

UN MODÈLE DE SÉDIMENTATION ÉVAPORITIQUE CONTINENTALE ACTUELLE : LE LAC TCHAD ET SES DÉPENDANCES HYDROLOGIQUES LITTORALES

par Gilbert F. MAGLIONE*

RESUME. — Bassin endoréique de quelques 2 millions de km², la cuvette tchadienne représente un excellent modèle pour l'étude de l'évolution géochimique d'un bassin clos soumis à des conditions arides.

Le lac Tchad actuel, bien que constituant le réceptacle apparent des tributaires, n'est qu'un lieu de transit pour les sels apportés par les fleuves. Ses infiltrations latérales alimentent la nappe phréatique qui dans les interdunes des zones périphériques peut s'évaporer par capillarité donnant une paragenèse évaporitique carbonatée sodique, relevant d'une diagenèse précoce.

ABSTRACT. — Closed basin of some 2 millions square kilometers, Chad basin is a good present model to study the geochemical evolution under arid conditions.

The present Chad lake is just a transit zone for the soluble salts brought in by the rivers. Seepage feed the ground water table which in the interdunary depressions is concentrated by capillary evaporation, giving a sodium carbonate paragenesis by diagenetic process.

INTRODUCTION

C'est en général le propre des hypothèses génétiques d'osciller au cours des années entre deux pôles radicalement opposés; les évaporites n'ont pas échappé à la règle.

Cependant leur dualité d'origine, continentale ou marine, semble tout de même acceptée par la plupart. Pour les évaporites marines, la querelle demeure entre tenants de dépôts profonds, partisans de dépôts sous une faible tranche d'eau dans des bassins subsidents, et même partisans de mise en place par processus capillaires.

Les rares modèles actuels de sédimentation saline sont continentaux pour la plupart; ils ont fait ces dernières années l'objet d'études détaillées. Toutefois, les enseignements qu'ils nous livrent doivent être extrapolés avec précaution à la reconstitution des bassins salifères fossiles.

Si les évaporites continentales ont une importance, en volume et en économie, moindre que les puissantes séries salifères marines, il ne faut pas perdre de vue que 27 % de la surface des continents sont privés d'écoulement à la mer, parmi lesquels 16 % sont aréiques et 11 % endoréiques. Ce sont donc d'importantes quantités d'eaux qui sont soustraites aux océans et qui, lorsque les conditions favorables sont réunies, peuvent se concentrer pour donner un gisement salifère. Témoin la « Green River formation » du Wyoming, issue du lac Gosiute à l'Eocène; la formation salifère (trona + halite), épaisse de plus de 365 m, totalise des réserves estimées à plus de 100 milliards de tonnes qui se seraient accumulés en moins d'un million d'années.

Un fait primordial est à préciser; c'est la grande diversité des paragenèses évaporitiques continentales qui les oppose à la constance et à la relative simplicité des paragenèses évaporitiques marines.

* Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, B P 1386, Dakar-Hann, Sénégal.

22 OCT. 1974

O. R. S. T. O. M. Ex 1

Collection de Référence

n° 7064 Geol.

Le faciès chimique moyen des eaux continentales (fleuves et lacs) est *bicarbonaté calci-sodique*. Par une série de précipitations, étagées dans le temps et dans l'espace, ces eaux continentales peuvent donner, lorsqu'elles se concentrent par évaporation, une grande variété de saumures : carbonatées sodiques (lac Magadi, lac Tchad), chloro-sulfatées sodiques (Niger, Saline Valley), chlorurées sodiques...

Les conditions nécessaires à l'installation d'un bassin clos sont essentiellement de trois ordres : morphologique (dépression plus ou moins fermée), climatique (l'évaporation doit l'emporter sur les apports) et hydrologique (fermée aux évacuations et infiltrations des saumures).

Nous allons voir maintenant les enseignements que nous apporte l'étude du Bassin Tchadien.

I. — SITUATION DU BASSIN TCHADIEN

La cuvette tchadienne constitue un vaste bassin endoréique de plus de 2 millions de km². Ses grands traits morphologiques actuels résultent essentiellement des alternances climatiques du Quaternaire récent. Au Sud, les grandes plaines correspondent à des zones d'épandage fluvio-lacustre, mises en place durant les périodes pluviales; au Nord du 13^e parallèle, l'erg fixé du Kanem témoigne d'une ancienne période aride (M. et S. Servant, 1970).

Orientées NNW-SSE, les dépressions interdunaires de cet erg ont piégé les sédiments fins argilo-diatomitiques d'une transgression lacustre holocène.

Le lac Tchad actuel constitue le receptacle apparent des tributaires qui drainent le bassin. Il faut toutefois préciser qu'il n'en occupe pas la partie la plus déprimée qui, sous le nom de Pays-Bas, se situe à 500 km au NE du lac (170 m environ). C'est l'ennoyage des cordons dunaires dans le lac qui fait obstacle à l'écoulement des eaux vers cette partie basse du Bassin Tchadien.

II. — LES FACTEURS GÉNÉTIQUES

1. Contexte hydrologique.

Les études hydrologiques (J.L. Schneider, 1967) ont montré que le lac Tchad avec une altitude de 282 m représente un point haut dans le système

hydrologique. Notamment sur sa bordure septentrionale, il est ceinturé à quelques kilomètres de ses rives par une gouttière piézométrique 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 qui lui sont apportés. Il convient donc de le considérer comme un *lac ouvert* (« see-page lake » des auteurs américains) : le problème de sa régulation saline n'est donc qu'un *faux problème*.

En année moyenne, le lac Tchad couvre une superficie d'environ 20 000 km², une profondeur moyenne de 3,4 m et contient un volume de 68 milliards de m³. Les fleuves (dont le Chari pour 95 %) lui apportent annuellement 40 milliards de m³ d'eau, tandis que les précipitations à sa surface contribuent pour 6 milliards de m³.

L'apport en sels solubles a été estimé (M.A. Roche, 1970) à 3 millions de tonnes par an, en y incluant la silice dissoute.

Diverses estimations (M.A. Roche, 1970; J.P. Carmouze, 1972), à partir des bilans hydrologique et salin, permettent d'évaluer les pertes par évaporation à 92,5 % et celles par infiltration à 7,5 % des apports liquides annuels. Pour l'essentiel, ces pertes par infiltration se réalisent sur le rivage nord-est du lac Tchad, précisément là où les dépressions interdunaires sont actuellement le siège d'une sédimentation évaporitique.

2. Contexte climatique.

Le climat, de type subdésertique se caractérise par l'alternance d'une longue saison sèche et d'une courte saison des pluies, des températures élevées et une très grande siccité de l'air.

La pluviosité est de l'ordre de 300 mm par an (juillet-septembre); la température moyenne annuelle est de 28 °C, l'humidité relative de 36 % et l'évaporation de 2 200 mm/an.

Le climat se caractérise donc par un très net *déficit pluviométrique*.

3. Contexte morphologique.

La disposition réciproque des dépressions interdunaires par rapport à la surface de la nappe phréatique constitue le *facteur déterminant* de la dynamique des sels en solution dans cette même nappe.

Les dépressions profondes, recoupant la surface de la nappe phréatique, permettent son affleure-

ment sous forme d'un lac interdunaire. L'endoréisme hydrologique à leur aplomb dû à la dénivellée de l'interdune et à l'évaporation différentielle entre les flancs sableux dunaires et la surface d'eau libre du lac, font que les sels se trouvent bloqués dans ces cuvettes. L'existence de ces lacs interdunaires est liée aux variations interannuelles du niveau du lac Tchad. C'est ainsi qu'en période de baisse de ce dernier, ils pourront s'assécher en précipitant leurs sels, sous une faible tranche d'eau, *de haut en bas et de l'extérieur vers l'intérieur de la cuvette*. Dans le cas d'une dépression interdunaire à la morphologie moins marquée, la nappe phréatique se situe à plus ou moins grande profondeur. Dans le cas d'une nappe sub-affleurante, la granulométrie fine des sédiments permet l'installation d'un régime évaporatoire de type capillaire; les sels précipiteront de *bas en haut* au sein du sédiment.

III. — GÉOCHIMIE

Les eaux du Chari sont bicarbonatées calci-sodiques, faiblement chargées (tableau I). Le lac Tchad va agir comme un bassin de préconcentration, les eaux se chargeant par évaporation du Sud vers le Nord, où elles sont de 10 à 15 fois plus minéralisées qu'à leur débouché dans le delta.

En dehors de cette évolution, le lac est également le siège d'une sédimentation physico-chimique (calcite, néoformations silicatées) et d'une sédimentation biochimique. C'est ainsi que J.P. Carmouze (1972) a pu évaluer en prenant l'ion sodium comme référence que seulement 16, 40, 46, 56 et 64 %

des apports annuels respectivement en SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- et K^+ étaient évacués du lac Tchad. Le lac agit donc comme un bassin de préconcentration, mais également de délestage pour un certain nombre de sels.

Sur le front d'infiltration septentrional, les eaux lacustres ont déjà acquis un faciès *bicarbonaté-carbonaté sodique* qui va s'accroître tout au long de leur cheminement dans l'aquifère dunaire.

Dans les interdunes, les eaux se concentrent selon deux voies : soit par évaporation directe dans le cas d'un lac interdunaire, soit par évaporation capillaire dans le cas d'une nappe subaffleurante.

Dans le premier cas, le résultat sera une zonation saline latérale, en auréoles plus ou moins concentriques, par précipitation à partir des saumures au cours de l'assèchement des lacs interdunaires; dans le deuxième cas, une zonation saline, latérale et verticale, au sein même du sédiment par remontées capillaires. Le premier cas peut être considéré comme *syndépositional*, le second comme relevant d'une diagenèse précoce, analogue à celles mise en évidence dans les sebkhas littorales du Golfe Persique (D.J.J. Kinsman, 1966).

Il est intéressant de noter que dans un même interdune, les deux mécanismes ont joué à plusieurs reprises (en se relayant dans le temps), suivant les fluctuations de niveau du lac Tchad au cours de l'Holocène. Ce que nous observons actuellement dans les profils des interdunes est la *résultante de ces deux mécanismes*.

Cependant bien que la paragenèse soit identique (Calcite, Gaylussite, Nahcolite, Trona, Halite et Magadiite, $\text{NaSi}_7\text{O}_{13}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), les deux mécanismes donnent naissance à deux générations d'individus minéralogiques bien distincts.

TABLEAU I
Données hydrochimiques du bassin Tchadien et de la Green River
(me/l, excepté SiO_2 en mg/l)

LOCALITE	pH	SiO_2	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	HCO_3^-	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	Cl^-
Chari	7,4	22,2	0,22	0,17	0,12	0,05	0,51	—	—	—
Lac Tchad	—	25,5	1,06	0,99	1,55	0,39	3,90	—	—	—
Nappe dunaire	8,7	60	2,52	1,93	10,20	2,88	15,50	0	0,90	1,26
Saumure carbonatée	10,6	3.700	Tr.	Tr.	6.177	191	0,0	5.300	93,8	919,6
Nappe sulfatée	7,4	65	1,5	0,9	1,3	0,5	2,6	0	1,3	0,2
Saumure sulfatée	8,5	145	16,7	61,2	878,7	104,5	25,9	3,5	937,4	19,8
Green river*	—	15,8	3,07	1,66	1,78	0,08	3,63	—	2,41	0,50

* Reconstitué par W.H. Bradley et H.P. Eugster (1969).

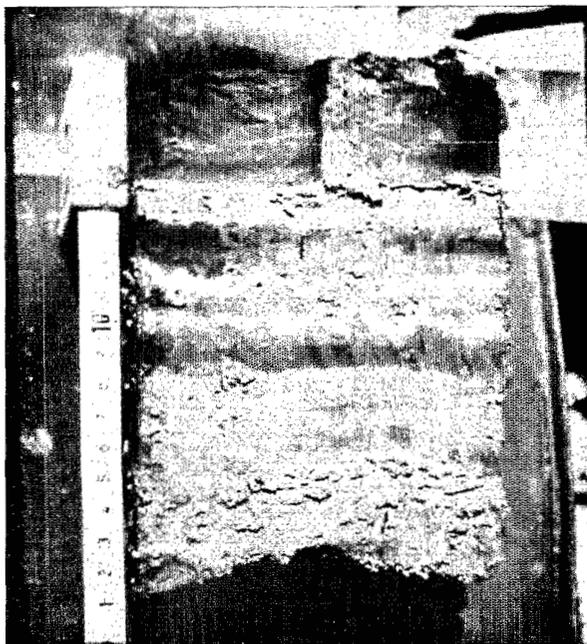


FIGURE 1
Magadiite sous son faciès lité (syndédimentaire).

Au mécanisme syndédimentaire peuvent être attribués les lits monocristaux de gaylussite, dépourvus d'impureté et non maclés; ils sont déposés à plat selon leur face la plus allongée sur de fins lits sableux et respectent la stratification. Les fins lits de magadiite (fig. 1) interstratifiés dans les argiles sont dus au même mécanisme de dépôt; ils viennent se terminer en biseau sur les flancs des dépressions, épousent les ondulations des argiles encaissantes et remplissent parfois d'anciennes fentes de dessiccation.

Au mécanisme de remontées capillaires sont attribuables les gros cristaux de gaylussite, maclés en rameaux et qui contiennent de nombreuses impuretés argileuses. Les concrétions non stratifiées de magadiite relèvent d'une telle mise en place; elles emballent fréquemment des cristaux de gaylussite, de nahcolite et des lits argileux que l'on peut suivre de part et d'autres des concrétions. A la limite lorsque les concrétions deviennent jointives, on retrouve un faciès comparable au « chicken wire » des sebkhas littorales du Golfe Persique (fig. 2).

Une autre originalité apparaît en fonction de l'aération et du drainage des dépressions interdunaires (C. Cheverry, 1971; G. Maglione, 1970). Dans le cas des milieux mal drainés, les sulfates sont bloqués à l'état de sulfures par réduction sulfato-bactérienne: la paragenèse est carbonatée-sodique.



FIGURE 2
Magadiite sous son faciès nodulaire
(diagenèse précoce).

Dans le cas des milieux bien aérés, bien drainés, les sulfates peuvent s'exprimer minéralogiquement et la paragenèse est sulfato-chlorurée sodique (gypse, bloedité, thenardite, halite).

IV. — COMPARAISON AVEC LE MILIEU DE SÉDIMENTATION DE LA GREEN RIVER FORMATION

W.H. Bradley et H.P. Eugster (1969) ont pu, par leurs minutieuses études, reconstituer le milieu de sédimentation de la Green River Formation au cours de l'Éocène. Les principales caractéristiques en sont reportées dans le tableau II et comparées au lac Tchad actuel (fig. 3).

L'époque éocène se caractérise en Amérique du Nord par la création d'un chapelet de lacs dans les bassins intérieurs du Wyoming, de l'Utah et du Colorado. Ceinturé par une série de hauteurs, le bassin de la Green River résulte d'une lente subsidence commencée au Paléozoïque et qui s'est continuée jusqu'à la fin de l'Éocène. Au début de l'Éocène, on assiste à la création d'un lac d'eau douce de 32 000 km² muni d'un exutoire vers le Sud. La série déposée en 1 million d'années constitue le *Tipton Shale Member*. Elle est formée de sédiments très organiques, schistes papyracés bitumineux, marnes.

TABLEAU II
Caractéristiques du lac Gosiute éocène et du lac Tchad actuel

	Lac Gosiute	Lac Tchad
Bassin Versant (km ²)	126.000	600.000
Surface du lac (km ²)	10 – 16.000	20.000
Occupation du lac (%)	7,9 – 12,7	3,3
Pluviosité (mm)	480	300
Température (°C)	22	28
Evaporation (mm)	1 500	2 100
Débit liquide des tributaires (m ³ /an)	4,16.10 ⁹	40.10 ⁹
Apports en sels (T/an)	2,13.10 ⁶	3.10 ⁶
Quantité de sels déposés (T/an)	0,10.10 ⁶	1,4.10 ⁶ *

* Quantité déposée dans les interdunes du Kanem.

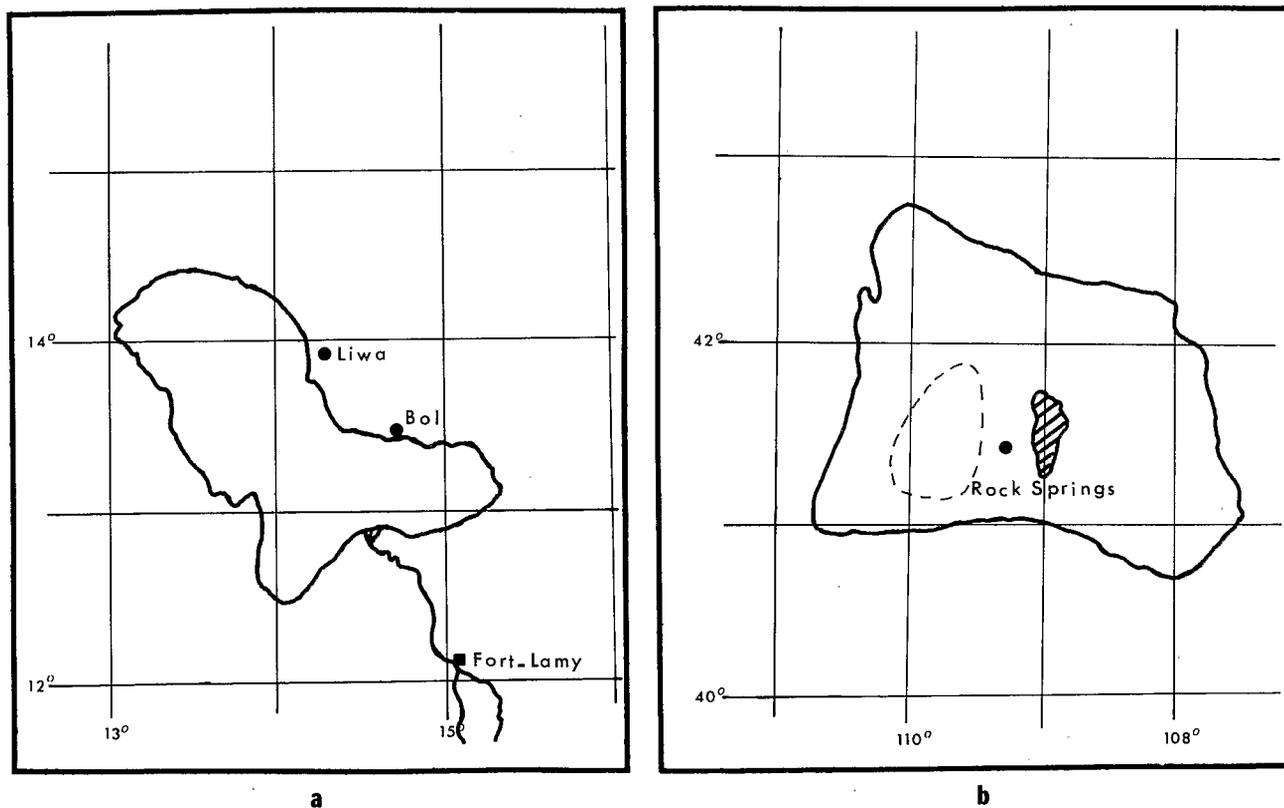


FIGURE 3
Comparaison du lac Tchad (a) avec le lac Gosiute (b) à son maximum d'extension éocène.

A la fin de cette époque, un changement climatique survient; le lac Gosiute rétrécit de moitié et devient un lac clos, sans émissaire. Cette phase qui dure environ 1 million d'années voit se déposer des séquences comprenant schistes bitumineux, calcaires dolomitiques, du trona et de la halite, qui se répètent une cinquantaine de fois dans cette série épaisse de 430 m (*Wilkins Peak Member*).

Puis un nouveau changement climatique apparaît; le lac « transgresse », atteint son maximum d'extension (40 000 km²) et reconstitue son émissaire. La série déposée pendant les 2 millions d'années que dure cette phase forme le *Laney Shale Member*, constitué de marnes brunes, calcaires, grès, schistes bitumineux et de tufs volcaniques. A la fin de cette période, le lac disparaît par comblement du bassin sous l'effet de l'accumulation de sédiments et de cendres volcaniques et par un arrêt de la subsidence. Une sédimentation fluviale s'installe à nouveau.

Pendant la plus grande partie du temps que dure le dépôt du *Wilkins Peak Member*, l'exposition à l'air est attestée par des figures de dessiccation. Comme tous les lacs clos, le lac Gosiute connaissait des fluctuations fréquentes en surface et en profondeur; les dépôts de trona et de halite correspondant aux phases de rétraction lacustre, les dépôts de marnes et de schistes bitumineux à des phases d'extension.

Le modèle proposé par les auteurs est celui d'un bassin où se succèdent des périodes de faible ennoyage et des périodes plus sèches avec une sédimentation de type playa. C'est en quelque sorte un modèle comparable à la « sebkha littorale » définie par D.J.J. Kinsman à Abu Dhabi (1966), mais dans le domaine continental.

Lac Tchad actuel et lac Gosiute éocène présentent un certain nombre de ressemblances. Cependant à l'emplacement même du lac Tchad, les plus profonds sondages (70 à 100 m) n'ont jamais mis en évidence d'évaporites interstratifiées dans les séries lacustres quaternaires, bien que des témoins d'un assèchement du lac Tchad existent. Dans les interdunes plus éloignées du lac, où la nappe est à plus grande profondeur, seules les associations de diatomées (M. et S. Servant, 1970) montrent les variations importantes de salinité qu'ont connues les lacs interdunaires au cours de l'Holocène, notamment lors des « transgressions » lacustres, par remontée de la nappe phréatique qui ennoye certaines dépressions interdunaires.

Il semble bien que la disposition hydrogéologique actuelle ait toujours plus ou moins prévalu au cours des derniers millénaires.

L'évacuation des sels par infiltrations latérales ne semble jamais avoir permis au lac Tchad d'atteindre une salinité suffisante pour permettre

la précipitation des sels les plus solubles; les seuls dépôts évaporitiques importants ont été et sont actuellement confinés dans les interdunes qui ont joué et jouent le rôle de pièges. Dans ce cas le mécanisme procède essentiellement par remontées capillaires (et relève d'une *diagenèse précoce*), mais aussi par précipitation directe synsédimentaire dans les lacs interdunaires.

Ces sels recyclés à chaque remontée du niveau de la nappe phréatique participent pour une grande part à sa minéralisation actuelle. Une évaluation grossière des sels solubles contenus dans la nappe phréatique (en prenant la valeur moyenne interannuelle des apports par les fleuves comme constante durant l'Holocène) montre qu'ils correspondent à 4 000 ans; le lac Tchad à 320 m est daté d'environ 6 000 ans BP. (M. et S. Servant, 1970).

Si le lac Tchad n'était pas un lac « ouvert » et au taux d'apport qui est le sien, il faudrait à peine 200 000 ans pour déposer les 100 milliards de tonnes de sels de la Green River Formation qui représentent un intervalle de temps de 800 000 ans.

BIBLIOGRAPHIE

- BRADLEY, W.H. et EUGSTER H.P. (1969). — Geochemistry and Paleolimnology of the trona deposits and associated authigenic minerals of the Green River formation of Wyoming. *U.S. Geol. Surv.*, Prof. Paper 496-B, 71 p.
- CARMOUZE J.P. (1972). — Originalité de la régulation saline du lac Tchad. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, t. 275, p. 1871-1874.
- CHEVERRY C. (1971). — Les premières étapes de la poldérisation sur les bordures nord-est du lac Tchad. *Rapport O.R.S.T.O.M.*, Centre de Fort-Lamy, 38 p.
- KINSMAN D.J.J. (1966). — Gypsum and anhydrite of recent age, Trucial Coast, Persian Gulf, in : *Second Symposium on salt*, Northern Ohio Geol. Soc., V.1, p. 302-326.
- MACLIONE G. (1970). — Le gisement chloro-sulfaté sodique de l'île de Napal. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Géol., II, 1, p. 81-94.
- ROCHE M.A. (1970). — Evaluation des pertes du lac Tchad par abandon superficiel et pertes marginales. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Géol. II, 1, p. 67-80.
- SCHNEIDER J.L. (1967). — Relations entre le lac et la nappe phréatique (République du Tchad). Extrait publication n° 70, A.I.H.S., *Symposium de Garda*, p. 122-131.
- SERVANT M. et S. (1970). — Les formations lacustres et les diatomées du Quaternaire récent du fond de la cuvette tchadienne. *Rev. Géogr. phys. Géol. dynam.*, (2), vol. XII, fasc. 1, p. 63-76.
- Depuis le dépôt de cet article, les travaux des chercheurs de l'ORSTOM ont fait l'objet de mémoires de thèse :
- SERVANT M. et ROCHE M., 1973; MACLIONE G., 1974 : Université Paris-VI.
- CHEVERRY C., 1974 : Université de Strasbourg.