

ÉVOLUTION HYDROCHIMIQUE DU LAC TCHAD DE SEPTEMBRE 1973 A SEPTEMBRE 1975 AU COURS D'UNE PHASE DE DÉCRUE

JEAN-MARIE CHANTRAINE*

*Hydrobiologiste O.R.S.T.O.M.
O.R.S.T.O.M. B.P. 65, N'Djamena, Tchad*

RÉSUMÉ

Cette note décrit l'évolution chimique des eaux du lac Tchad au cours d'une phase de baisse exceptionnelle de son niveau. En avril 1973, le lac était scindé en trois grandes zones : les Eaux-Libres du sud-est, l'archipel du sud-est et la cuvette nord. Les Eaux-Libres du sud-est, reliées au système fluvial, sont le siège d'un cycle annuel qui ne présente pas de variations importantes d'une année à l'autre. L'archipel du sud-est, réalimenté annuellement par la crue du Chari, a un comportement très particulier et mal défini. La cuvette nord a reçu très peu d'apports pendant 15 mois : sous l'effet de l'évaporation, son niveau a baissé d'environ 2,5 m. L'eau s'est donc considérablement concentrée. La conductivité moyenne est passée de 600 à 3500 $\mu\text{mho/cm}$ à 25 °C, provoquant la précipitation de carbonates et de silicates de calcium et de magnésium.

ABSTRACT

VARIATIONS OF THE HYDROCHEMICAL FEATURES OF THE LAKE CHAD FROM SEPTEMBER 1973 TO SEPTEMBER 1975
DURING A LOWERING LEVEL PERIOD

The chemical features of the lake Chad waters during a lowering level period are described. Since April 1973, the lake has been divided into three areas : in the south-east an open water basin, connected with the Chari, which undergoes a yearly cycle ; the south-eastern archipelago supplied once a year with the flood of the Chari, behaves very particularly ; the northern basin which received very little water during 15 months. The level of the latter has lowered by 2,5 m due to evaporation, and the water concentration increased considerably, bringing out the precipitation of calcium and magnesium salts : carbonates and silicates. The average electrical conductivity raised from 600 to 3500 $\mu\text{mho/cm}$ at 25 °C.

1. INTRODUCTION

Les crues du Chari de 1972-73 et 1973-74, très déficitaires (de volumes annuels respectifs 17,5 et 18.10⁹ m³ contre 40.10⁹ m³ pour la crue médiane) ont marqué une phase critique de décrue du lac

Tchad amorcée en 1964, par l'assèchement partiel de la cuvette sud à la mi-1973 (seules subsistaient les Eaux-Libres du sud-est et quelques nappes d'eau isolées dans l'archipel du sud-est), et l'assèchement total de la cuvette nord à la fin de 1975.

La crue 1974-75, bien que plus importante

* Adresse actuelle : Mission O.R.S.T.O.M., Cajón Postal 8714, La Paz (Bolivie)

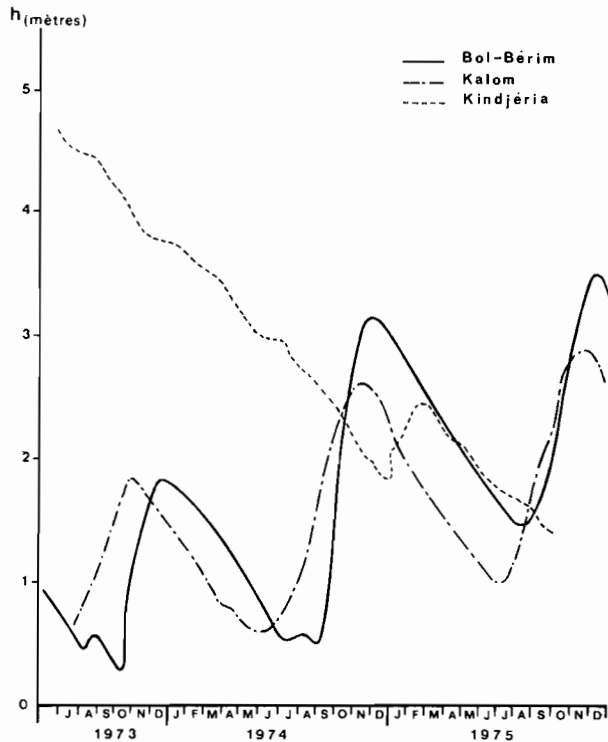


Fig. 1. — Cotes relatives des trois principaux plans d'eau du lac Tchad en 1973, 1974 et 1975. Les zéros des échelles ne sont pas calés.

Relative heights of the three main water masses of the lake Chad in 1973, 1974 and 1975. The low-water standards are not adjusted.

($30,5 \cdot 10^9 \text{ m}^3$) mais encore inférieure à la médiane. n'a pu réalimenter que faiblement la cuvette nord et retarder ainsi son assèchement de quelques mois. La crue 1975-76 ($36,7 \cdot 10^9 \text{ m}^3$) semble montrer le début d'un retour à la normale.

Ces variations importantes de niveau des plans d'eau ont entraîné des modifications profondes des paysages et de la salure des eaux. L'évolution hydrologique et morphologique du lac pendant la période d'observations est décrite en détail (CHOURET, FRANC, LEMOALLE, 1974), (CHOURET, LEMOALLE, 1974), (CHOURET, LEMOALLE, 1975). Nous ne ferons ici que rappeler les traits essentiels de cette évolution, visualisés par des cartes.

2. ÉVOLUTION HYDROLOGIQUE ET MORPHOLOGIQUE

Les niveaux des plans d'eau étudiés ont été enregistrés par le service hydrologique de l'O.R.S.T.O.M.,

au moyen de limnigraphes installés à Kindjéria (cuvette nord), Bol-Bérim (archipel du sud-est), Kalom (Eaux-Libres du sud-est). Les variations des cotes sont représentées sur la figure 1. Les observations des paysages ont été effectuées par des reconnaissances aériennes.

Afin de préciser davantage l'évolution des paysages, nous avons représenté sur la figure 2 la physionomie du lac à la cote 281,5 m (cote moyenne du plan d'eau de 1968 à 1971) et qui correspond sensiblement à l'état de « Tchad normal » d'après la classification établie par TILHO (1928).

Juillet 1973 : La cuvette nord est coupée du reste du lac par l'exondation de la « Grande Barrière ». De nombreuses îles sont apparues. Le rivage ouest a reculé de 5 km par rapport à son ancien tracé. Les Eaux-Libres du sud-est se réduisent à une poche d'eau de faible profondeur devant le delta du Chari. L'archipel du sud-est est morcelé en trois principales nappes d'eau. Les zones exondées se sont recouvertes d'une végétation très dense sauf dans le nord (fig. 3a).

Décembre 1973 : Jusque là le Chari s'est déversé dans la poche des Eaux-Libres du sud-est qui s'agrandit. Les zones précédemment exondées, alors recouvertes de végétation, sont remises en eau. Toutefois, les macrophytes ne sont pas totalement recouverts. Une faible quantité d'eau de couleur noire réussit à franchir la « Grande Barrière ». Les Eaux-Libres de la cuvette nord se fractionnent en deux poches principales à la suite de l'exondation de nombreuses îles sableuses (fig. 3b).

Juillet 1974 : Depuis décembre 1973, les niveaux des trois plans d'eau décroissent régulièrement jusqu'en juin-juillet où la nouvelle crue du Chari commence à alimenter les Eaux-Libres du sud-est. Les niveaux d'eau se retrouvent dans la cuvette sud sensiblement les mêmes que douze mois auparavant. La cuvette nord, qui a reçu très peu d'apports en décembre, a vu son niveau baisser de 1,90 m pendant cette période. La zone d'eaux libres est devenue archipel par l'apparition de très nombreuses îles, alors que des seuils apparaissent entre les îles de l'archipel traditionnel.

Janvier 1975 : La cuvette sud est inondée et les cotes à Bol-Bérim et à Kalom sont appréciables, respectivement de 1,30 m et 0,80 m supérieures à celles de l'année précédente. La « Grande Barrière » est submergée par une eau chargée de matière organique qui se déverse dans la cuvette nord dont le niveau remonte de 0,60 m. L'archipel du nord-est s'étend (fig. 3c).

Juillet 1975 : Dans la cuvette sud, peu de changements par rapport à l'année précédente à l'étiage, sinon une plus forte cote d'eau. Par contre, la cuvette nord se réduit à une zone de mares isolées au nord-ouest de Kindjéria. On y note cependant une faible extension de la végétation (fig. 3d).

Novembre 1975 : La zone des Eaux-Libres du sud-est s'est bien étendue, alimentant l'archipel du sud-est et la partie sud-ouest de la cuvette sud, et réussissant à franchir la « Grande Barrière ». Cependant, le nord de la cuvette nord s'est complètement asséché et le lac présente dans son ensemble la physionomie décrite par TILHO en 1908 (fig. 3e et 3f).

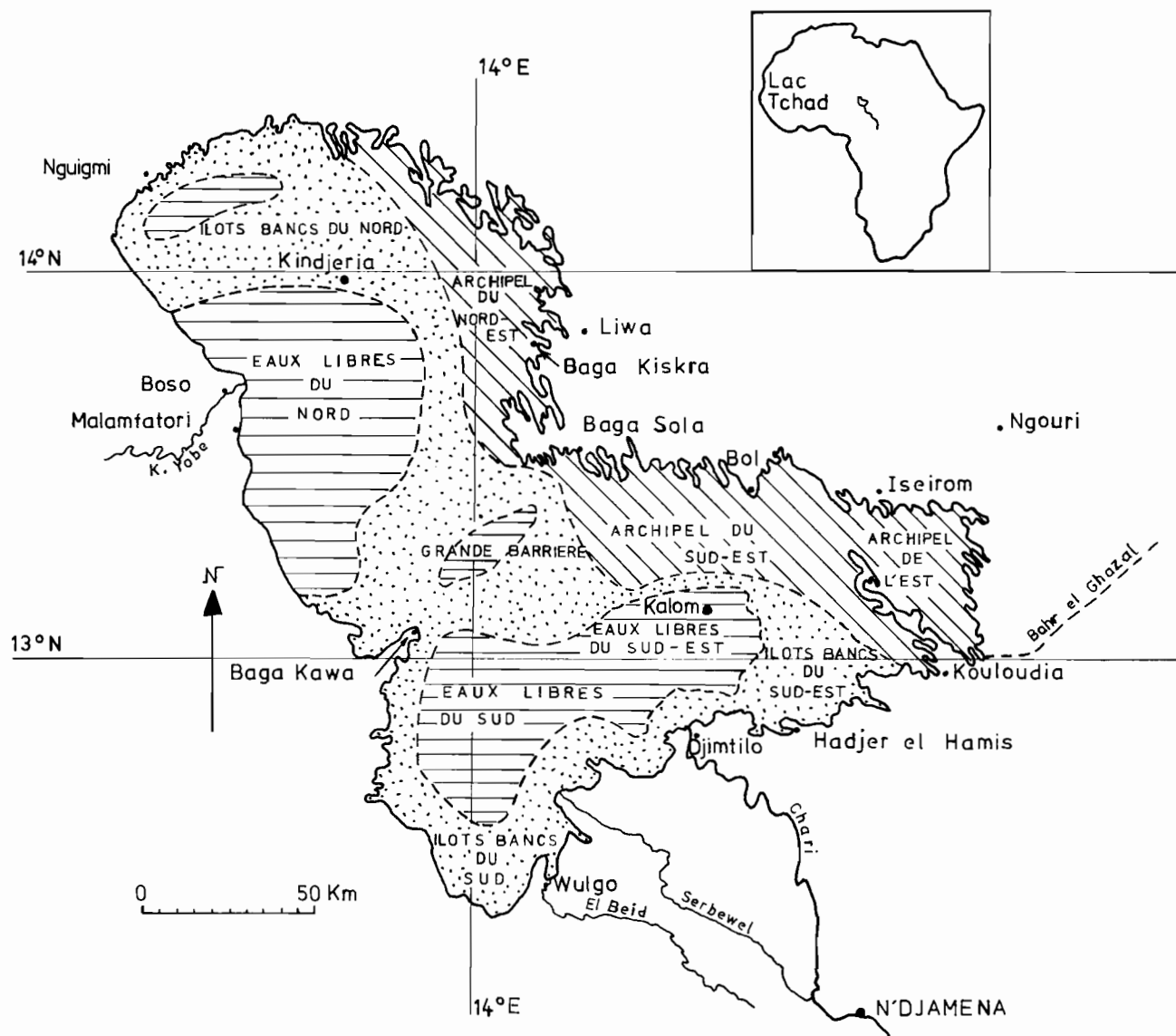


Fig. 2. — Régions naturelles du lac Tchad à la cote 281,5 m.
Natural regions of the lake Chad at the water height 281,5 m.

Depuis avril 1973, le lac est scindé en trois grandes zones, les Eaux-Libres du sud-est reliées directement au système fluvial, l'archipel du sud-est réalimenté annuellement par la crue du Chari et la cuvette nord peu ou pas alimentée. Ces trois masses d'eau présentant chacune une individualité propre, nous les avons étudiées séparément.

3. CONSÉQUENCES SUR L'HYDROCHIMIE

3.1. Méthodes : prélèvements et analyses

L'absence de stratification due à une faible profondeur et à l'action quasi-permanente des vents,

nous a permis de nous limiter à l'analyse d'eaux de surface. Les échantillons d'eau ont été prélevés à une vingtaine de centimètres au-dessous de la surface et stockés avant analyse dans des flacons en polyéthylène de un à quinze jours selon leur provenance, étant donné l'accès difficile dans certaines régions du lac. Il se peut que le temps de stockage relativement important, particulièrement pour les eaux de la cuvette nord, ait quelque peu faussé les analyses et cela d'autant plus que la turbidité des eaux était grande.

La fréquence des tournées était fixée à deux tous les trois mois dans les Eaux-Libres du sud-est et à une tous les deux mois dans l'archipel du sud-est et la cuvette nord.



Fig. 3. — Cartes schématiques du lac Tchad. a) en juillet 1973 ; b) en décembre 1973 ; c) en janvier 1975 ; d) en juillet 1975 ; e) en novembre 1975 ; f) au début 1978. a, b, c, d, e d'après CHOURET, FRANC, LEMOALLE (1974, 1975). f d'après les documents de la mission TILHO (1910). Les contours sont le rivage du lac à la cote 281,5 m.

Schematic maps of the lake Chad. a) in July 1973 ; b) in December 1973 ; c) in January 1975 ; d) in July 1975 ; e) in November 1975 ; f) at the beginning of 1978. a, b, c, d, e from CHOURET, FRANC, LEMOALLE (1974, 1975). f from the documents of the Tilho mission (1910). The outlines are the shoreline of the lake at the water height 281,5 m.

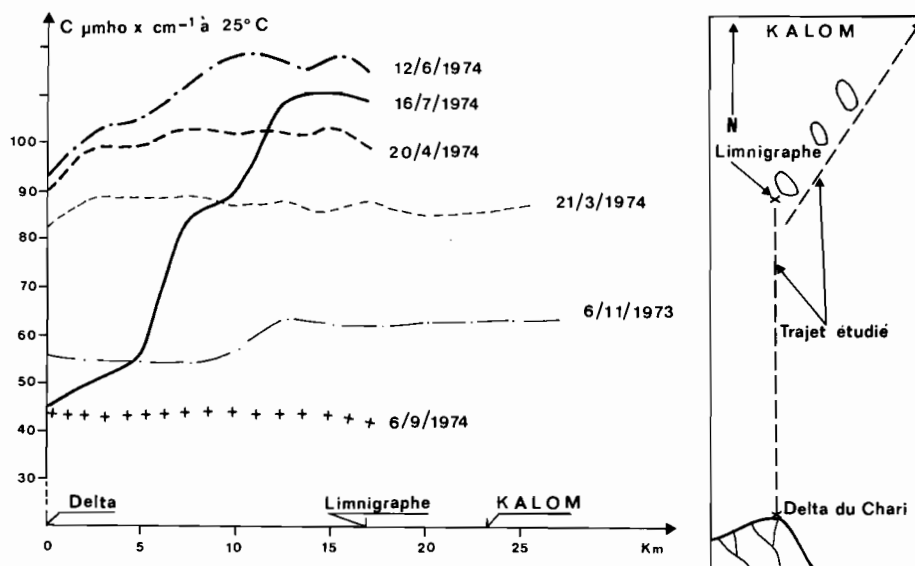
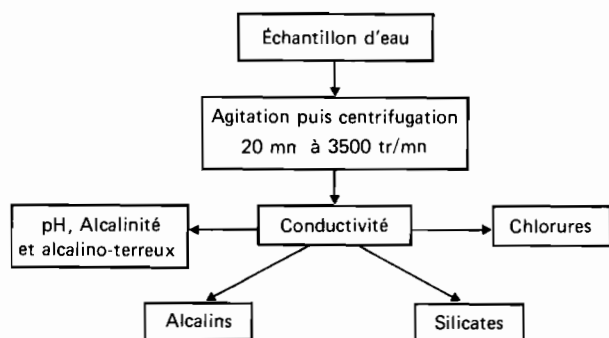


Fig. 4. — Évolution spatio-temporelle des conductivités des Eaux-Libres du sud-est. Space-time variations of the electrical conductivities of the south-eastern open water basin.

L'analyse physico-chimique a été menée selon le schéma suivant :



Les conductivités, ramenées à 25 °C sont exprimées en $\mu\text{mho/cm}$. La précision des mesures est de 5 %.

Étant donné le délai parfois important d'acheminement des échantillons au laboratoire, la mesure du pH n'a que peu de signification.

Les mesures de l'alcalinité, des alcalino-terreux et des chlorures ont été déterminées à l'aide d'un potentiographe enregistreur, la première par pH-métrie, la seconde potentiométriquement par une méthode complexométrique classique utilisant l'E.D. T.A., la troisième par argentimétrie. L'erreur maximum sur l'alcalinité et le calcium est de 5 % et sur le magnésium de 7,5 %. Il semble que pour les eaux de la cuvette nord, très chargées en particules et en matière organique, l'erreur commise sur les

alcalino-terreux soit plus importante. La précision sur les chlorures est supérieure à 5 %.

La détermination des alcalins a été faite par spectrophotométrie de flamme. La précision sur le sodium est de 5 % et de 7,5 % sur le potassium.

Les dosages des silicates ont été effectués au Technicon par colorimétrie du complexe silicomolybdique. L'erreur absolue est de 0,25 mg/l. La précision augmente donc avec la concentration.

Ces méthodes sont celles préconisées par GOLTSMAN (1969).

Les résultats bruts d'analyse sont rassemblés sous forme de tableaux accompagnés des cartes des lieux de prélèvement (CHANTRAINE, LEMOALLE, 1976 a et b).

3.2. Description de la salure globale dans l'espace et le temps

3.2.1. EAUX-LIBRES DU SUD-EST

La figure 4 représente à droite le trajet emprunté pour la récolte des échantillons et à gauche les variations de conductivité des eaux le long de ce trajet à différentes époques. De novembre 1973 à mars 1974, les eaux sont à peu près uniformes dans la cuvette et de même conductivité que celles du Chari. Elles se concentrent régulièrement par évaporation. En avril, la courbe s'infléchit vers les basses conductivités dans la zone du delta. Ce fléchissement

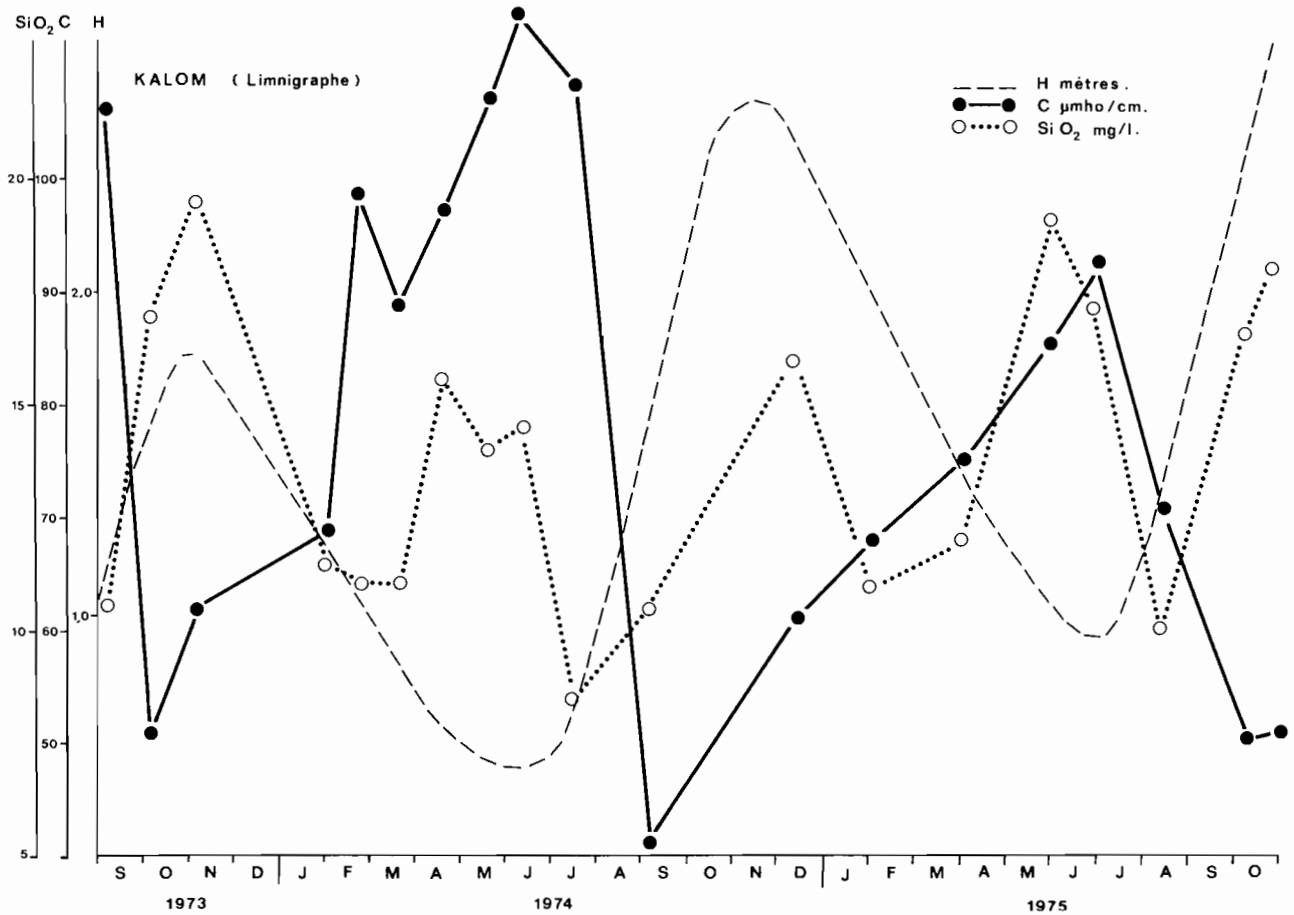


Fig. 5. — Évolutions dans le temps de la cote, de la conductivité et de la teneur en silice dissoute dans les Eaux-Libres du sud-est, au limnigraphe de Kalom.

Time-variations of the water height, the electrical conductivity and the dissolved silica concentration in the south-eastern open water basin, at the water-gauge of Kalom.

s'accroît jusqu'en juin et s'explique par une dilution de ces eaux par celles du Chari, moins concentrées. En juillet, début de la crue du Chari, les eaux du fleuve dont la conductivité est deux fois moins forte, chassent la masse d'eau de la cuvette, de conductivité 110 $\mu\text{mho/cm}$, vers la périphérie. Ces eaux refoulées vont alimenter l'archipel du sud-est en septembre et la cuvette nord en décembre. En septembre 1974, la masse d'eau de la cuvette est à nouveau uniforme comme l'année précédente et de conductivité sensiblement égale à celle du Chari : 43 $\mu\text{mho/cm}$.

La figure 5 rend compte de l'évolution, en fonction du temps, de la hauteur d'eau, de la conductivité et de la teneur en silice dissoute au limnigraphe de Kalom. On remarque que la conductivité diminue

lorsque la cote croît (crue du Chari) et inversement, elle augmente lorsque la cote décroît (évaporation). Le comportement de la silice diffère (fig. 8 f₁). La teneur augmente à la crue (1) puis elle diminue avant d'augmenter à nouveau pendant la phase de baisse. Ceci est en accord avec les travaux de CARMOUZE (1976) qui chiffrent à 48 % le taux de silice qui sédimente par voie biogéochimique dans cette cuvette. On constate cependant que le processus d'élimination a lieu surtout à l'arrivée de l'eau de crue dans la cuvette.

Le même cycle se reproduisant à peu près identiquement chaque année, nous ne l'avons schématisé qu'au cours d'une année. Cette cuvette peut donc être considérée comme une extension du système fluvial et assimilée à un delta du point de vue

(1) La teneur moyenne du Chari en silice dissoute au moment de la crue est de l'ordre de 20 mg/l (mg de SiO_2).

limnchimique, hypothèse qui avait déjà été formulée d'après des considérations écologiques (CARMOUZE *et al.*, 1972, p. 166).

3.2.2. ARCHIPEL DU SUD-EST

Parmi les trois masses d'eau principales qui constituent cet archipel, une seule a été étudiée. Le trajet se situe entre la presqu'île de Bérém à 3 kilomètres au sud-est de Bol et l'île de Lafia à 18 kilomètres au sud-est de Bol (fig. 6).



Fig. 6. — Détail de la région étudiée dans l'archipel du sud-est. Le tireté indique le trajet suivi périodiquement et la flèche le sens du courant au moment de la crue.

Map of the studied region in the south-eastern archipelago. The discontinuous line indicates the periodically followed course; the arrow points the stream direction at the flood.

Il n'y a pas d'importantes variations spatiales de conductivité sauf au moment de la remise en eau

d'une partie de l'archipel en septembre-octobre, qui reçoit des eaux plus diluées. Ces dernières eaux, repoussées par la crue du Chari, ont pour conductivité 110 $\mu\text{mho/cm}$. Traversant environ 20 kilomètres d'une zone de mares résiduelles, de sédiments exondés et de végétation dense, elles se chargent en sels et en matières organiques. La conductivité moyenne des eaux de l'archipel est passée entre septembre et décembre 1973 de 500 à 180 $\mu\text{mho/cm}$. Le niveau de l'eau qui était alors monté de 1,60 m se met à baisser fin décembre. Il semble d'après les observations que l'eau arrive par le sud de Bol et continue vers le sud-est après avoir contourné l'île de Yakoua en face de Bérém (fig. 6).

Une fois le bassin en charge par rapport à la cuvette d'alimentation, on assiste à un retour partiel des eaux vers le sud. Cet effet, augmenté de celui de l'évaporation, fait baisser le niveau du plan d'eau qui se retrouve isolé du reste du lac vers mars-avril et se comporte comme un bassin d'évaporation. Fin septembre 1974, la conductivité était de l'ordre de 330 $\mu\text{mho/cm}$ à Bérém. Elle est tombée à 250 en 13 jours, puis à 100 à la mi-décembre. La conductivité finale (1) à la fin de la remise en eau est variable d'une année à l'autre, selon la charge dissoute de l'eau d'alimentation.

3.2.3. CUVETTE NORD

Le niveau d'eau ayant beaucoup baissé, d'innombrables petites îles sont apparues et, la profondeur étant très faible, la navigation entre ces îles était très difficile. Aussi le prélèvement des échantillons n'a pas toujours été aussi fructueux qu'on l'aurait souhaité. Dans la mesure du possible, nous avons effectué des radiales dont le centre de symétrie était Kindjéria, île située au milieu de la cuvette.

En septembre 1973, la cuvette était isolée du reste du lac, ne recevant que les faibles apports de la Komadougou-Yobé et les précipitations. En décembre, les eaux de crue réussissent à s'infiltrer, en surface et en profondeur, à travers la « Grande Barrière », comblant ainsi le déficit dû à l'évaporation et aux infiltrations pendant un mois (CHOURET, LEMOALLE, 1974). Tout au long de l'année 1974, la baisse a continué à la moyenne de 177 mm par mois.

Jusqu'à la fin 1974, les conductivités des eaux étaient à peu près régulièrement réparties autour de Kindjéria dans les directions est, ouest et nord, augmentant vers la périphérie de la cuvette, alors que le gradient de conductivité vers le sud-ouest était pratiquement nul, probablement à cause de l'alimentation saisonnière de la cuvette par des eaux

(1) 165 $\mu\text{mho/cm}$ en 1973 et 105 $\mu\text{mho/cm}$ en 1974.

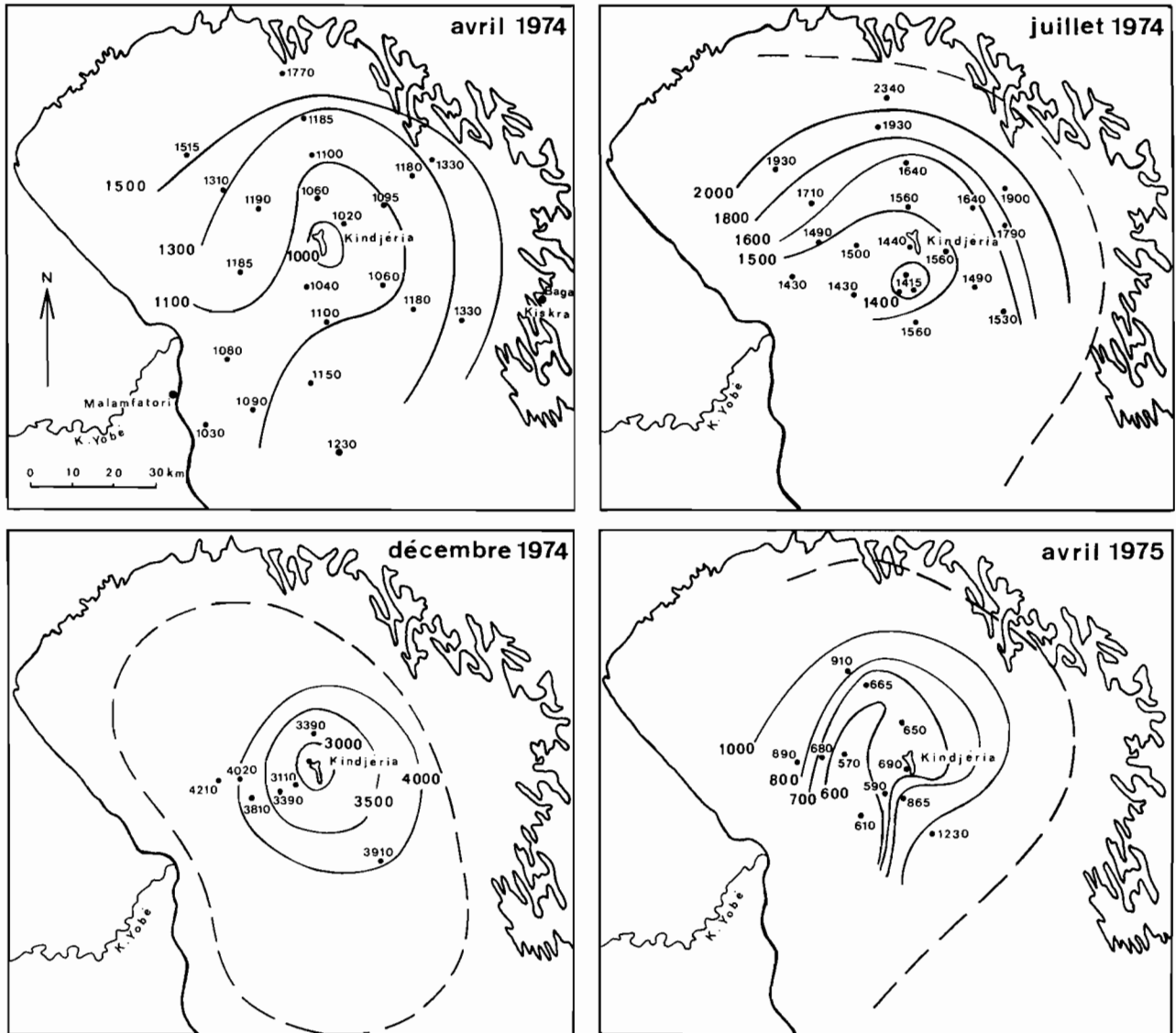


Fig. 7. — Évolution des courbes d'isoconductivité dans la cuvette nord d'avril 1974 à avril 1975. Le tireté indique la limite approximative du rivage.

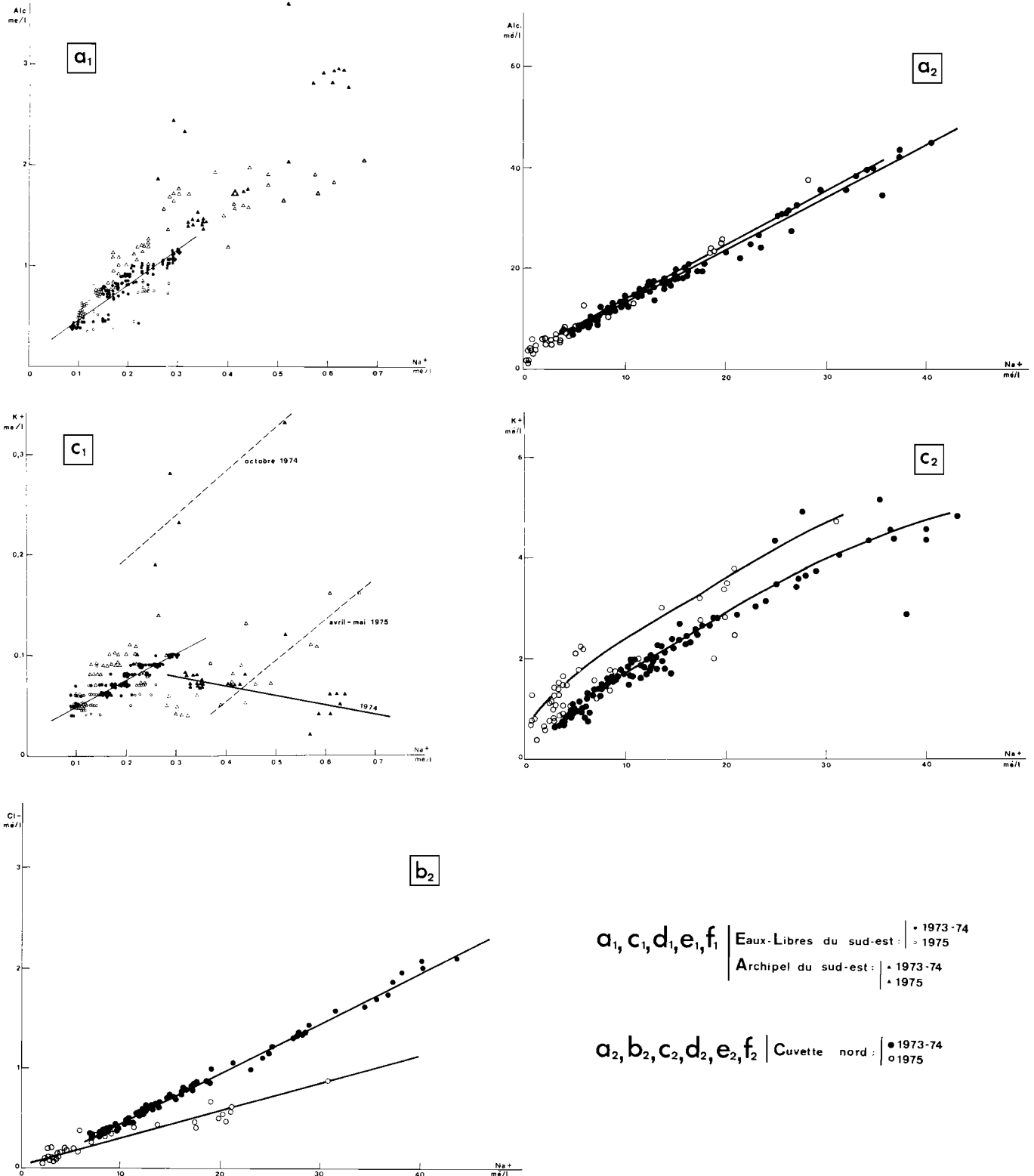
Variations of the equal electrical conductivity curves in the northern basin from April 1974 to April 1975. The discontinuous line indicates approximately the shoreline.

plus diluées provenant de cette direction : celles de la Komadouyou-Yobé et celles de la cuvette sud. Dans les autres directions, les gradients étaient comparables au cours d'une même tournée. Ils étaient égaux à 5, 15, 20 et 45 $\mu\text{mho/cm}$ par kilomètre respectivement en novembre 1973, avril, juillet et décembre 1974 (fig. 7).

Début 1975, les eaux de crue ont traversé la « Grande Barrière » et dilué les eaux résiduelles de la cuvette. A Kindjéria, la conductivité est passée de 2 900 à 700 $\mu\text{mho/cm}$ en 2 mois. Malgré cet apport

(environ 60 cm d'eau), il ne restait plus en juillet que quelques mares isolées autour de Kindjéria et qui se sont asséchées complètement en novembre.

Le comportement de la silice dans cette cuvette est anarchique (fig. 8 f₂). Les courbes d'isoconcentration ne peuvent être établies. Le phénomène de sédimentation au sens large semble encore moins continu que dans les Eaux-Libres du sud-est. On a constaté en avril 1974 un « trou » de silice d'environ 400 km² qui peut être dû à la prolifération des diatomées à test siliceux (ILTIS et LEMOALLE, 1975).



a_1, c_1, d_1, e_1, f_1 | Eaux-Libres du sud-est : \bullet 1973-74
 \circ 1975
 Archipel du sud-est : \blacktriangle 1973-74
 \blacktriangle 1975

$a_2, b_2, c_2, d_2, e_2, f_2$ | Cuvette nord : \bullet 1973-74
 \circ 1975

Fig. 8 a-c. — Concentration des espèces dissoutes en fonction du sodium. a) alcalinité ; b) chlorures ; c) potassium : 1) dans les eaux libres du sud-est et l'archipel du sud-est. 2) dans la cuvette nord.
 Concentration of the various ions as variables dependent on sodium. a) alkalinity ; b) chlorides ; c) potassium. 1) in the south-eastern archipelago and open water basin. 2) in the northern basin.

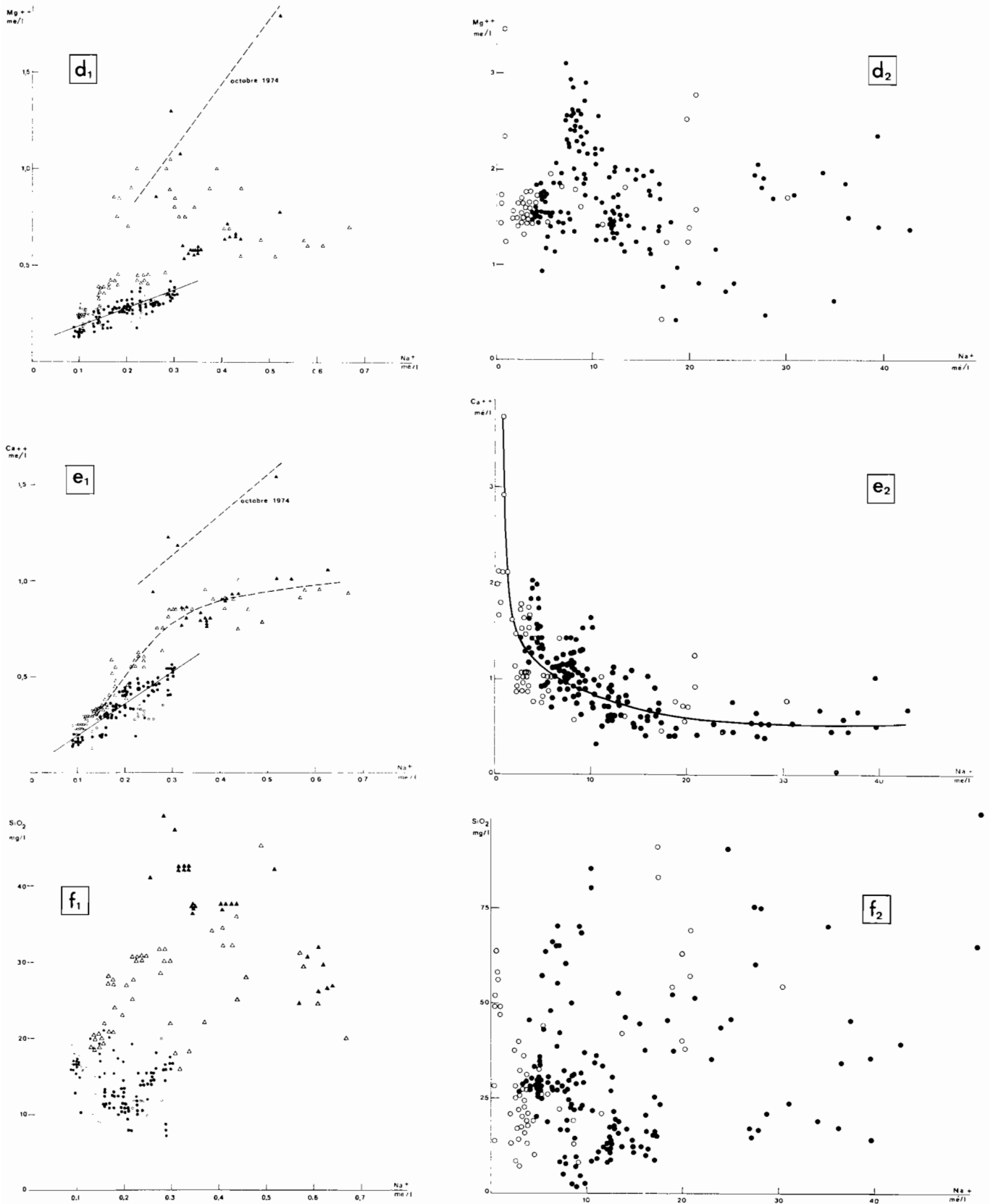


Fig. 8 d-f. — (voir fig. 8 a-c). d) magnésium ; e) calcium ; f) silice dissoute (dissolved silica).

3.3. Description des salures spécifiques

La conductivité n'est un bon indice de la salure des eaux que dans la mesure où leur composition ne varie pas et si la salure n'est pas très élevée (inférieure à 1 g/l). De plus, si des sédimentations ont lieu au sein d'une eau qui se concentre, la composition de l'eau change et la conductivité ne peut servir de base au calcul du facteur de concentration. Or les eaux de la cuvette nord ont pour la plupart une salure supérieure à 1 g/l et sont en outre le siège de précipitations différentielles (CARMOUZE, 1976). C'est pour ces raisons que le sodium a été choisi comme traceur dans l'étude des salures spécifiques. En effet, l'ion sodium est peu réactif et ne s'élimine dans le lac que par infiltration (CARMOUZE, 1976).

3.3.1. ANIONS

L'alcalinité est proportionnelle au sodium avec un facteur de proportionnalité légèrement différent selon la masse d'eau considérée (fig. 8 a₁ et a₂).

La sensibilité du dosage de chlorures est telle que seules les valeurs obtenues pour les eaux de la cuvette nord sont significatives. L'examen de la figure 8 b₂ montre leur proportionnalité au sodium. Les points obtenus en 1975 forment une droite de pente différente. En effet, les eaux correspondantes sont celles qui proviennent de la cuvette sud, peu chargées en chlorures et qui traversent une vaste zone de sédiments exondés et de mares résiduelles avant de réalimenter la cuvette nord, repoussant plus vers le nord les eaux primitives que ne se mélangeant avec celles-ci.

3.3.2. CATIONS

3.3.2.1. Potassium

La variation du potassium est complexe du fait de son important rôle biologique (fig. 8 c₁ et c₂).

Dans les Eaux-Libres du sud-est, elle est proportionnelle au sodium. Dans l'archipel du sud-est, elle ne suit pas de loi bien définie. En effet, en 1974, elle est linéaire décroissante jusqu'en octobre où l'on constate une très forte concentration correspondant aux eaux de crue qui alimentent l'archipel après la traversée d'une zone à sédiments exondés et à végétation très dense (1). Début 1975, la teneur décroît mais se remet à croître en avril-mai. A l'époque de la crue, on n'observe pas d'augmen-

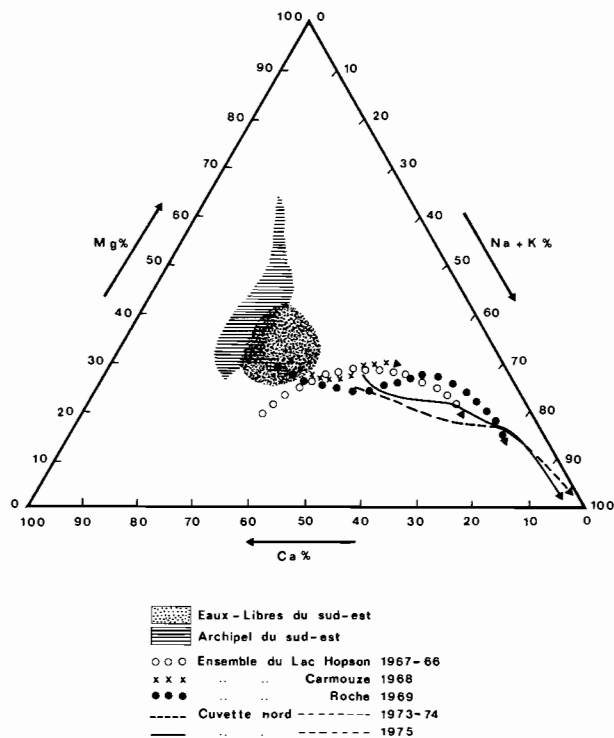


Fig. 9. — Diagramme des teneurs cationiques des eaux du lac Tchad. Le sens des flèches indique une augmentation de conductivité.

Cations concentrations diagram of the lake Chad waters. The direction of the arrows indicates an increase of the electrical conductivity.

tation notable comme l'année précédente probablement à cause d'une barrière végétale moins dense et d'une masse d'eau plus importante.

Dans la cuvette nord, les variations sont linéaires croissantes pour les deux années avec un appauvrissement pour les fortes concentrations en sodium, ce qui confirme une réactivité plus forte du potassium par rapport au sodium.

3.3.2.2. Calcium et magnésium

Comme dans le cas du potassium, ces ions augmentent linéairement avec le sodium dans les Eaux-Libres du sud-est. Dans l'archipel du sud-est, les variations sont également difficiles à définir (fig. 8 d₁ et 8 e₁) car s'y superposent plusieurs phénomènes : importance de la charge dissoute apportée au moment de la crue, évaporation, sédimentation.

(1) Une expérience en laboratoire sur la décomposition de quelques macrophytes en milieu aqueux a montré qu'une forte proportion de potassium, par rapport aux autres cations, était remise en solution.

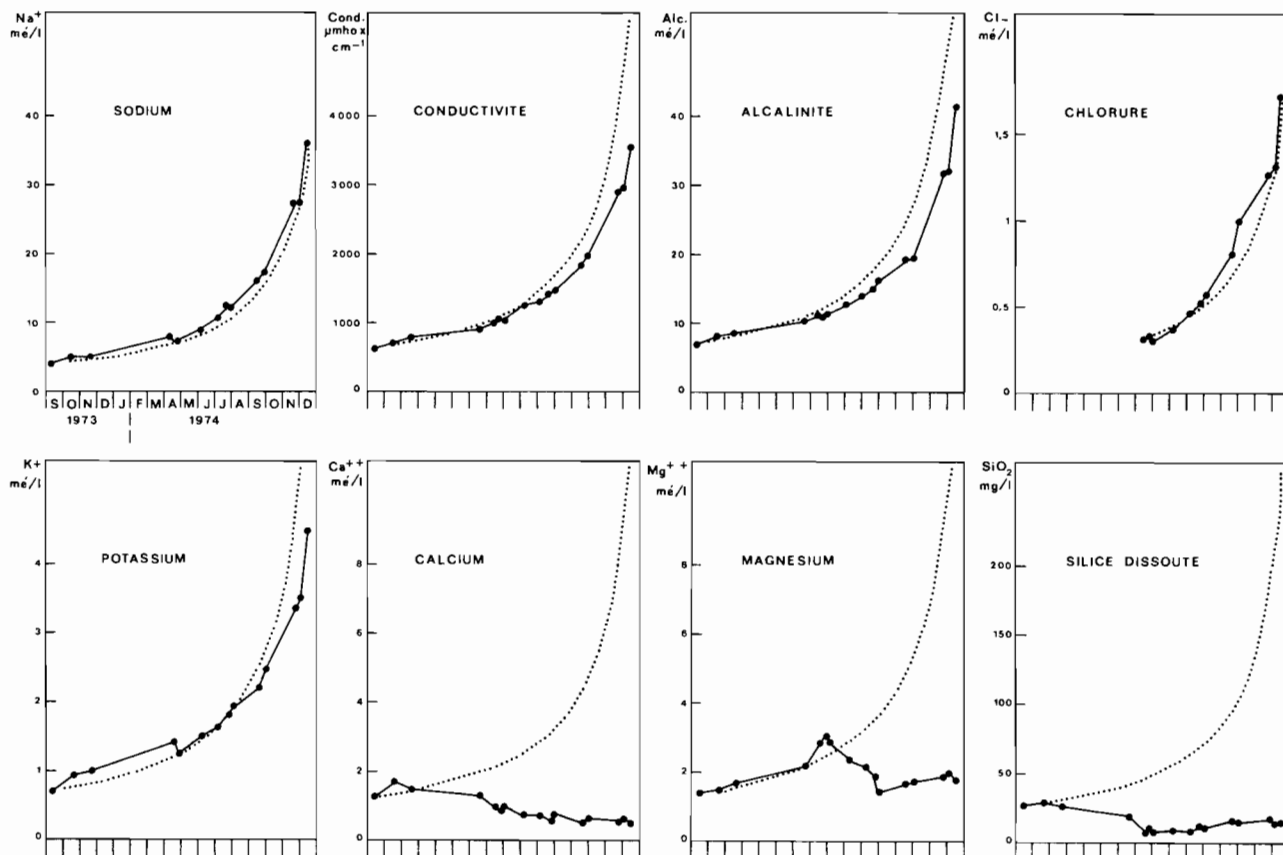


Fig. 10. — Évolution en fonction du temps des principaux paramètres hydrochimiques à Kindjéria en 1973-74. Les courbes en pointillé représentent les évolutions théoriques s'il n'y avait pas de précipitations. (Cf. § 3.3.4).
Time-variations of the main hydrochemical parameters at Kindjéria in 1973-74. The dotted lines represent the calculated variations if there were no precipitations (see § 3.3.4).

Dans la cuvette nord (fig. 8 d₂ et 8 e₂), on constate une décroissance de l'ion lorsque le sodium augmente, très nette dans le cas du calcium et moins marquée dans le cas du magnésium.

3.3.3. PROPORTIONS RELATIVES DES CATIONS

En dehors de la silice, ce sont les cations qui illustrent le mieux les variations de la qualité des eaux. La figure 9 représente en diagramme ternaire les variations des proportions relatives de Ca, Mg, Na+K exprimés en milliéquivalents par litre. Le potassium et le sodium ont été regroupés car ils évoluent selon un rapport pratiquement constant.

Les Eaux-Libres du sud-est se retrouvent à l'intérieur d'une zone restreinte où les points décrivent un cycle car cette zone d'eau est renouvelée annuellement par la crue du Chari dont la qualité moyenne de l'eau peut varier légèrement d'une année à l'autre.

La zone de l'archipel du sud-est présente deux

branches bien différentes. L'une pointant vers le haut de la figure et qui traduit une augmentation de Mg aux dépens de Ca et Na+K, correspond à l'arrivée des eaux de crue. Notons que l'enrichissement en potassium passe inaperçu dans cette représentation. L'autre branche tendant dans la direction des eaux de la cuvette nord illustre l'état saisonnier de bassin d'évaporation de l'archipel au printemps avec élimination de Ca et Mg.

La cuvette nord est le siège d'un appauvrissement en Ca et Mg au profit de Na, ce qui est nettement décrit sur la figure. Nous avons représenté également les variations observées par HOPSON (1967-68), CARMOUZE (1968), et ROCHE (1969). La première courbe diffère des autres aux basses conductivités mais cela peut provenir des méthodes de dosage différentes. Les deux dernières ont sensiblement même allure que celles que nous avons obtenues pour 1973-74 et 1975 sans toutefois atteindre les teneurs exceptionnellement fortes en Na.

3.3.4. ÉTUDE D'UN POINT PARTICULIER : KINDJÉRIA

Il nous a paru intéressant de suivre dans le temps les variations des facteurs hydrochimiques (fig. 10) en un point particulier, l'île de Kindjéria située au centre de la cuvette nord, pendant une période limitée où elle n'a reçu que très peu d'apports d'eau, de septembre 1973 à décembre 1974. En effet ce point peut, dans une certaine mesure, représenter l'ensemble de la cuvette puisque les mouvements d'eau ont été faibles.

Assimilons la cuvette nord à un bassin d'évaporation où la profondeur serait proportionnelle au volume et basons-nous sur le fait que la sédimentation du sodium est nulle (CARMOUZE, 1976). On peut alors écrire :

$$Na = \frac{Na_0}{1 - \frac{Et}{Z_0}}$$

Si Na représente la concentration en sodium au temps t

Na₀ la concentration en sodium au temps t = 0

E l'intensité évaporatoire

t le temps

Z₀ la profondeur initiale

En effet, l'équation de conservation de la matière s'écrit :

$$Na V = Na_0 V_0$$

Comme le volume est proportionnel à la profondeur :

$$Na Z = Na_0 Z_0$$

$$\text{or } Z = Z_0 - Et$$

$$\text{d'où } Na = \frac{Na_0 Z_0}{Z} = \frac{Na_0 Z_0}{Z_0 - Et} = \frac{Na_0}{1 - \frac{Et}{Z_0}}$$

$\frac{E}{Z_0}$ est une constante et cette loi est hyperbolique.

Connaissant Na, Na₀ et E, on en déduit Z₀

E est donné par la variation mensuelle moyenne de la cote d'eau à Kindjéria, soit 2,49 m sur 15 mois, c'est-à-dire 0,166 m par mois.

$$Na = 36,25 \text{ mé/l et } Na_0 = 4,05 \text{ mé/l}$$

On trouve Z₀ = 2,80 m

d'où la profondeur au bout de 15 mois : Z = 0,31 m, ce qui correspond à peu près à la réalité.

Connaissant les paramètres hydrochimiques au temps t₀ = 0, on peut tracer les courbes théoriques correspondantes s'il n'y avait pas de sédimentation.

Ces courbes sont tracées en pointillé sur la figure 10, les courbes réelles étant un trait plein.

On constate que chaque paramètre, sauf sodium par définition et chlorure, se trouve au-dessous de la courbe théorique, ce qui montre bien que les autres espèces dissoutes précipitent au cours de la concentration. On pouvait s'attendre à ce comportement des chlorures puisque cet ion est peu réactif. Il aurait d'ailleurs pu être utilisé comme traceur à la place du sodium, mais celui-ci a été préféré à cause de sa plus forte teneur. Notons par ailleurs que la conductivité subit le même phénomène. En effet, les ions s'associant pour précipiter, leur charge globale s'annule et ils ne participent alors plus à la mesure de la conductivité.

A partir de ces données, nous pouvons calculer par la formule précédente les concentrations théoriques des différentes espèces au bout des 15 mois. Ces valeurs sont réunies dans le tableau I où figurent également les concentrations réelles correspondantes, le pourcentage de sédimentation de chaque ion ainsi que le pourcentage de sédimentation des apports établi par CARMOUZE en considérant le lac en état d'équilibre dynamique, c'est-à-dire dans des conditions inverses.

Ces chiffres ne sont pas directement comparables mais donnent un aperçu du comportement des espèces dissoutes dans la cuvette nord en voie d'assèchement complet.

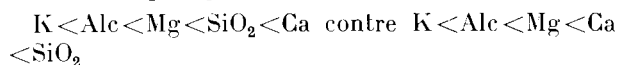
TABLEAU I

Paramètres hydrochimiques à Kindjéria au cours de la période de décrue 1973-74. (1) Concentrations théoriques s'il n'y avait pas sédimentation. (2) Concentrations réelles. (3) Pourcentage sédimenté. (4) Pourcentage annuel de sédimentation des apports du lac en équilibre.

Hydrochemical parameters at Kindjéria during the lowering level period 1973-74. (1) Calculated concentrations if there were no sedimentation. (2) Measured concentrations. (3) Percentage of sedimentation. (4) Yearly percentage of sedimentation of the inputs when the lake is in dynamical equilibrium.

	Cond. (μmho/cm)	Alc. (mé/l)	Cl ⁻ (mé/l)	Ca ⁺⁺ (mé/l)	Mg ⁺⁺ (mé/l)	Na ⁺ (mé/l)	K ⁺ (mé/l)	SiO ₂ (mg/l)
1 Concentration théorique.....	5594	63,10	1,72	11,19	12,53	36,25	6,44	241,7
2 Concentration réelle.....	3546	41,40	1,72	0,56	1,80	36,25	4,46	16,5
3 Pourcentage sédimenté.....	—	34,4	0	95,0	85,6	0	30,7	93,2
4 Pourcentage CARMOUZE.....	—	44,4	—	60,1	54,2	0	36,6	84,2

Les valeurs obtenues sont plus faibles (alcalinité, potassium) ou plus fortes (calcium, magnésium, silice) mais on constate la même échelle dans la tendance à précipiter, à une inversion près :



Malgré les approximations que nous avons faites pour cette étude, les conclusions semblent plausibles. Les conditions de précipitations décrites par CARMOUZE sont remplies et à un degré plus élevé à cause de la forte concentration des eaux.

4. CONCLUSION

Nous venons de décrire les variations spatio-temporelles des concentrations en ions majeurs des eaux du lac Tchad au cours d'une période de niveau exceptionnellement bas, comparable à celle observée par TILHO en 1904-1906 mais pour laquelle il n'y a pas de données chimiques exploitables.

Les eaux les plus douces, celles des Eaux-Libres du sud-est, sont sujettes à un cycle annuel à peu près constant. Elles se concentrent au cours de la saison sèche. Puis la masse d'eau est refoulée vers la périphérie par les eaux de crue du Chari et remplacée par celles-ci.

L'archipel du sud-est est le siège de phénomènes particuliers en cours d'étude. Il a été alimenté en 1973, 1974 et 1975 par les Eaux-Libres du sud-est après franchissement d'une vaste zone à mares résiduelles, à sédiments exondés et couverte de végétation. Les variations des concentrations des différents ions n'obéissent pas à des lois simples.

La cuvette nord n'a reçu d'eaux de la cuvette sud que pendant deux courtes périodes : l'une d'un mois en décembre 1973 et l'autre de trois mois commencée en décembre 1974. Ces eaux chassées par la crue du Chari ont traversé la « Grande Barrière », leurs propriétés étant modifiées au passage comme dans le cas de l'alimentation de l'archipel du sud-est. Toutefois, les proportions d'eau renouvelée sont différentes. Les eaux de la cuvette nord ont été moins affectées que celles de l'archipel fin 1973. Elles l'ont été bien plus à la fin de 1974 puisque la profondeur moyenne résiduelle était d'environ 30 cm et que la cuvette a reçu un apport de 60 cm. L'assèchement complet s'est produit à la fin de 1975, période pour laquelle nous n'avons que peu d'analyses, l'accès au lac étant devenu très difficile.

Les conditions sont donc très différentes de celles décrites par CARMOUZE (1969). A cette date, le lac était à un stade de « lac normal » d'après la classification de TILHO (1928). Il formait une masse d'eau unique. Les variations spatiales de la salure étaient continues et on observait une augmentation de conductivité du delta du Chari au nord de la cuvette

nord de 50 à 700 $\mu\text{mho/cm}$, n'atteignant 1 000 que dans le fond de certains bras. Le gradient de conductivité vers le nord à partir de Kindjéria était de 7,5 $\mu\text{mho/cm}$ par kilomètre (fig. 11). Chaque nouvelle crue refoulait les eaux en place progressivement vers le nord. Actuellement, le renouvellement des eaux est sensiblement analogue dans les Eaux-Libres du sud-est mais il est beaucoup plus brutal dans l'archipel du sud-est et la cuvette nord étant donné que ces cuvettes sont, avant la crue, isolées par une zone exondée et que leur niveau est plus bas que celui de la masse d'eau d'alimentation.

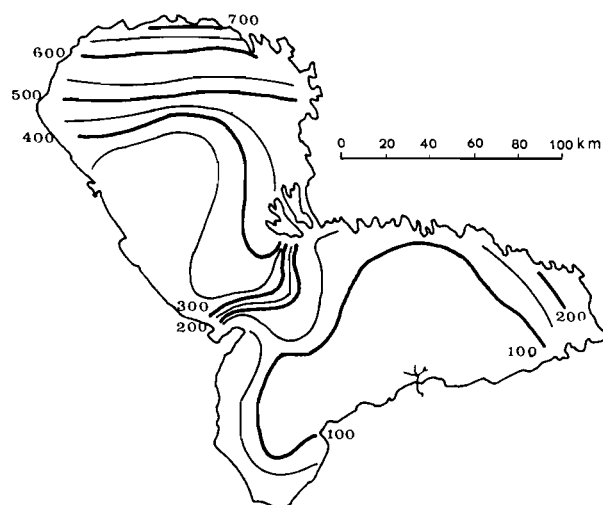


Fig. 11. — Variations spatiales de la conductivité des eaux du lac Tchad en avril 1968 (d'après CARMOUZE).
Space-variations of the electrical conductivity of the lake Chad waters in April 1968 (from CARMOUZE).

Utilisant toujours le sodium comme indicateur de concentration, les plus fortes teneurs enregistrées ont été celles des eaux de la cuvette nord en décembre 1974 (33,5 mé/l de moyenne sur 10 analyses d'eaux prélevées au nord et à l'ouest de Kindjéria), soit 240 fois la teneur moyenne annuelle des apports du Chari (0,14 mé/l), le principal tributaire. Ce chiffre correspond à un facteur de concentration considérable. Cette très forte concentration a engendré des phénomènes importants de précipitation : sels de calcium et de magnésium, silicates (CARMOUZE, 1976).

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les Forces Françaises de l'Escale d'Afrique Centrale ainsi que la Mission Évangélique de N'Djamena pour les nombreuses missions qu'elles nous ont permis d'effectuer notamment à Kindjéria.

Manuscrit reçu au Service des Publications de l'O.R.S.T.O.M. le 12 janvier 1978.

BIBLIOGRAPHIE

- CARMOUZE (J. P.), 1968. — Ions majeurs, phosphates et silicates dans le lac Tchad en avril 1968. *O.R.S.T.O.M.*, centre de Fort-Lamy, 18 p., 17 fig., *multigr.*
- CARMOUZE (J. P.), 1976. — La régulation hydrogéochimique du lac Tchad. Contribution à l'analyse biogéodynamique d'un système lacustre endoréique en milieu continental. *Thèse Univ. Paris VI, O.R.S.T.O.M.*, Paris, 418 p., *multigr.*
- CARMOUZE (J. P.), DEJOUX (C.), DURAND (J. R.), GRAS (R.), ILLIS (A.), LAUZANNE (L.), LEMOALLE (J.), LÉVÊQUE (C.), LOUBENS (G.), SAINT-JEAN (L.), 1972. — Grandes zones écologiques du lac Tchad. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrobiol.*, vol. VI, n° 2 : 103-169.
- CHANTRAINE (J. M.), LEMOALLE (J.), 1976 a. — Analyses d'eaux du lac Tchad de septembre 1973 à décembre 1974. *O.R.S.T.O.M.*, centre de N'Djamena, 2 p., 2 fig., 8 tabl., 24 cartes, *multigr.*
- CHANTRAINE (J. M.), LEMOALLE (J.), 1976 b. — Analyses d'eaux du lac Tchad en 1975. *O.R.S.T.O.M.*, centre de N'Djamena, 3 p., 6 tabl., 19 cartes, *multigr.*
- CHOURET (A.), FRANC (J.), LEMOALLE (J.), 1974. — Évolution hydrologique du lac Tchad de juillet à décembre 1973. *O.R.S.T.O.M.*, centre de N'Djamena, 9 p., 7 fig., *multigr.*
- CHOURET (A.), LEMOALLE (J.), 1974. — Évolution hydrologique du lac Tchad durant la sécheresse 1972-74. *O.R.S.T.O.M.* centre de N'Djamena, 12 p., 9 fig., 2 tabl., *multigr.*
- CHOURET (A.), LEMOALLE (J.), 1975. — Évolution hydrologique du lac Tchad (juillet 1974-octobre 1975). *O.R.S.T.O.M.*, centre de N'Djamena, 6 p., 8 fig., 1 tabl., *multigr.*
- GOLTERMAN (H. L.), 1969. — Methods for chemical analysis of fresh waters. *I.B.P. Handbook n° 8. Blackwell Scientific Publications*, Oxford and Edinburgh.
- HOPSON (A. J.), 1968. — Seasonal changes in the pattern of salinity distribution in the northern basin of Lake Chad. *Lake Chad Res. Stat. Malamfatori, Ann. Rep. 1966-67*, p. 13-26, Lagos.
- ILLIS (A.), LEMOALLE (J.), 1975. — Un plancton à diatomées à Bol (lac Tchad) en 1973. *O.R.S.T.O.M.*, centre de N'Djamena, 5 p., 2 fig., 11 tabl., *multigr.*
- ROCHE (M. A.), 1969. — Évolution dans l'espace et le temps de la conductivité électrique des eaux du lac Tchad d'après les résultats de 1908, 1957, 1962 à mars 1968. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrol.*, vol. VI, n° 1 : 35-74.
- TILHO (J.), 1910. — Documents scientifiques de la mission TILHO 1906-1909. *Imprimerie Nationale Paris*, t. I, 412 p., t. II, 598 p.
- TILHO (J.), 1928. — Variations et disparition possible du Tchad. *Ann. Géogr.*, t. 37 : 238-260.