

CIRCULATION GÉNÉRALE DES EAUX DANS LE LAC TCHAD

par J. P. CARMOUZE

RÉSUMÉ

Le temps de séjour des eaux d'origine fluviale dans le lac est lié à leur teneur en sodium. Cette relation permet de décrire la dynamique générale des eaux lacustres à partir de la distribution spatio-temporelle des concentrations en sodium. Il est tenu compte des modifications dues aux variations des autres facteurs de la salure.

Les facteurs de la dynamique des eaux sont analysés pour expliquer les grands mouvements d'eau au cours d'une année.

ABSTRACT

The sodium content of the river waters varies according to the time they spent in the lake. It is possible by this relation to trace the general movements of the lake waters by observation of the distribution in time and space of the sodium concentration. The modifications caused by the variations of others saltness factors are considered.

The hydrodynamic factors are analysed in order to explain the film of annual water movements.

1. INTRODUCTION

Le lac Tchad, situé entre 12°20 et 14°20 de latitude Nord et entre 13° et 15°30 de longitude Est, est un système endoreïque de très faible profondeur (2 à 6 m), d'étendue variable (17 à 25.000 km²), composé de zones d'eaux libres et d'archipels (1). (Fig. 1). Il est soumis à un climat subaride et à une alimentation saisonnière : le Chari, principal tributaire possède un régime fluvial de type tropical. Toutes ces caractéristiques laissent présager une profonde évolution physico-chimique des eaux lacustres dans l'espace et le temps. La confirmation en a été fournie par un certain nombre de travaux qui attestent une augmentation graduelle de la salure ionique des eaux, à partir du delta. (TILHO 1910 ; BOUCHARDEAU 1958 ; GRAS 1964 ; GRAS, ILTIS, LÉVÊQUE-DUWAT 1967 ; ROCHE 1969, 1970 ; TOUCHEBEUF DE LUSSIGNY 1969).

* Centre O.R.S.T.O.M., B. P. 65, Fort-Lamy (Tchad).

(1) La surface du lac a atteint ses valeurs les plus faibles au début du siècle.



Fig. 1. — Carte physique et bathymétrique du lac.

Les valeurs des salures maximales, leurs variations inter-annuelles qui contre toute attente restent faibles, prouvent qu'il y a régulation saline des eaux. L'étude générale de la dynamique des salures spécifiques et des mécanismes les régissant, entreprise depuis 1968, est essentielle pour la compréhension de ce phénomène. Elle s'insère dans un programme hydrobiologique d'une part (définition des grandes zones écologiques du lac Tchad) et dans un programme de géodynamique externe d'autre part (cycle érosion, transport, sédimentation) dans la cuvette tchadienne.

Différents modes d'évolution de la composition des salures spécifiques relatives ont déjà été mis en évidence (CARMOUZE 1968, 1969, 1970 ; LEMOALLE 1970) traduisant l'existence de modifications autres que celles dues à l'évaporation. L'étude de certaines d'entre elles qui sera développée ultérieurement, nécessite au préalable la connaissance de la dynamique générale des eaux.

Les grands mouvements d'eaux peuvent être déterminés à partir de l'étude de l'évolution des teneurs en sodium des eaux d'origine fluviale. La présente note est limitée à la description de ces mouvements d'eau au cours d'une année.

2. MÉTHODE

La salure d'une eau, en grande partie fonction du temps de séjour de cette eau dans le lac, peut être utilisée comme paramètre indicateur du mouvement des eaux. Il s'agit de définir cette relation et de préciser ensuite ses conditions d'application par l'étude des variations des autres facteurs de la salure pour interpréter la distribution de celle-ci dans l'espace et le temps.

2.1. Relation entre la salure d'une eau lacustre et son âge.

L'évolution physico-chimique des eaux lacustres est principalement due à l'évaporation qui provoque un accroissement de la salure des eaux proportionnel à l'intensité évaporatoire I (hauteur d'eau évaporée par unité de temps), au temps d'exposition t , et à la surface libre A de la masse d'eau par unité de volume ; ce dernier terme est égal à l'inverse de la profondeur Z .

Soit une masse d'eau de salure S de volume V contenant une quantité de sel Q et offrant une surface libre A .

$$\begin{aligned} \text{à l'instant } t_0, \quad S_0 &= \frac{Q}{V} \\ \text{à l'instant } t = t_0 + \Delta t, S_t &= \frac{Q}{V - A I \Delta t} \end{aligned}$$

$A I \Delta t$ = volume d'eau évaporée

$$S_t = \frac{Q}{A (Z - I \Delta t)} = \frac{Q Z}{Z A (Z - I \Delta t)}$$

$$\text{d'où } S = \frac{S_0 Z}{Z - I \Delta t}$$

En appelant t_0 l'instant d'entrée de la masse d'eau dans le lac, Δt représente le temps de séjour de celle-ci. Si la salure ne dépendait que de ce facteur, les eaux de même salure auraient le même âge. La distribution spatio-temporelle des courbes isosalure permettrait une description directe de la dynamique des eaux.

En réalité il faut tenir compte des modifications induites par les variations des autres facteurs (profondeur, intensité évaporatoire) ainsi que par celles des salures des eaux d'apport. Par ailleurs des phénomènes physico-chimiques agissent spécifiquement sur la salure. Leurs effets peuvent être éliminés à condition de choisir un constituant de la salure qu'ils n'affectent pas. La teneur en sodium des eaux, dont l'évolution dépend essentiellement de l'évaporation, a été retenue comme grandeur représentative de la salure. Il s'agit donc de connaître les valeurs des teneurs en sodium des eaux d'apport $[Na]_0$ ainsi que les modifications qu'elles sont susceptibles de subir en fonction de la variabilité de la profondeur Z et de l'intensité évaporatoire I .

2.2. Teneurs en sodium des eaux d'apport.

Les eaux du Chari représentent 95 % des eaux d'alimentation fluviale du lac. Les teneurs en sodium varient du simple au double (0,115 — 0,230 mé/l) au delta du Chari selon l'époque.

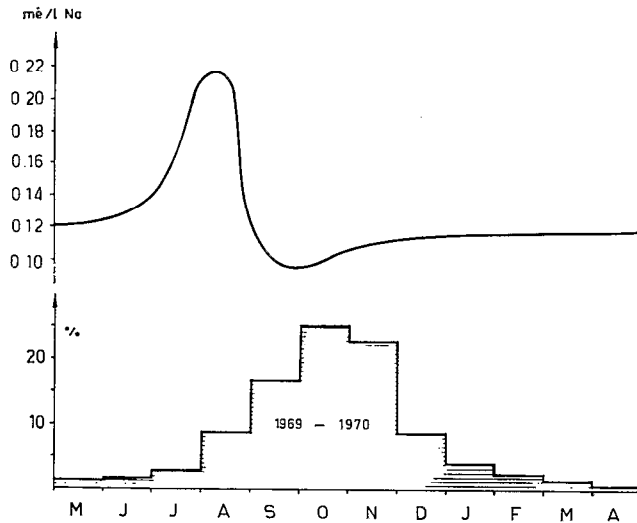


Fig. 2. — % des apports mensuels du Chari à Fort-Lamy.
Teneurs en sodium des eaux deltaïques.

Au cours de l'année hydrologique 1969-1970 on a défini pour chaque mois la quantité relative d'eau pénétrant dans le lac et la concentration moyenne en sodium correspondante (fig. 2). Les teneurs en sodium des eaux au maximum de la crue, dont il faut principalement tenir compte, varient peu (Tableau I).

Par contre les teneurs en sodium des eaux arrivant en fin de période d'étiage augmentent plus vite que celles des eaux occupant la région péri-deltaïque. Cette dernière région se trouve donc occupée temporairement par des eaux moins salées que celles du delta.

En saison des pluies, par ailleurs, les apports météoriques diluent les eaux lacustres (cf. annexe II).

L'absence de données sur la répartition

des pluies dans l'espace et le temps ne permet pas d'estimer les modifications apportées. Mais la salure des eaux n'est susceptible d'être affectée que dans les zones de très faible profondeur ($>1,00$ m).

TABLEAU I

Pourcentages du volume d'eaux du Chari arrivées dans le lac en période de crue. Teneur en sodium correspondante en mél/l .

Mois	Volume en %	Teneurs en Na (mél/l)
août	9	0,180
septembre	17	0,117
octobre	25,5	0,115
novembre	23	0,122
décembre	9	0,127

2.3. Modifications des teneurs en sodium des eaux dues aux variations de l'intensité d'évaporation.

L'intensité évaporatoire I est susceptible de variations à la fois temporelles et spatiales. La meilleure estimation des variations dans le temps de l'évaporation est obtenue à partir du bilan hydrologique du lac. Le calcul repose sur les pertes globales mensuelles. La courbe proposée dans la monographie du lac Tchad (TOUCHEBEUF DE LUSSIGNY 1969), basée sur 13 années d'observation a été modifiée (cf. Annexe I). Elle présente un maximum bien marqué en octobre-novembre (fig. 3). Corrélativement l'accroissement relatif de la salure suit les mêmes variations dans une

région de profondeur donnée. Les accroissements relatifs mensuels de la teneur en sodium $[Na]$, soit $\frac{\Delta[Na]}{[Na]}$ calculés à partir de la formule $\left(\frac{\Delta[Na]}{[Na]}\right)_m = \frac{Z}{Z - I_m} - 1$ sont représentés pour différentes profondeurs sur la figure 4 (m est un indice désignant le mois m ; I_m = évaporation au cours du mois m). Nous constatons que les variations de $\left(\frac{\Delta[Na]}{[Na]}\right)_m$ peuvent être importantes dans les régions de profondeurs inférieures à 2 mètres. Entre les mois de plus faible et de plus forte évaporation $\left(\frac{\Delta[Na]}{[Na]}\right)_m$ varie respectivement de 16,9 et 4 % pour des profondeurs de 1,00,

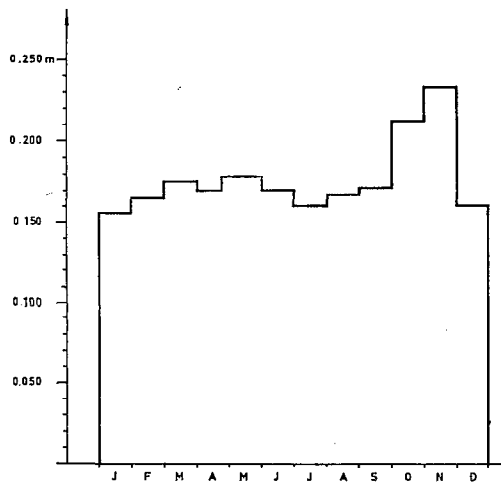


Fig. 3. — Estimation des évaporations mensuelles dans le lac. (R. GRAS, 1971).

1,50 et 2,00 mètres. Ces variations deviennent négligeables pour des régions de profondeurs supérieures à 3,00 mètres.

Quant aux variations spatiales de l'évaporation, nous ne disposons pas de données pour les estimer. Les principaux facteurs de l'évaporation, à savoir l'insolation, la température de l'air, celle de l'eau, l'humidité de l'air, la vitesse du vent, sont susceptibles de varier dans l'espace. Mais à l'échelle du lac, il est probable que les variations spatiales restent d'un ordre inférieur aux variations saisonnières.

2.4. Modifications des teneurs en sodium dues aux variations de la profondeur.

Une carte bathymétrique provisoire du lac a été récemment établie (CARMOUZE, DUPONT 1970). Le niveau d'eau choisi comme base correspond à la cote 282 soit 4,13 m (nivellement I.G.N. 1956) à l'échelle de Bol (fig. 1). La profondeur moyenne des eaux libres (1) pour cette cote est estimée

à 3,90 m. Différentes régions peuvent être délimitées en fonction de ce paramètre :

- La région des Eaux Libres du sud-est et celle de l'archipel sont de profondeur voisine de 3,80 m.
- Les Eaux Libres du sud, zone plane et peu profonde (2 — 3,0 m).
- La Grande Barrière également de faible profondeur (2 — 3 m).
- La zone centrale de l'archipel nord (6 — 7 m) et celle des Eaux Libres du nord (4 à 5 m) sont plus profondes.

Ce mode de représentation ne doit pas faire oublier que le relief du fond est accidenté, particulièrement dans les régions bordières des îlots-bancs où se poursuit le système dunaire des îles et îlots-bancs.

Les variations saisonnières du niveau d'eau sont de l'ordre de 0,80 à 1,00 m selon le lieu considéré ; les variations spatiales proviennent d'un mouvement de bascule des eaux autour de l'axe médian Nguigmi-Djintilo, consécutif à l'inversion des vents. Ainsi à Bol, l'amplitude n'est que de 0,80 m : en hiver, aux hautes eaux, les vents du nord-est tendent à chasser les eaux de la côte ; en été, les vents de sud-ouest agissent en sens inverse. Les variations annuelles peuvent être très importantes. De 1963 à 1971 le niveau moyen du lac a baissé de 2,00 m.

(1) On entend ici par eaux libres, toutes les eaux exceptées celles qui sont emprisonnées dans les herbiers. Les Eaux Libres du nord, les Eaux Libres du sud... caractérisent des régions bien définies (fig. 1).

La formule $\left(\frac{\Delta[\text{Na}]}{[\text{Na}]}\right)_m = \frac{Z}{Z - I\Delta t} - 1$ a été reprise pour l'étude des variations de l'accroissement relatif de la teneur en sodium en fonction de la profondeur, pour une évaporation donnée (fig. 4). Cette formule montre que lorsque la profondeur de deux masses d'eau varie du simple au double, la salure s'accroît dans la proportion inverse. Ainsi la vitesse d'accroissement de la salure des eaux situées dans la partie du lac au nord de la Grande Barrière est sensiblement deux fois plus faible que celle des eaux situées dans la partie au sud de cette région.

En définitive, il n'est pas possible de relier directement la distribution des teneurs en sodium au seul facteur « âge des eaux lacustres ». Il faut tenir compte de l'évolution des teneurs en sodium des eaux fluviales, des variations bathymétriques dans l'espace et le temps ainsi que des variations

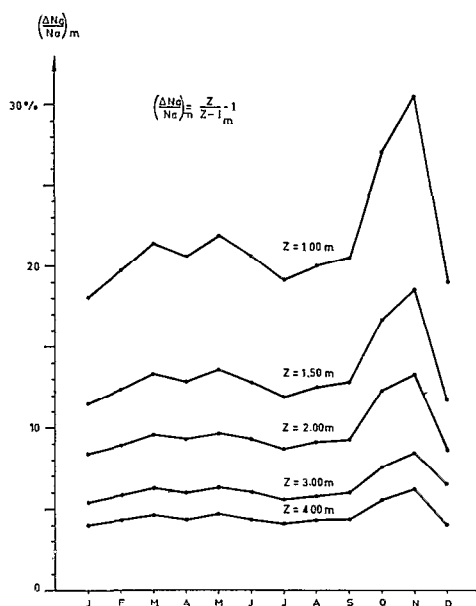


Fig. 4. — Accroissements relatifs mensuels des teneurs en sodium pour différentes profondeurs.

de l'évaporation. Les eaux fluviales sont irrégulièrement distribuées dans le lac. Leur acheminement se produit selon la saison vers des régions de profondeurs différentes. Aussi n'est-il pas possible d'affecter d'un même âge des eaux de même salure localisées dans des zones distinctes. Seuls peuvent être comparés les âges de celles situées sur un même axe de parcours, âges relatifs en raison des mélanges. L'existence des mélanges d'eau, favorisés par l'action permanente des vents, accroît les difficultés d'interprétation. Dans une zone donnée, ils provoquent une redistribution des courbes d'isoconcentration en sodium. Cette homogénéisation partielle des eaux constitue une perte d'information sur l'évolution de leur salure en fonction de leur âge, donc sur leurs mouvements. A la limite, dans une région occupée par une masse d'eau devenue homogène après un intense brassage, les mouvements internes ne sont plus détectables. Les mélanges peuvent être mis en évidence en comparant l'évolution des teneurs en sodium d'une masse d'eau donnée à l'évolution qui serait unique-

ment due à l'évaporation, dans une région à l'abri de tout déplacement d'eau pendant la période considérée.

2.5. Distribution spatio-temporelle des teneurs en sodium des eaux lacustres.

Les points de prélèvements ont été répartis sur l'ensemble du lac, à raison d'un prélèvement mensuel ou bimensuel tous les 100 km², à l'exception de la Grande Barrière qui a été plus finement prospectée. Les prélèvements proviennent essentiellement d'eau de surface ; l'absence de stratification notable des eaux justifie cette simplification. Les données sont réparties en onze périodes d'observation : avril 1968, septembre 1968, avril 1969, décembre 1969, février 1970, mars 1970, avril 1970, juin 1970, juillet 1970, septembre 1970, novembre 1970.

Le sodium a été mesuré par spectrophotométrie de flamme 10 à 20 jours après le prélèvement. L'erreur maximum relative de la mesure est de l'ordre de 2 %. Les résultats de chacune des tournées ont été représentés cartographiquement sous forme de courbes d'isoconcentration en sodium. Compte tenu des éventuelles variations journalières des teneurs en sodium (influence du milieu biologique, déplacement temporaire des eaux sous l'action des vents) et de l'incertitude

portant sur la localisation des points de mesure dans les zones d'Eaux Libres et d'îlots-bancs (5 km en moyenne), l'allure des courbes a été volontairement simplifiée sans grande perte d'information pour l'étude de grands déplacements d'eaux (fig. 6 à 15).

3. DESCRIPTION ET INTERPRÉTATION DE LA DYNAMIQUE GÉNÉRALE DES EAUX

Les grands déplacements d'eau sont engendrés par la combinaison de forces dues principalement aux régimes des apports d'eau, des vents et des infiltrations ; leur direction et leur amplitude sont également liées à la morphologie de la cuvette. Il est donc indispensable pour l'interprétation des résultats de donner des précisions sur ces facteurs de la dynamique des eaux.

3.1. Facteurs de la dynamique des eaux.

3.1.1. Alimentation fluviale.

Le régime du Chari s'apparente à un régime tropical de transition, caractérisé par une période de hautes eaux de mi-août à mi-janvier et une période de basses eaux de mars à juin. L'hydrogramme annuel (fig. 5) présente un maximum bien marqué fin octobre (2500 à 5000 m³/s) ; la

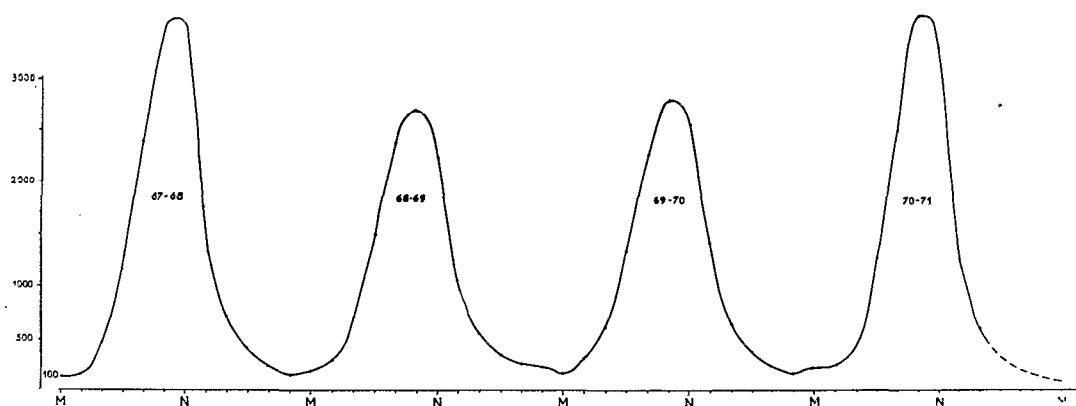


Fig. 5. — Débits mensuels du Chari de mai 1967 à mai 1971 à Fort-Lamy.

décroissance est régulière ; le débit d'étiage est de 180 m³/s en moyenne. Le lac est alimenté saisonnièrement : en deux mois (octobre, novembre), il reçoit près de 50 % des apports fluviaux annuels, en quatre mois (septembre, octobre, novembre, décembre), 75 % des apports fluviaux.

Comme en témoignent ces chiffres, la zone deltaïque est soumise à un fort gradient hydraulique de septembre à décembre avec un maximum fin octobre début novembre. L'énorme énergie potentielle des eaux du maximum de crue engendre de grands déplacements qui se poursuivent en s'amortissant sur l'ensemble du lac, de décembre à février. L'amortissement est d'autant plus faible que le rapport des volumes d'apports en octobre-novembre sur le volume des eaux lacustres est élevé.

3.1.2. *Vents.*

Le régime des vents est principalement lié au déplacement du front intertropical qui engendre en saison sèche l'harmattan, vent de secteur nord-est et en saison humide, le vent de mousson de secteur sud-ouest. A ces vents dominants se superposent des vents locaux secondaires dus au microclimat du lac lui-même. Il s'agit d'une brise diurne soufflant du lac vers les terres et d'une brise nocturne dirigée en sens inverse. Ils modifient peu la direction des vents dominants.

De novembre à mars l'harmattan se lève régulièrement au milieu de la nuit et tombe en fin de matinée. Les eaux sont poussées vers les côtes occidentales et méridionales. De mai à septembre le phénomène inverse se produit ; les vents de mousson tendent à accumuler les eaux sur les côtes orientales et septentrionales. La réflexion des eaux sur les côtes et les îles provoque un courant de retour qui favorise les mélanges. Dans les archipels les vents dirigés perpendiculairement à l'orientation des îles et îlots-bancs agissent faiblement. Par ailleurs, à aucune époque de l'année les vents ne facilitent les échanges d'eau entre la cuvette sud et la cuvette nord.

3.1.3. *Infiltrations.*

Les côtes septentrionales et orientales semblent les plus propices aux infiltrations (ROCHE, 1970). Les courants de pente résultant ont probablement une faible importance relative : les infiltrations représentent 7,5 % des eaux qui sont éliminées au cours d'une année dans le lac (voir Annexe III).

3.1.4. *Caractéristiques morphologiques du lac.*

Dans son ensemble le lac est très peu profond. Au cours de leurs déplacements, les eaux sont soumises à d'importantes forces de friction près du fond, plus particulièrement dans la Grande Barrière et dans les Eaux Libres du sud (fig. 1). La région de la Grande Barrière fortement encombrée d'îlots-bancs gêne les échanges entre les Eaux Libres du nord et celles du sud et du sud-est. Dans les archipels nord et est, les îles et îlots-bancs généralement orientés sud-est-nord-ouest, freinent la propagation des eaux dans la direction nord-est (fig. 1).

En définitive, la distribution des forces dont dépendent les grands mouvements d'eau (vents, poussée des eaux de crue) est la même d'une année à l'autre : les époques d'inversion des vents sont répétées à 15 jours près, celle du maximum de crue du Chari à 8 jours près. Aussi le déroulement des grands mouvements d'eau dans le lac ne doit-il pas subir de modifications importantes. La période d'observation étalée sur 3 ans coïncide avec une baisse progressive du volume du lac (13 %). Les crues de 68-69 et de 69-70 inférieures à la moyenne, présentent des caractéristiques voisines (fig. 5). La crue de 70-71 voisine en importance de celle de 67-68, a débuté plus tardivement que les précédentes, la décrue a été plus rapide. Ces variations annuelles n'ont pas provoqué de modifications notables sur la distribution de la salure des eaux (cf. fig. 12, 15 et 16 ; fig. 7 et 17). Aussi les données recueillies de 1968 à 1970 ont elles été regroupées pour la description d'un cycle annuel.

Par contre l'intensité des forces en présence est susceptible de fortes variations annuelles : au cours de ces douze dernières années les apports annuels du Chari ont presque varié du simple au double (1 à 1,8), le coefficient de renouvellement annuel des eaux qui est un indice de l'importance des masses d'eaux mises en mouvement, est passé de 28 à 77 % (voir annexe III). Quant aux vents, si leur vitesse moyenne reste sensiblement constante, le nombre de jours où ils soufflent peut varier, particulièrement en hiver. L'amplitude des mouvements décrits est certainement très variable.

3.2. **Les grands mouvements d'eaux au cours d'un cycle annuel.**

L'époque précédant immédiatement la brusque arrivée des eaux de crue, c'est-à-dire le mois de juillet, a été prise comme point de départ.

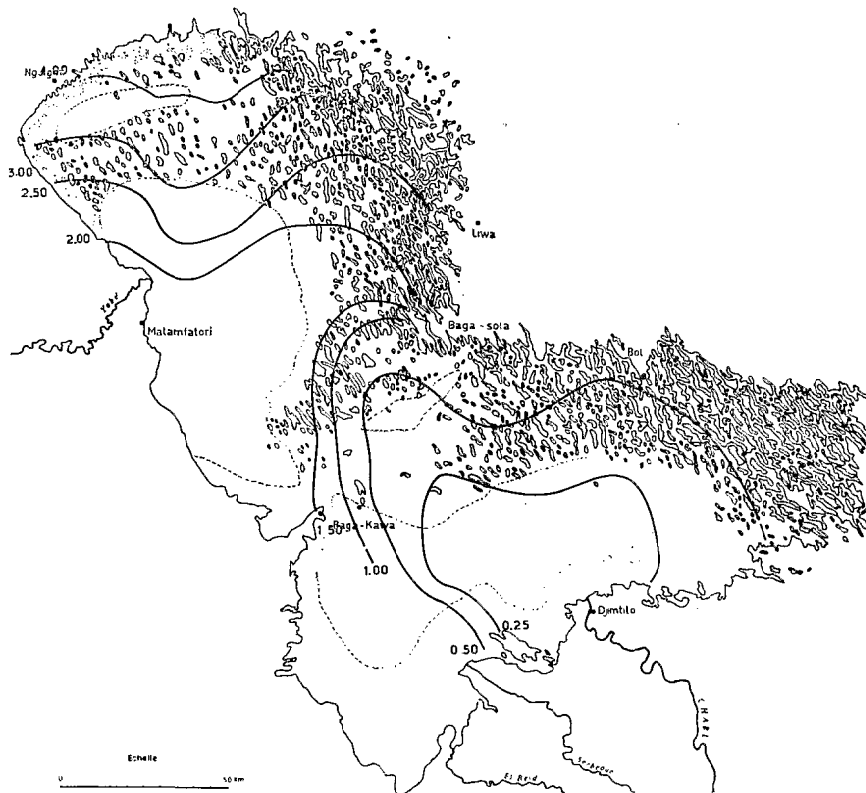


Fig. 6. — Courbes d'isoconcentration en sodium du 14 juillet au 6 août 1970.
Les concentrations sont exprimées en mé/l.

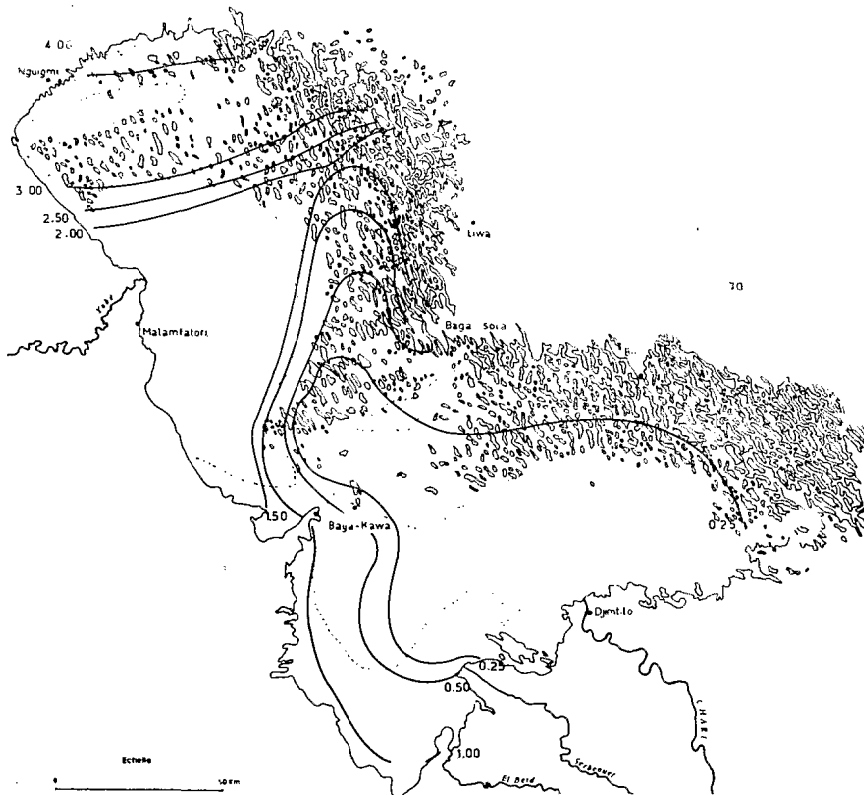


Fig. 7. — Courbes d'isoconcentration en sodium du 18 au 29 septembre 1970.
Les concentrations sont exprimées en mé/l.

3.2.1. *Juillet* mi-août (fig. 6).

Ces deux mois, coïncidant avec la côte minimale du lac, sont caractérisés par la présence des vents de mousson et la faiblesse des apports fluviaux. Au regard de la distribution des courbes d'isoconcentration en sodium de juin (fig. 17) on constate que :

— Dans la zone pérideltaïque qui s'étale sur un rayon de 40 km autour du delta, le renouvellement des eaux depuis juin est faible : les teneurs en sodium des eaux sont égales à celles des eaux de juin ayant évolué sur place sous l'effet de l'évaporation ($\Delta[\text{Na}]/[\text{Na}] = 10$ à 15% pour $\Delta t = 1,6$ mois, $\bar{Z} = 2,50$ m, $\bar{I}_m = 0,165$ m) (1). Toutefois la déformation de la courbe 0,25 semble exprimer un déplacement qui pourrait être consécutif à la légère remontée des eaux du Chari.

— Dans le sud du lac, les eaux sont partiellement chassées vers le nord par les vents de mousson. En effet la profondeur dans cette région diminue de début juin à mi-juillet de 0,50 m ; la diminution relative à l'évaporation au cours de cette période n'excède pas 0,30 m. Ce refoulement explique également la présence d'eaux relativement salées au nord du Serbeouel.

A l'ouest de l'archipel est, la déformation des courbes 0,50 et 1,00 indique qu'il y a un déplacement d'eaux du sud-est vers le nord-ouest de la Grande Barrière. Le gradient hydraulique engendrant ce courant est probablement dû à l'accumulation au sud de la Grande Barrière des eaux provenant du sud du lac et de la zone pérideltaïque.

Dans l'archipel nord, la distribution des teneurs en sodium en juillet 70 ne peut être comparée qu'à celle établie soit en avril 1968 soit en avril 1969. Ces dernières présentent d'ailleurs entre elles une grande similitude (fig. 15 et 16). Le déplacement des courbes, 2,00, 2,50 et 3,00 vers les Eaux Libres du nord vient de l'accroissement de la teneur en sodium des eaux en place par l'évaporation ($\Delta[\text{Na}]/[\text{Na}] \approx 12\%$ pour $\Delta t = 3,5$ mois, $\bar{Z} = 5,20$ m, $\bar{I}_m = 0,170$ m). La déformation de ces courbes dans l'archipel est délicate à interpréter. Elle peut provenir à la fois du refoulement général des eaux vers le nord de la partie orientale et d'un faible écoulement le long de la côte occidentale d'eaux de l'archipel nord induit par les infiltrations côtières.

3.2.2. *Septembre* (fig. 7).

Les apports du Chari augmentent brusquement (15 % des eaux sont déjà arrivées mi-septembre). Les vents de mousson persistent. Les eaux de crue du Chari envahissent la zone pérideltaïque, la partie méridionale de la Grande Barrière et la partie orientale des Eaux Libres du sud (recul de la courbe 0,25, faible teneur en sodium des eaux occupant ces régions : $< 0,25$ mé/l). Cet apport est brutal, aussi le renouvellement des eaux se fait-il sans mélanges importants.

Les eaux anciennes sont refoulées vers le nord (courbes 0,50, 1,00, 1,50). Le courant localisé dans l'archipel de Liwa en juillet est prolongé et intensifié par la poussée des eaux du Chari.

Dans l'archipel est, la remontée de la courbe 0,50 vient du refoulement vers l'intérieur de l'archipel d'une partie des eaux présentes en juillet dans les Eaux Libres du sud-est. Les eaux de crue atteignent la bordure des îles.

Le réseau des courbes dans l'archipel nord montre que les teneurs en sodium ont peu évolué depuis juillet : les eaux sont restées en place ($\Delta[\text{Na}]/[\text{Na}] \approx 6\%$ pour $\Delta t = 2$ mois, $\bar{Z} = 3,35$ m, $\bar{I}_m = 0,165$ m). Il en est de même dans les Eaux Libres du nord.

Au niveau de Baga-Kawa on assiste à un début de pénétration des eaux de crue. Les vents ne favorisent pas plus ce mouvement que les mélanges dans cette zone où une forte discontinuité des teneurs en sodium est enregistrée : en 10 km la concentration des eaux en sodium passe de 0,25 à 1,50 mé/l.

(1) \bar{Z} et \bar{I}_m expriment des valeurs moyennes de profondeur et d'intensité d'évaporation mensuelles.

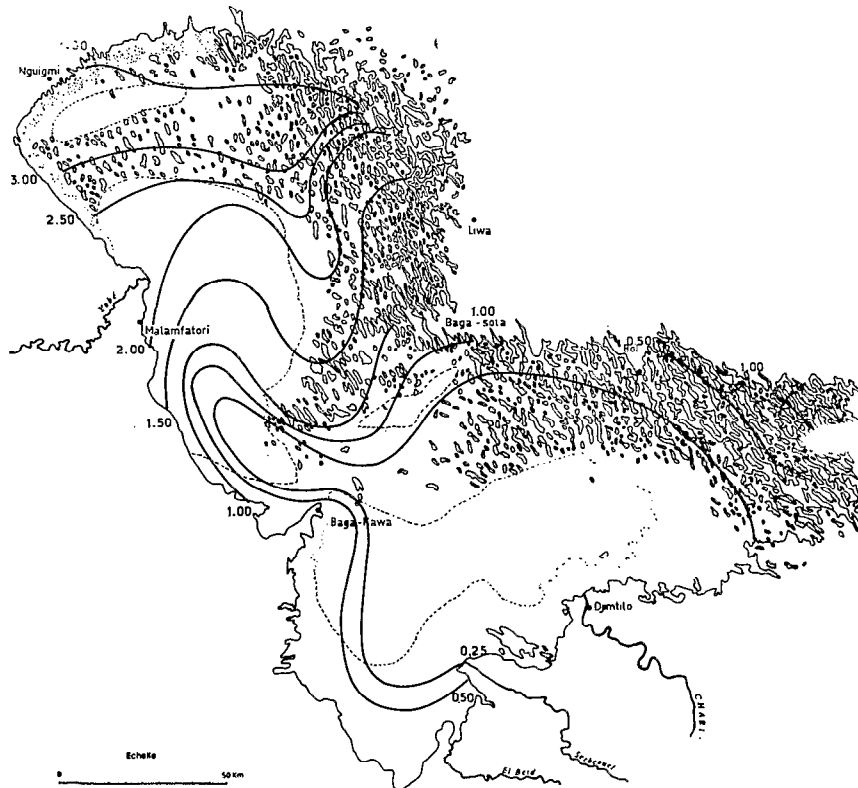


Fig. 8. — Courbes d'isoconcentration en sodium du 5 au 17 novembre 1970.
Les concentrations sont exprimées en mg/l.



Fig. 9. — Courbes d'isoconcentration en sodium du 4 au 20 décembre 1969.
Les concentrations sont exprimées en mg/l.

3.2.3. Octobre-novembre-décembre (fig. 8 et 9).

En octobre et en novembre le lac reçoit 40 à 50 % des apports fluviaux. La poussée des eaux de crue est maximale. L'harmattan se substitue aux vents de mousson en octobre. Les eaux de crue continuent à envahir les Eaux Libres du sud-est (fig. 8). Elles sont légèrement plus salées ($[Na] = 0,130$ mé/l) que les eaux qu'elles repoussent vers les Eaux Libres du sud et du nord ainsi que vers l'archipel est : les teneurs initiales en sodium des eaux refoulées ($[Na]_0 = 0,105$ à $0,110$ mé/l) n'ont pu augmenter que de 15 à 20 % en l'absence de mélange.

La pénétration des eaux dans les Eaux Libres du nord, mise en évidence par la déformation des courbes 0,25, 0,50 et 1,00, est localisée au niveau de Baga-Kawa. Les déplacements relatifs de ces courbes montrent que les eaux de crues se mélangent progressivement aux eaux résiduelles.

Les eaux des Eaux Libres du nord sont chassées vers l'archipel de Nguigmi (remontée des courbes 2,50 et 3,00). Les eaux de crue ne pénètrent plus dans l'archipel de Baga-Kiskra, la modification des courbes dans cette région correspond à une homogénéisation du milieu ainsi qu'à un refoulement de ces eaux vers la côte, consécutif à la poussée des eaux de crue dans les Eaux Libres du nord par Baga-Kawa, poussée qui décroît corrélativement à la diminution des apports et à l'élévation du niveau du lac.

L'inversion des vents est probablement à l'origine du déplacement de la zone de pénétration des eaux de crue dans la cuvette nord. Un calcul approché indique que 40 % des eaux passe dans la partie nord-est de la Grande Barrière, 60 % dans la partie sud-ouest de cette dernière (cf. annexe II³).

Les mouvements qui viennent d'être décrits en novembre sont prolongés et amplifiés en décembre (fig. 9).

3.2.4. Janvier-février (fig. 10).

La campagne effectuée en février 1970 est comparée à celle de décembre 1969. Dans l'archipel de Bol, où la position de la courbe 0,25 est pratiquement restée inchangée depuis décembre, la progression des eaux est fortement atténuée. Par contre dans les Eaux Libres du sud, le recul de la courbe 0,25 indique que les eaux fluviales se dirigent préférentiellement vers cette région. Les vents favorisent ce mouvement.

Dans la cuvette nord de profonds changements sont intervenus. La disposition de la courbe 1,50 dans la Grande Barrière met en évidence un mouvement d'eau longeant la bordure nord-ouest de cette région en direction de la côte nigériane. Par ailleurs une grande partie de la cuvette nord est occupée par des eaux relativement homogènes. On peut supposer qu'en janvier, les eaux ayant pénétré dans la cuvette nord en novembre, se réfléchissent sur la côte nigériane et prennent un cheminement incurvé. A la fin de la poussée des eaux fluviales, ce mouvement est entretenu par inertie ; son incurvation est accentuée par la forme du bassin (barrière formée par les îlots-bancs et îles de l'archipel nord et de la Grande Barrière). Il est ensuite prolongé sous l'action des vents de nord-est qui refoulent en février les eaux situées en bordure nord de la Grande Barrière vers la côte.

Au cours de leur progression circulaire les eaux nouvelles se mélangent progressivement aux eaux résiduelles. Un calcul approximatif montre que la masse d'eau relativement homogène située au large de Malamfatori de teneur moyenne en sodium égale à $1,05$ mé/l est composée de 45 % d'eaux résiduelles et 55 % d'eaux nouvelles. La teneur en sodium des eaux résiduelles est estimée à $2,05$ mé/l, celle des eaux nouvelles à $0,125$ mé/l. Les eaux septentrionales des Eaux Libres du nord ont été refoulées dans l'archipel de Nguigmi (remontée de la courbe 2,50) ; ce déplacement n'est pas accompagné de mélanges importants (resserrement des courbes 2,00, 2,50 et 3,00).

3.2.5. Mars-avril (fig. 11 et 12).

Le régime des vents est irrégulier. Les vents de nord-est sont progressivement remplacés par ceux de sud-ouest. Les apports du Chari sont faibles (4 % des apports annuels). Dans l'archipel



Fig. 10. — Courbes d'isoconcentration en sodium du 7 au 26 février 1970.
Les concentrations sont exprimées en mé/l.



Fig. 11. — Courbes d'isoconcentration en sodium du 9 au 27 mars 1970.
Les concentrations sont exprimées en mé/l.

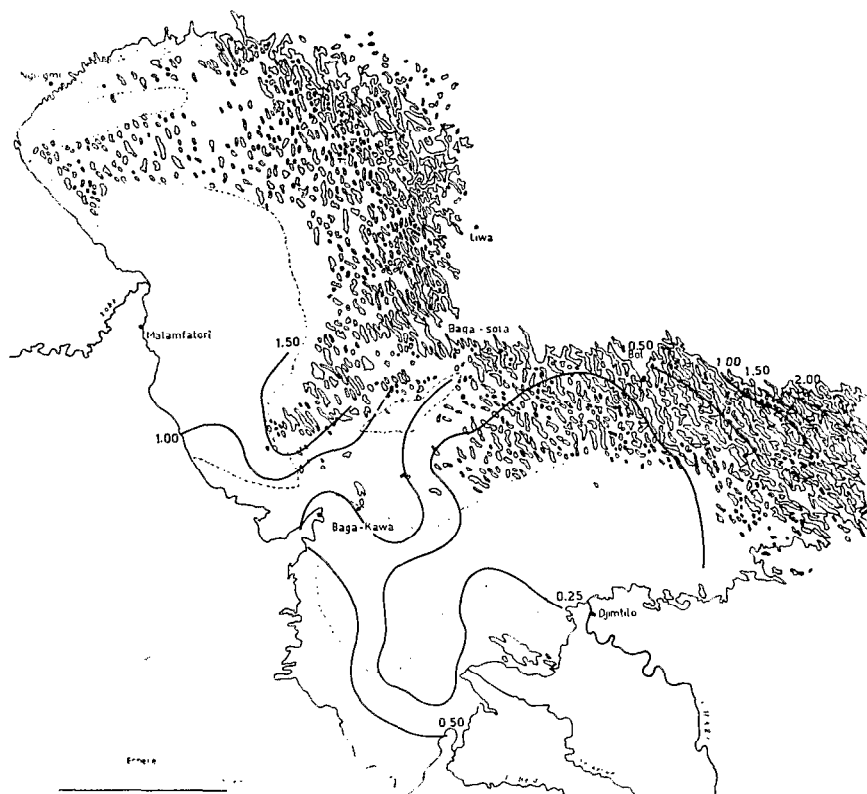


Fig. 12. — Courbes d'isoconcentration en sodium du 11 au 23 avril 1970.
Les concentrations sont exprimées en mg/l.

de Bol et au sud du lac la position de la courbe 0,25 a peu varié depuis février. Il est possible qu'il y ait apport d'eaux des Eaux Libres du sud-est, car dans le cas contraire si les eaux de février étaient restées en place leur teneur en sodium se serait accrue de 10 à 20 % selon la profondeur ; les courbes d'isoconcentration en sodium auraient été déplacées vers les Eaux Libres du sud-est.

Par contre, à l'est de Baga-Kawa, l'allure de la courbe 0,50 semble indiquer un léger refoulement des eaux de la Grande Barrière vers les Eaux Libres du sud-est. La cuvette nord est probablement en charge par rapport à la cuvette sud. L'explication peut venir de ce que les pertes par unité de surface dans cette dernière cuvette sont plus élevées que dans la première (voir annexe II²). L'étalement des eaux venant de la Grande Barrière est accompagné de mélanges avec les eaux des Eaux Libres du sud-est.

En bordure des Eaux Libres du nord, les eaux longeant la Grande Barrière en février se mélangent maintenant aux eaux méridionales des Eaux Libres du nord de salure moindre. Le déplacement de la portion de courbe 1,50 vers la Grande Barrière en est en partie la conséquence. L'accroissement de la salure est d'autre part plus rapide dans cette région de faible profondeur.

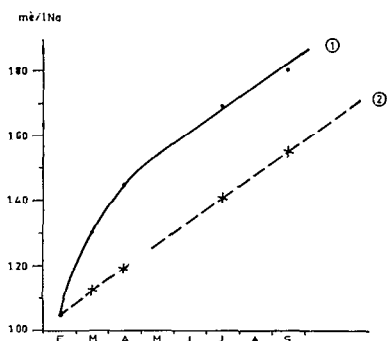


Fig. 13. — Teneur en sodium des eaux libres du nord.

- La courbe 1 correspond à l'évolution de la teneur en sodium des eaux de février à septembre.
- La courbe 2 correspond à l'évolution théorique de la teneur en sodium des eaux de février à septembre en l'absence de mélanges.

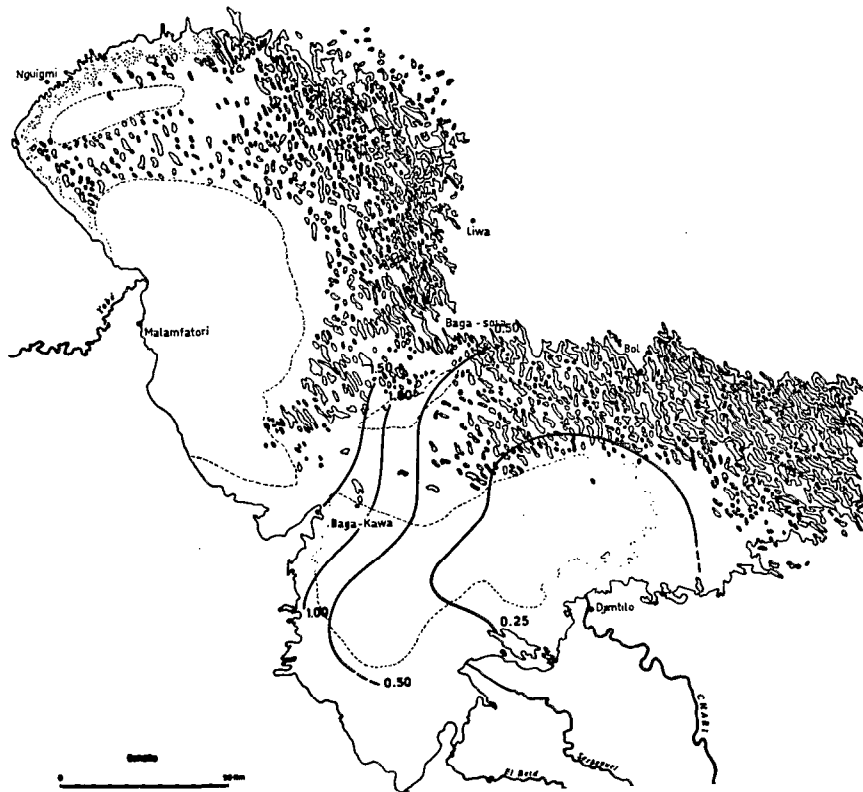


Fig. 14. — Courbes d'isoconcentration en sodium du 26 mai au 13 juin 1970.
Les concentrations sont exprimées en $\text{m}\ell/\text{l}$.

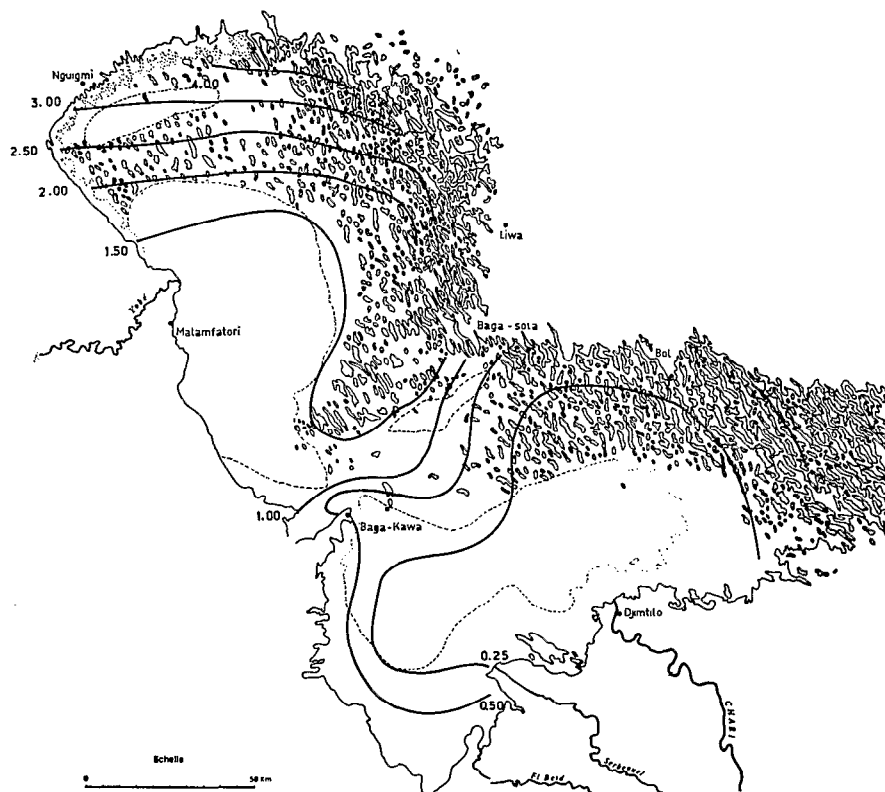


Fig. 15. — Courbes d'isoconcentration en sodium du 4 au 23 avril 1968.
Les concentrations sont exprimées en $\text{m}\ell/\text{l}$.

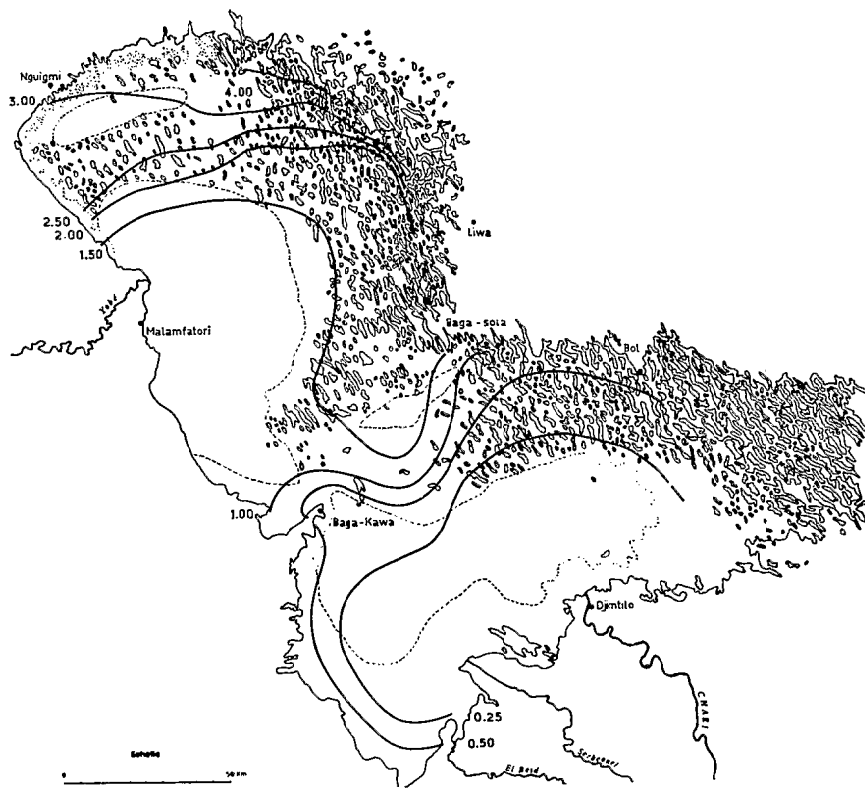


Fig. 16. — Courbes d'isoconcentration en sodium du 1^{er} au 15 avril 1969.
Les concentrations sont exprimées en mé/l.

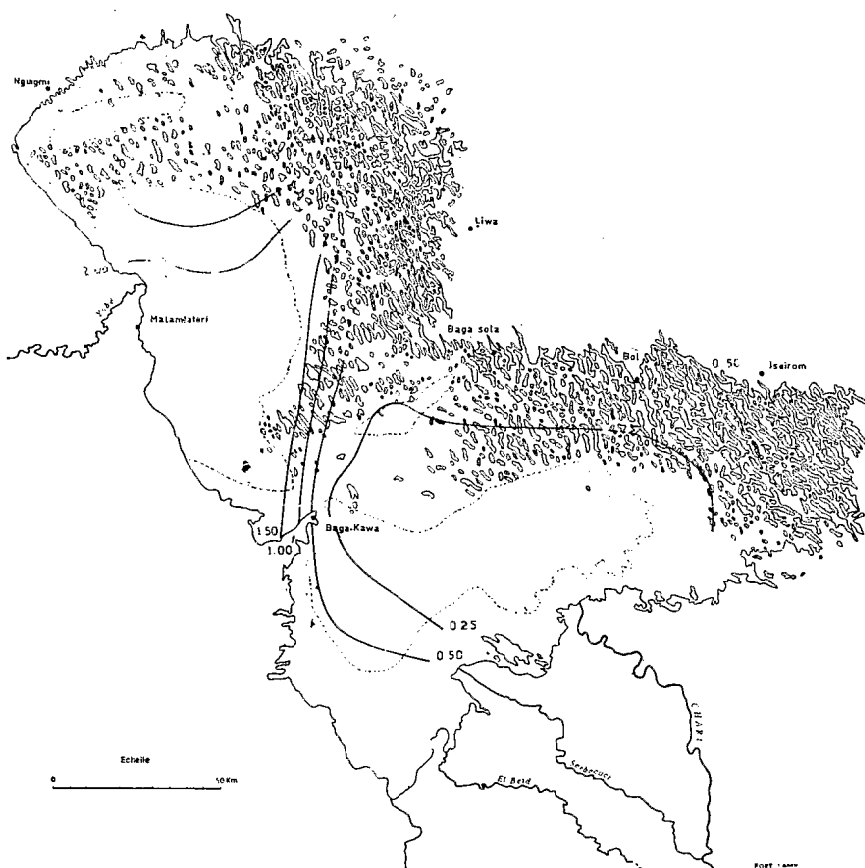


Fig. 17. — Courbes d'isoconcentration en sodium du 23 septembre au 15 octobre 1968.
Les concentrations sont exprimées en mé/l.

Dans les Eaux Libres du nord la salure des eaux a nettement augmenté (déplacement de la courbe 1,50). La teneur moyenne des eaux en sodium, égale à 1,05 mé/l en février, a augmenté au bout de deux mois de 40 % contre 13 % dans le cas où l'évaporation aurait été l'unique facteur d'accroissement de la salure (fig. 13). Il y a donc mélange des eaux des Eaux Libres du nord avec celles, de salure supérieure, de l'archipel nord et de la Grande Barrière. L'atténuation de la discontinuité des teneurs en sodium en bordure de l'archipel, confirme l'existence de ces mélanges, qui sont d'autant plus efficaces qu'en mars les eaux des Eaux Libres du nord sont probablement en charge vis-à-vis de celles de l'archipel nord. Par ailleurs l'action des vents est particulièrement marquée dans les parties centrale et occidentale de l'archipel où les îles et les îlots bancs sont plus clairsemés.

3.2.6. Mai-juin (fig. 14).

Il est prévisible que cette période soit caractérisée par l'absence de grands mouvements d'eau : l'alimentation fluviale est quasiment nulle ; les vents de mousson sont installés. Dans les Eaux Libres du sud-est et du sud, dans l'archipel de Bol, la modification de la courbe 0,25 provient de l'accroissement de la salure des eaux en place. Dans le sud du lac, à l'est de Baga-Kawa, cette translation de la courbe est d'autant plus marquée que l'accroissement des teneurs en sodium est relativement plus rapide dans ces zones de faible profondeur. La remontée de la courbe 0,25 dans le sud-est peut être due en partie à un refoulement des eaux de l'extrême sud vers le nord par les vents de mousson.

Dans les Eaux Libres du nord et l'archipel nord, il est probable que les vents de mousson tendent à pousser les eaux vers les côtes orientales et septentrionales au cours de cette période tout en facilitant leurs mélanges.

4. CONCLUSION

Le lac est schématiquement constitué de deux cuvettes, que nous dénommons cuvette nord et sud, communiquant entre elles par une zone de faible profondeur encombrée d'îles et îlots-bancs : la Grande Barrière. Le Chari qui possède un régime tropical alimente la cuvette sud saisonnièrement : de septembre à décembre 75 % des apports annuels fluviaux sont arrivés. Durant cette période il existe un fort gradient hydraulique entre ces cuvettes (maximum en novembre) qui provoque un important déplacement des eaux de la cuvette sud vers la cuvette nord. Dès la mi-janvier celles-ci sont sensiblement en équilibre hydraulique ; il n'y a plus d'échanges notables. Le lac dans le nord a atteint sa cote maximale ; d'août à janvier son niveau est monté de 0,90 cm environ. En avril-mai-juin il y a un léger reflux des eaux du nord au-delà de la Grande Barrière : la cuvette nord est légèrement en charge vis-à-vis de la cuvette sud. Ceci vient de ce que les pertes par unité de surface sont plus importantes dans cette dernière région. Ces mouvements communiqués par la pulsion des eaux fluviales sont combinés à des mouvements dus aux vents. Ainsi les vents de sud-ouest qui soufflent de juin à octobre tendent à accumuler les eaux sur les côtes orientales et septentrionales du lac.

Ils refoulent en juillet des eaux des Eaux Libres du sud vers le nord-est de la Grande Barrière ; plus tard, en août-septembre, ils infléchissent le courant de pénétration des eaux de crue dans cette même direction. Les vents de nord-est qui leurs succèdent en octobre déplacent ce courant vers le sud-ouest de la Grande Barrière le long de la côte nigériane et tendent à accumuler les eaux vers les côtes méridionales et occidentales. En avril les eaux du Chari, de faible débit, se dirigent principalement vers les Eaux Libres du sud et l'archipel de Bol.

Les pertes globales annuelles, dont 92,5 % sont dues à l'évaporation et 7,5 % aux infiltrations, sont sensiblement égales à 47.10^9 m³ (l'évaporation annuelle est de 2,18 m). Par contre les apports sont très variables. Les valeurs enregistrées ces 13 dernières années sont comprises entre 32 et 57.10^9 m³. Ces chiffres expliquent les fortes variations de volume subies par le lac : au cours de cette période son niveau a baissé de 2,00 m. Il en est de même des échanges quantitatifs entre les deux cuvettes. La cuvette nord reçoit approximativement un volume d'eau égal à la moitié des apports annuels : ces trois dernières années 40 % ont été dirigés directement vers l'archipel nord puis 60 % vers les Eaux Libres du nord. Le coefficient de renouvellement des eaux de 1958 à 1970 a varié de 0,43 à 0,49 dans la cuvette nord et de 0,63 à 0,88 dans la cuvette sud (cf. annexe II₂).

Dans les Eaux Libres du sud-est il y a un renouvellement quasi total des eaux. En septembre les eaux de crue, qui arrivent brutalement refoulent les eaux en place vers le nord sans que d'importants mélanges soient opérés. Les eaux résiduelles des Eaux Libres du sud qui représentent un très faible volume en juillet (une grande partie a été refoulée vers le nord) sont poussées sur la côte nigériane. Dans l'archipel est, la pénétration des nouvelles eaux de crue est moins rapide ; elle est contrariée par l'orientation des îles et la surface restreinte de cette région. Dès le mois de février les apports qui deviennent très faibles ne provoquent plus de déplacements d'eau importants jusqu'en juillet.

Au cours de cette même période dans la cuvette nord, le courant d'arrivée des eaux de crue, après son déplacement vers le sud-ouest à la mi-octobre, se réfléchit sur la côte nigériane et amorce un mouvement circulaire dans la zone des Eaux Libres favorisant les mélanges des anciennes et des nouvelles eaux dans l'ensemble des Eaux Libres. En janvier et février lorsque ce courant diminue puis cesse, un courant de retour des eaux le long de la bordure nord de la Grande Barrière lui succède, essentiellement induit par les vents. Entre temps dans l'archipel nord les eaux résiduelles sont simultanément refoulées et mélangées aux eaux venant des Eaux Libres du nord. De mai à la fin juin il n'y a pas apparemment d'importants déplacements d'eau.

ANNEXE I

Une courbe des pertes totales mensuelles dans le lac Tchad est fournie dans la monographie du lac Tchad (TOUCHEBEUF DE LUSSIGNY 1969), à partir de données hydrobiologiques recueillies sur 13 années.

De cette courbe a été déduit l'histogramme des évaporations mensuelles dans le lac (fig. 2) en fixant à 15 mm la hauteur d'eau qui s'infiltré par mois. Cette valeur est prise à partir d'estimations faites par CARMOUZE (Voir annexe III (1)).

Il a également été tenu compte :

— du mouvement de bascule du plan d'eau qui a lieu à l'époque d'inversion des vents. Les profondeurs, mesurées à Bol ont été majorées de 5 cm pendant l'harmattan et diminuées de 5 cm pendant la mousson ;

— du décalage dans le temps des données de débit du Chari recueillies à Fort-Lamy : les eaux parcourent en deux jours la distance entre Fort-Lamy et le delta. Cette correction est notable en période de maximum de crue ;

— des nouvelles estimations de la superficie du lac en fonction du niveau d'eau (fig. 18).

— de la crue de l'El Beïd.

(1) L'histogramme des évaporations mensuelles dans le lac a été établi par R. GRAS.

ANNEXE II

1. *Renouvellement annuel des eaux dans l'ensemble du lac* (fig. 19).

On peut avoir une idée de l'importance des déplacements d'eau par l'estimation du coefficient de renouvellement annuel des eaux, R_i .

$$R_i = \frac{F_i + P_i + (V_i - V_{i-1})}{V_i}$$

F_i = volume des apports fluviaux relatifs à l'année i . 95 % de cette valeur représente le volume des apports du Chari obtenus à partir des données hydrologiques à Fort-Lamy. (Monographie Hydrologique du Chari 1969).

P_i = volume des pluies sur le lac relatif à l'année i . Les valeurs sont fournies dans la monographie du lac Tchad (TOUCHEBEUF DE LUSSIGNY 1969).

V_i = volume moyen du lac relatif à l'année i . Cette grandeur a été obtenue à partir d'une courbe bathymétrique du lac établie par GRAS et CARMOUZE (fig. 18).

La partie de la courbe inférieure à la cote 280 a été tracée à partir de données recueillies à l'occasion de campagnes effectuées sur l'ensemble du lac depuis 1968. Les proportions relatives d'eaux libres d'îlots bancs et d'îles ont été estimées par planimétrie à partir de cartes à 1/200.000^e remise en grande partie à jour en 1970 (CARMOUZE, DUPONT 1971). Les cuvettes sud et nord ont été considérées séparément.

Au-dessus de cette cote la courbe a été obtenue par approximations successives. Les surfaces en eau (Eaux Libres + îlots-bancs) ont été notamment calculées à partir des variations du niveau du lac de 1954 à 1970 en supposant les pertes annuelles égales à 2,36 m. Les essais de reconstitution du lac

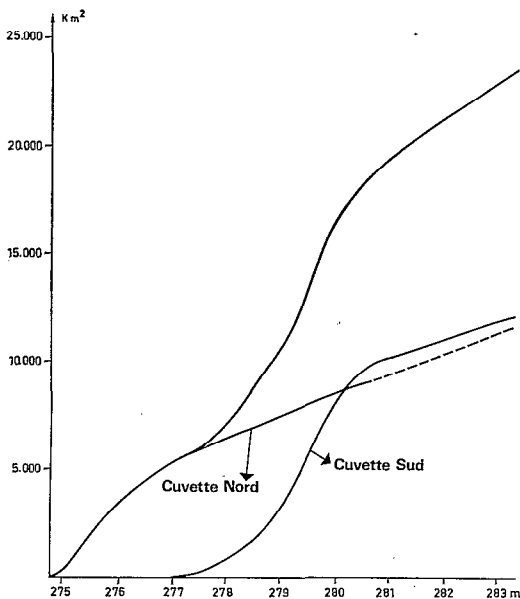


Fig. 18. — Courbes bathymétriques du lac.

ont permis de préciser la forme de la courbe entre les cotes 280 et 281.

La cote moyenne du lac est calculée pour une année donnée à partir des mesures de hauteur d'échelle à Bol (TOUCHEBEUF DE LUSSIGNY 1969). L'intégrale de la courbe limitée à la cote considérée représente le volume du lac.

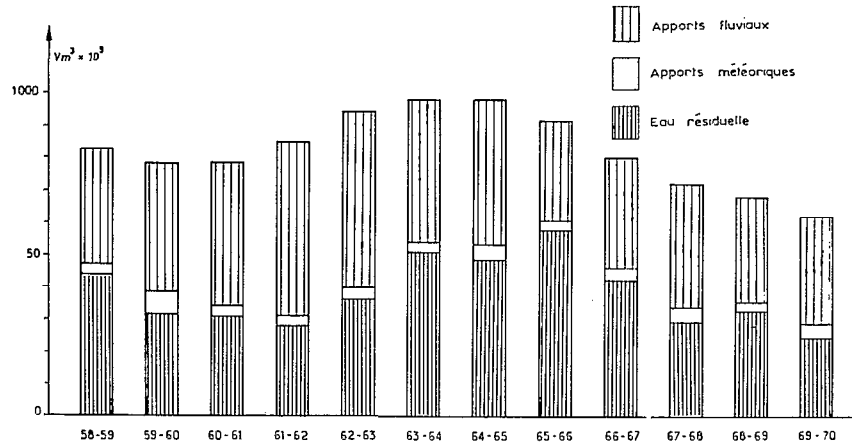


Fig. 19. — Volumes annuels des apports fluviaux et météoriques. Volume moyen annuel du lac.

2. Renouvellement annuel des eaux dans les cuvettes nord et sud.

Il est possible également d'évaluer le renouvellement annuel des eaux dans les parties du lac situées au nord et au sud de l'axe Baga-Sola-Baga-Kawa que nous dénommons respectivement cuvette nord et cuvette sud. Les pertes sont supposées proportionnelles aux surfaces d'eaux libres. Dans ce cas les pertes dans la cuvette nord et dans la cuvette sud sont respectivement égales à 48,5 et 51,5 %. La répartition des apports est supposée effectuée dans le même rapport. Les proportions relatives des volumes des cuvettes nord et sud v_{Ni}/V_i et v_{Si}/V_i , fonction de la cote du lac, sont calculées à partir de la courbe bathymétrique.

D'où les indices de renouvellement d'eau R_{Ni} et R_{Si} :

$$R_{Ni} = \frac{0,485 (F_i + P_i) + \frac{v_{Ni}}{V_i} (V_i - V_{i-1})}{v_{Ni}}$$

$$R_{Si} = \frac{0,515 (F_i + P_i) + \frac{v_{Si}}{V_i} (V_i - V_{i-1})}{v_{Si}}$$

Le calcul a été effectué pour les années hydrologiques 1960-1961 ; 1964-1965 ; 1969-1970.

TABLEAU II
Coefficients de renouvellement annuel des eaux dans l'ensemble du lac R_i dans la cuvette nord R_{Si} , dans la cuvette sud R_{Ni}

Année	R_i %	R_{Ni} %	R_{Si} %
1960-61	63,4	49,5	88,0
1964-65	51,5	43,0	63,0
1969-70	53,4	44,0	79,0

3. Quantités d'eau introduites annuellement dans la cuvette nord.

Il est possible de faire une évaluation directe des quantités d'eaux qui ont pénétré dans la cuvette nord en 1970. Les teneurs en sodium des eaux situées sur l'axe Baga-Kawa-Baga-Sola en juin est de l'ordre de 1,30 mé/l. En septembre par le seul facteur d'évaporation, la teneur en sodium de ces eaux, refoulées vers le nord de la Grande Barrière, doit être égale à 1,65 mé/l ($\Delta t =$

3 mois, $\bar{I}^m = 0,175$ m, $\bar{Z} = 2,250$ m). Nous prenons comme frontière entre les eaux nouvelles et anciennes la courbe 1,70 pour tenir compte du recul des eaux anciennes jusqu'en octobre. L'erreur sur cette estimation est faible : le gradient de concentration dans l'espace est bien marqué dans cette région, indice de la faiblesse des mélanges que nous négligeons. Cette surface, délimitée au sud par l'axe Baga-Kawa - Baga-Sola, est déduite par planimétrie. La surface correspondant aux îles est soustraite. Le volume, obtenue, en estimant à 2,20 m la profondeur moyenne de cette zone est égal à 5,25 km³. Il doit être majoré du volume d'eau perdu au cours de cette période par évaporation dans cette région (1,25 km³). Donc le volume d'eau qui est directement passé dans la partie méridionale de l'archipel nord est égal à 6,5 km³.

Les eaux qui ont pénétré au niveau de Baga-Kawa dès le mois d'octobre 1970, représentent, en février 1971, 55 % des eaux des Eaux Libres du nord (cf. § 3-24) soit 8,80 km³. Les pertes par évaporation de ces eaux sont égales à 1,15 km³ pendant cette période. Au total 10 km³ d'eaux nouvelles ont pénétré dans la cuvette nord d'octobre 1970 à mi-janvier 1971. Ainsi près de 16,5 km³ d'eau sont passés dans la cuvette nord (soit 44,5 % des apports fluviaux en 1970) : 39 % dans la partie méridionale de l'archipel nord, 61 % dans les Eaux Libres du nord.

N. B. Dans le § II₂ il a été estimé que la cuvette nord recevait 48,5 % des apports fluviaux. Il semble donc que les pertes ne soient pas exactement proportionnelles aux surfaces d'eaux libres. Les pertes par unités de surface seraient légèrement plus fortes dans la cuvette sud.

TABLEAU III

Principales caractéristiques physiques et hydrologiques du lac Tchad

(H m = hauteur d'eau, S = surface liquide du lac, V = volume du lac, F = apports fluviaux, P = apports météoriques, R = coefficient de renouvellement annuel des eaux du lac)

Années hydrologiques	H m à Bol	Cote moyenne	S km ²	V km ³	F km ³	P km ³	R %
58-59	4,40	282,27	21.700	79,6	34,3	4,0	
59-60	4,20	282,07	21.300	75,2	40,0	6,2	55,5
60-61	4,20	282,07	21.300	75,2	44,4	3,2	63,3
61-62	4,50	282,37	21.800	81,3	53,5	3,3	77,0
62-63	4,95	282,82	22.500	91,2	51,6	3,5	71,2
63-64	5,07	282,94	22.800	94,8	42,4	4,1	55,0
64-65	5,07	282,94	22.800	94,8	44,3	4,5	51,5
65-66	4,80	282,67	22.400	88,5	29,3	3,0	28,2
66-67	4,30	282,17	21.400	77,0	34,0	3,8	34,2
67-68	3,95	281,82	20.800	69,2	37,7	4,3	49,3
68-69	3,70	281,57	20.400	68,4	32,7	2,3	50,0
69-70	3,40	281,27	19.900	66,3	33,6	3,9	53,4

ANNEXE III

Le bilan hydrologique du lac permet de connaître globalement les pertes annuelles sans distinguer les pertes par évaporation de celles par infiltrations.

Il est possible d'estimer les parts relatives de ces deux modes d'élimination en supposant négligeable les variations annuelles de la teneur moyenne en sodium des eaux lacustres, [Na], d'une part et celle des eaux d'alimentation [Na]^o d'autre part (1). Le lac est alors considéré comme un lieu de transit continu des eaux au cours duquel une forte quantité d'eau est perdue par évaporation.

Le rapport [Na] / [Na]^o, constant à l'échelle annuelle, correspond à une certaine réduction

(1) La première hypothèse est justifiée par la grande similitude que présentent les cartes de distribution de sodium correspondant à un mois donné, la seconde hypothèse par le fait que l'évolution des teneurs en sodium des eaux de crue de septembre à janvier, soit 85 % des apports fluviaux, ne subit pas de variations annuelles.

moyenne du volume des eaux lacustres par l'évaporation. En effet en l'absence d'évaporation la teneur en sodium des eaux lacustres serait égale à $[\text{Na}]_0$ et le volume fictif V_F à $\frac{V[\text{Na}]}{[\text{Na}]_0}$. L'évaporation ne modifie pas le stock en sels dissous : $V_F [\text{Na}_0] = V [\text{Na}]$

Calculons cette réduction de volume $\frac{\Delta V}{V} = \left(\frac{V[\bar{\text{Na}}]}{[\bar{\text{Na}}]_0} - V \right) / V$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{[\text{Na}]}{[\text{Na}]_0} - 1$$

$[\bar{\text{Na}}]$ = moyenne pondérée de la moyenne pondérée des teneurs en sodium des eaux lacustres en différentes saisons = 1,70 mé/l.

$[\bar{\text{Na}}]_0$ = moyenne pondérée des teneurs en sodium des eaux d'apports = 0,125 mé/l.

d'où $\frac{\Delta V}{V} = 0,925,$

Donc pour le maintien du rapport $[\bar{\text{Na}}] / [\bar{\text{Na}}]_0$ il faut que 92,5 % des pertes soient dues à l'évaporation, 7,5 % aux infiltrations.

BIBLIOGRAPHIE

- BOUCHARDEAU (A.), 1958. — Salinité des eaux du lac Tchad, interprétation des résultats. *Serv. Hydrol. O.R.S.T.O.M.*, 5 p.
- CARMOUZE (J. P.), 1968. — Ions majeurs, phosphates et silicates dans les eaux du lac Tchad en avril 1968. Rapport provisoire. *Sect. Hydrobiol., O.R.S.T.O.M., Centre de Fort-Lamy*, 18 p., 18 fig.
- CARMOUZE (J. P.), 1969. — Salures globales et spécifiques des eaux du lac Tchad en 1968. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrobiol.*, III, 2, pp. 3-14.
- CARMOUZE (J. P.), 1970. — Salures globales et spécifiques des eaux du lac Tchad. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.*, II, 1, pp. 61-65.
- CARMOUZE (J. P.) et DUPONT (B.), 1970. — Nouvelles approximations sur la bathymétrie et la superficie du lac Tchad. *Centre O.R.S.T.O.M., Fort-Lamy*, 1 p., 4 fig.
- GRAS (R.), ILLIS (A.), LÉVÊQUE-DUWAT (S.), 1967. — Le plancton du Bas-Chari et de la partie est du lac Tchad. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrobiol.*, I, 1-4, pp. 25-96, 15 fig.
- LEMOALLE (J.), 1969. — Premières données sur la répartition du fer soluble dans le lac Tchad. *Sect. Hydrobiol., O.R.S.T.O.M., Centre de Fort-Lamy*, 9 p., 8 fig.
- 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.*, VI, 1, pp. 35-74.
- ROCHE (M. A.), 1970. — Hydrogéologie des côtes du lac Tchad à No, Tchingam et Soro (Kanem). *Sect. Hydrol., O.R.S.T.O.M., Centre de Fort-Lamy*, 32 p., 15 fig.
- TILHO, 1910. — Documents scientifiques de la mission Tilho 1906-1909. *Imp. Nat. Paris*, II, p. 553-600.
- TOUCHEBEUF DE LUSSIGNY (P.), 1969. — Monographie Hydrologique du lac Tchad. *Serv. Hydrol. O.R.S.T.O.M.*, 163 p.

Manuscrit reçu le 14 octobre 1971.