplement une sorte de *bac de concentration*; lorsque le niveau s'abaisse, la concentration s'accroît donc jusqu'à l'individualisation d'une véritable « saumure », avec mise en place de dépôts évaporitiques de type thermonatrite, trona, gaylussite... (MAGLIONE, 1974). La sédimentation est alors essentiellement chimique et de type *évaporitique*.

Cet ensemble de données montre avec netteté que *la nature des sédiments déposés dans le lac se modifie largement en fonction des fluctuations du plan d'eau*. C'est ainsi que, lors d'une pulsation d'ordre *régressif*, on aurait *successivement* une sédimentation argileuse de type détritique, puis une sédimentation d'ordre mixte, dans laquelle la part de la néoformation biogéochimique augmenterait au fur et à mesure de l'abaissement du plan d'eau, jusqu'à un certain stade où l'on passerait assez brusquement à une sédimentation de nature exclusivement évaporitique. Au cours d'un épisode transgressif, on obtiendrait naturellement une séquence exactement inverse.

CONCLUSION

Dans le cas du lac Tchad, qui est un *lac plat situé au centre de la zone aride*, il est aisé de montrer que :

1. Tout au moins en dessous de 287 m *, les fluctuations du plan d'eau sont liées essentiellement à des variations climatiques.

2. Les périodes d'humidification du climat correspondent à des phases transgressives et les périodes d'aridification à des épisodes régressifs. En comparant, d'ailleurs, les surfaces maximale et minimale occupées par le lac et les extrêmes pluviométriques enregistrés dans la région, on constate que la surface du lac peut être multipliée par 10 pour une augmentation de la pluviosité annuelle de l'ordre de 40 à 50 % (cf. aussi pour les données historiques TILHO, 1947).

3. Il suffit, enfin, de très faibles variations dans l'épaisseur de la tranche d'eau, pour passer d'une sédimentation typiquement détritique (bac de décantation) à une sédimentation essentiellement évaporitique (bac de concentration), le stade intermédiaire étant constitué par un système à salure limitée et conduisant à une sédimentation caractérisée par la présence d'argiles de néoformation et de dépôts d'origine biogénique.

Manuscrit déposé le 21 octobre 1976

Abstract

The salt balance in lake Chad depends upon the hydric regulation and the intervention of biogeochemical processes by which certain dissolved elements evolve towards insoluble forms. The regulation may be understood in terms of the combination of two opposing multivariate factors :

1) A climato-hydrogeological factor depending on hydric regulation. In the case of lake Chad, this factor is involved in the increase of salinity of fluvial waters.

2) A factor with a biochemical nature accounting for chemical sedimentation in the milieu. This is a factor of desalting.

These two factors develop (in a contradictory way) as functions of fluctuations in water level or climate. Their combination is such that :

(A) In humid periods for high water levels (> 283), the lake is comparable with a « decantation and evaporation nessel » in which the salt concentration does not exceed a certain value — a value largely determined by the first factor. This type of regulation is of a « climato-hydrogeological » type.

(B) In periods with average climatic characteristics, the water level fluctuates between 279,5 and 283. The two factors considered oppose each other in such a way that the overall salinity remains constant and the lake functions as a « chemical reaction chamber ». This regulation is of a mixed « climato-hydrological » and « biogeochemical » type.

(C) In dry periods when the water level is low ($< 279,5$), the lake may be considered as a « concentration basin ». Under these circumstances, salt regulation is of a climatic type and the sedimentation is evaporitic in nature.

The forms of sedimentation related to the three examples mentioned above are respectively :

(A) A dominant of « heritage » with precipitation of calcite.

(B) A « mixed » form (heritage with biogenetic deposits and argillaceous neoformation).

(C) A dominant « evaporitic » form.

SEDIMENTATION — SALT REGULATION — CLIMATE — LAKE CHAD

* A des cotes supérieures, des phénomènes autres que ceux de nature climatique interviennent (FAURE, 1966; SIEFFERMANN, 1970; SERVANT, 1973).

Zusammenfassung

Die Regulierung der Salinität des Tschadsees hängt von der Wasserregulierung und dem Zusammenspiel biogeochemischer Prozesse ab, die über Zwischenstadien einige der gelösten Elemente in unlösliche Formen überführen. Sie können auf die Kombination von zwei gegensätzlichen Faktoren mit vielfältigen Verbindungen zurückgeführt werden: der eine von klimato-hydrogeologischer Natur ist an die Wasserregulierung gebunden; der andere von biogeochemischer Natur weist auf die chemische Sedimentation im Inneren des Milieus hin.

Diese zwei Faktoren wirken entgegengesetzt in Abhängigkeit der Wasserschwankungen und des Klimas: während einer humiden Periode ist der See einem Dekantations- und Evaporationsgefäß ähnlich und die Sedimentation ist überwiegend detritisch mit einer Kalzitfällung; in Zeiten, die durch gemäßigtes Klima charakterisiert sind wirkt er als Reaktor und die Sedimentation ist gemischt (detritisch - biogene Ablagerungen - Tonneubildungen); schliesslich, in Trockenzeiten wirkt er als Konzentrationsgefäß und die Sedimentation ist überwiegend evaporitisch.

SEDIMENTATION — REGULIERUNG DER SALINITÄT — TCHADSEE

Резюме

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТА НА ВИД РЕГУЛИРОВАНИЯ СОЛЕННОСТИ ОЗЕРА ЧАД. ОТНОШЕНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ОЗЕРНОГО ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ

Регулирование солёности озера Чад зависит от водного режима и от биогеохимических процессов, посредством которых некоторые растворённые элементы переходят в нерастворимые. Это сводится к сочетанию двух антагонистических факторов с многочисленными составляющими: один из них, климато-гидрологического характера, связан с водным режимом; другой биогеохимического характера отражает химическую седиментацию внутри среды.

Эти два фактора развиваются противоположным образом в зависимости от колебаний уровня воды или ещё от климата. В условиях влажного периода, озеро можно сравнивать с ёмкостью отстаивания и испарения, а седиментация имеет преимущество, унаследованный характер с выпадением кальцита; в средних климатических условиях, озеро действует как реактор и седиментация будет смешанного типа (унаследованность — биогенные осадки — глинистые новообразования); наконец в аридных периодах оно является ёмкостью концентрации и, в основном, отлагаются эвапориты.

Седиментация — регулирование солёности — климат — озеро Чад

BIBLIOGRAPHIE

- CARMOUZE J.P., CHOURET A. et DURAND J.R. (1973 a) — Données récentes sur l'évolution du lac Tchad en 1972-1973. Rapport, Centre ORSTOM Fort-Lamy (Ndjamena), multigr., 11 p.
- CARMOUZE J.P., CHOURET A. et FRANC J. (1973 b) — Assèchement de la cuvette sud du lac Tchad. Rapport, Centre ORSTOM Fort-Lamy (Ndjamena), multigr., 8 p.
- CARMOUZE J.P. (1976) — La régulation hydrogéochimique du lac Tchad. Contribution à l'analyse biogéodynamique d'un système lacustre endoréique en milieu continental. Thèse Sci. Paris VI, multigr., 420 p.
- FAURE H. (1966) — Evolution des grands lacs sahariens à l'Holocène. *Quaternaria*, 8, p. 167-175.
- GAUTIER E.F. (1928) — Le Sahara. Payot éd., 232 p.

- LÉVÊQUE Ch. (1972) — Mollusques benthiques du lac Tchad; écologie, production et bilans énergétiques. Thèse Sci. Paris VI, 225 p.
- MAGLIONE G. (1974) — Géochimie des évaporites et silicates néoformés en milieu continental confiné. Thèse Sci. Paris VI, multigr., 331 p.
- MALEY J. (1973) — Les variations climatiques dans le bassin du Tchad durant le dernier millénaire : essai d'interprétation climatique de l'Holocène africain. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 273, p. 1673-1676.
- SERVANT M. (1973) — Séquences continentales et variations climatiques. Evolution du bassin du Tchad au Cénozoïque supérieur. Thèse Sci. Paris VI, multigr., 348 p.
- SIEFFERMANN G. (1970) — Variations climatiques au Quaternaire dans le sud-ouest de la cuvette tchadienne. 92^e congr. Nat. Soc. Sav., Strasbourg, 2, p. 485-494.
- TILHO J. (1910) — Documents scientifiques de la mission Tilho (1906-1908). Paris, Impr. Nat., 3 vol.
- TILHO J. (1947) — Le Tchad et la capture du Logone par le Niger. Gauthier-Villars, Paris, 202 p.