

TRAÇAGE HYDROCHIMIQUE NATUREL
DU MOUVEMENT DES EAUX
DANS LE LAC TCHAD

par

Michel Alain ROCHE

Chargé de Recherches de l'O. R. S. T. O. M.

O. R. S. T. O. M. Fonds Documentaire

N° : 7401

Cote : B ex 1

Octobre 1972

Note présentée au Colloque sur l'Hydrologie des lacs

A. I. H. S. Helsinki 1973

B7401 ex 1

~~6493~~

Tracage hydrochimique naturel du mouvement des eaux dans le Lac Tchad

Michel A. Roche

Résumé. Le lac Tchad s'étend sur 20,000 km²; les profondeurs ne dépassent pas 5 à 8 m. Les apports sont assurés à 83 pour cent par le Chari. Le coefficient de renouvellement annuel est en moyenne de 60 à 70 pour cent. Les mouvements des eaux sont déterminés par les facteurs hydro-climatiques (crue du Chari, régime des vents, gradient d'évaporation et de précipitation) et morphologiques (faible profondeur, configuration des rives, séparation du lac en deux parties par les hauts fonds de la 'Grande Barrière').

L'interprétation des variations spatio-temporelles des salures permet de déterminer les mouvements des eaux au cours d'une année. De juin à septembre les eaux pénètrent dans la partie nord du lac essentiellement par l'est de la 'Grande Barrière'. D'octobre à février le courant de décharge longe les côtes nigériennes alors que les eaux reviennent vers la 'Grande Barrière' selon un mouvement circulaire orienté dans le sens des aiguilles d'une montre. Ce courant va en s'atténuant jusqu'en avril.

Abstract. Lake Chad extends over 20,000 km², depths do not exceed 5 to 8 m. The Chari River yields 83 per cent of the total supply. The annual turnover coefficient is about 60 to 70 per cent. Water motions are conditioned by hydroclimatic (flood of Chari, wind regimen, evaporation and rainfall gradient) and physiographical factors (weak depths, shore configuration, division of the lake in two parts by shallows of the 'Grande Barrière').

The interpretation of salinity variations in space and time can explain movements of the water throughout the year. From June to September water comes into the northern part of the lake from the eastern part of the 'Grande Barrière'. From October to February, the current hugs the Nigerian shore whereas waters come back toward the 'Grande Barrière' in a circular clockwise movement. This current goes on decreasing until April.

Au coeur du continent africain, entre 12° et 14° de latitude nord, le Lac Tchad occupe 20,000 km², sur une longueur et une largeur maximales de 200 km (Fig. 1) (Touchebeuf de Lussigny, 1969). Cette cuvette sans émissaire est caractérisée par ses faibles profondeurs qui ne dépassent pas 5 à 8 m (moyenne de 3.3 m en 1969). Quelques 2000 îles ou îlots-bancs, hauts fonds colonisés par les phanérogames, occupent les régions d'archipels et présentent une forme allongée orientée NW-SE. Le lac est divisé en deux parties au niveau de la Grande Barrière, région de faibles profondeurs, d'îles et d'îlots-bancs. La moitié sud reçoit 95 pour cent des apports, assurés principalement par le Chari (83 pour cent), par l'El Beid (4 pour cent) et la Komadougou (1 pour cent). Les pluies ne contribuent qu'à 12 pour cent de l'alimentation (325 mm/an). On a calculé que 85 pour cent du volume annuel est déversé au delta du Chari de juillet à décembre dont 60 pour cent de septembre à novembre. Le coefficient de renouvellement des eaux était de 60 à 70 pour cent pour l'ensemble du lac en 1969, valeur voisine de la moyenne interannuelle. L'évaporation consomme de 92 à 96 pour cent des eaux (215 cm/an), le reste s'infiltre dans les rives ou est abandonné superficiellement dans les cuvettes littorales qui fonctionnent en salines naturelles (Roche, 1970a, b; Fontes *et al.*, 1970). Les précipitations varient de 550 mm au sud à 250 mm au nord, déterminant sur le lac un gradient du terme 'évaporation moins précipitation'. L'Harmattan, de secteur nord-est, souffle d'octobre à mai, tandis que la Mousson, de secteur sud-ouest, prend le relais le reste de l'année.

Le régime hydro-climatique (Rodier, 1964) et la morphologie du lac laissent ainsi prévoir l'existence d'un système de courant particulier. Il semblait cependant

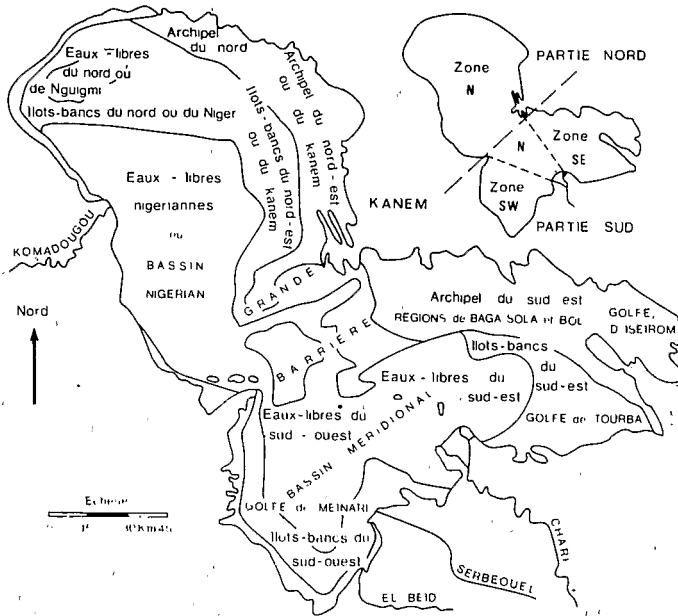


FIGURE 1. Les grandes régions naturelles du Lac Tchad.

très difficile, sans moyens matériels considérables, de réaliser fréquemment des mesures directes simultanées de faibles vitesses sur l'ensemble de cette immense étendue d'eau. C'est pourquoi on a préféré, pour mettre en évidence le mouvement général des eaux au cours d'une année, se tourner dans un premier temps vers une méthode indirecte qui repose sur l'interprétation des variations spatio-temporelles de la salure des eaux. Une première carte détaillée de leur conductivité, établie en mars—avril 1967 (Roche, 1969), ainsi que des travaux ultérieurs (Hopson, 1968; Carmouze, 1969), mettaient en évidence l'existence de circulations préférentielles et la validité d'une telle méthode pour le Lac Tchad.

Les résultats présentés proviennent d'une étude plus complète sur les teneurs en sels et en isotopes lourds dans le système du Lac Tchad, menée par une équipe pluridisciplinaire de l'ORSTOM (Carmouze *et al.*, 1970).

SALURES DES EAUX

Six cartes de teneurs globales en cations (Fig. 2) tracées de mars—avril 1969 à février 1970, et les courbes de variation temporelle de la conductivité (Fig. 3) à dix stations d'échantillonnage journalier ou hebdomadaire (Fig. 4) constituent les documents de base. Des informations moins continues, recueillies dès 1966, permettent d'appuyer ou de compléter certaines conclusions. Les cartes ont été dressées à partir de plusieurs centaines de mesures de conductivité, traduites en teneurs globales en cations.

Variations spatio-temporelles des teneurs ioniques globales

La faible salure des eaux, en regard de l'endoréisme accentué de la cuvette et des conditions climatiques qui y règnent, apparaît d'emblée comme une des caractéristiques les plus remarquables du lac. Les salures (Fig. 2), homogènes sur une verticale, varient spatialement entre les valeurs extrêmes 40 et 1500 $\mu\text{mhos cm}^{-1}$, soit 0.4 et 20 me/l. de cations, auxquels s'ajoutent de 25 à 130 mg/l. de silice dissoute. La valeur moyenne

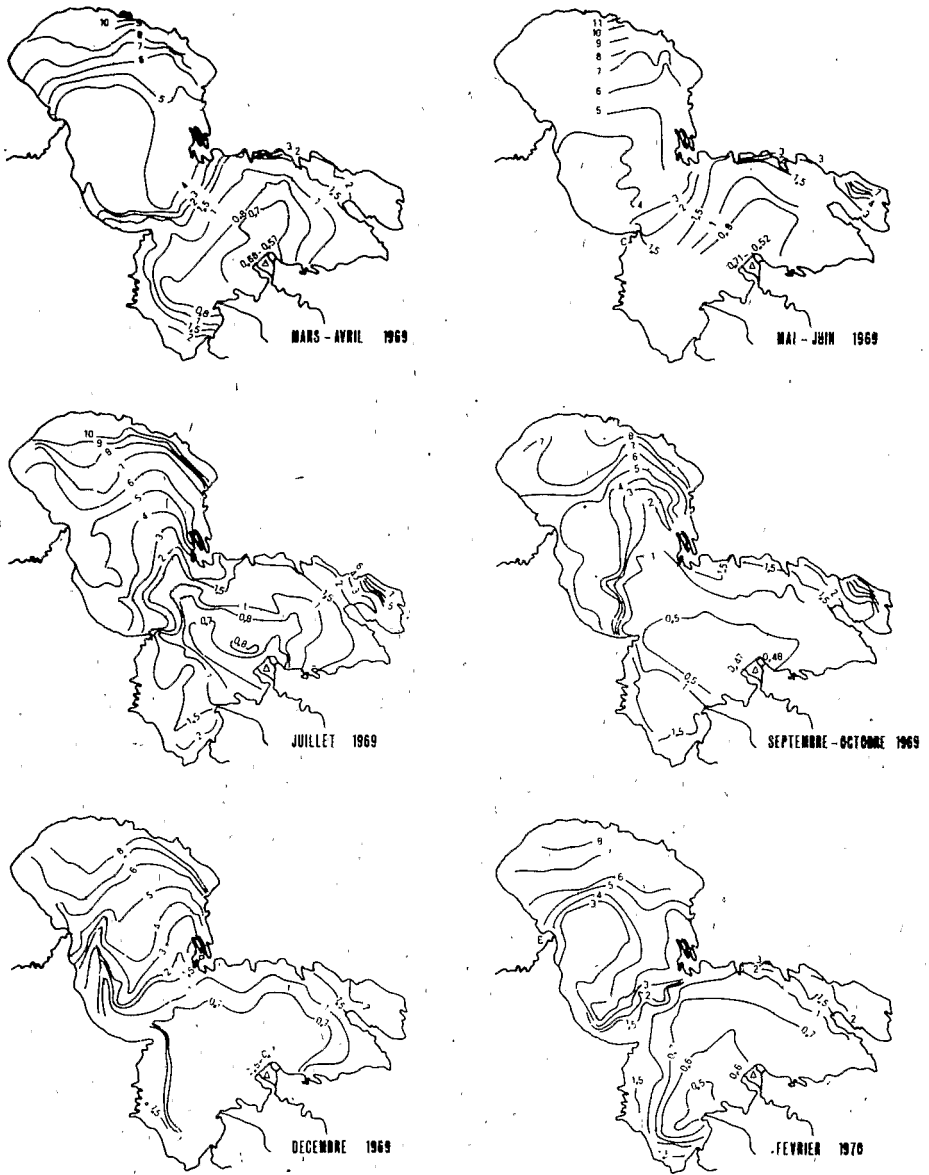
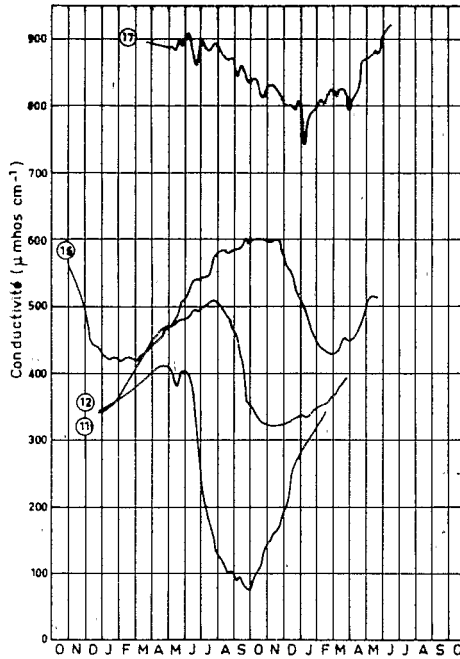


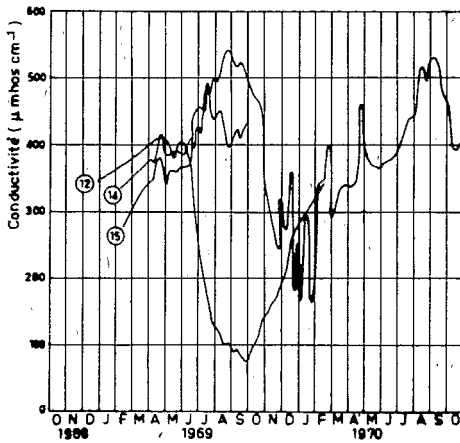
FIGURE 2. Teneurs globales en cations des eaux du lac Tchad (en milliéquivalent par litre).

annuelle pour l'ensemble du lac était en 1969 de 3.95 me/l. de cations soit environ 300 mg/l. d'ions pour une salure moyenne des apports de 0.52 me/l.

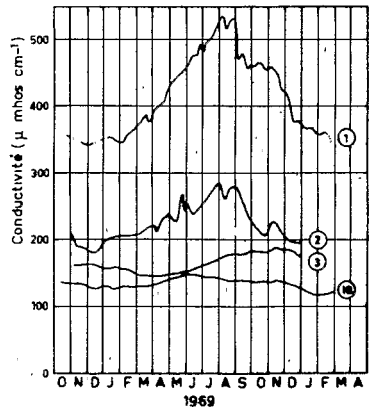
Il existe un gradient de salure positif et croissant de l'embouchure du Chari vers les rives où les teneurs ioniques globales peuvent être de 25 à 40 fois plus élevées que celles des apports. Cette augmentation est provoquée par l'évaporation progressive des eaux au fur et à mesure que celles-ci s'éloignent du delta du Chari. Les teneurs en sels sont ainsi fonction du temps de séjour des eaux dans le lac. Le schéma de répartition concentrique des salures tend toutefois à être modifié dans de vastes régions par le mode de circulation saisonnière des eaux.



- Variation de la conductivité électrique ($\mu\text{mhos}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 25°C) des eaux en des stations de la partie septentrionale du lac Tchad de novembre 1968 à juin 1970.



- Variation de la conductivité électrique ($\mu\text{mhos}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 25°C) des eaux en des stations de la partie septentrionale du lac Tchad de novembre 1968 à octobre 1970



- Variation de la conductivité électrique ($\mu\text{mhos}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 25°C) des eaux en des stations de la zone sud-est du lac Tchad, d'octobre 1968 à février 1970

FIGURE 3. Variation de la conductivité électrique (en $\mu\text{mhos}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 25°C) des eaux en des stations du Lac Tchad. 1 - Hadjer el Hamis; 2 - Soula; 3 - Bol; 10 - Baga-Sola; 11 - Haykoulon; 12 - Borgomerom; 14 - Malamfatori; 15 - C1; 16 - Baga Kiskra; 17 - Magi.

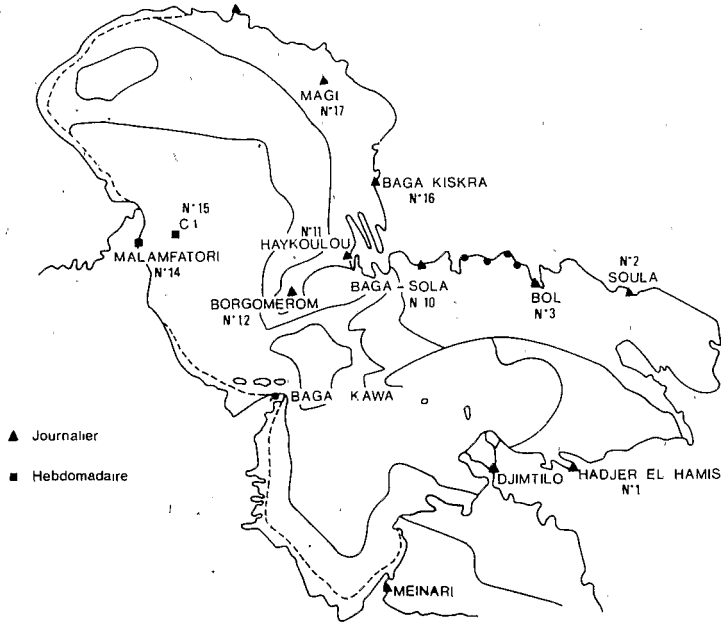


FIGURE 4. Quelques stations de mesures périodiques des salures sur le Lac Tchad de 1968 à 1970.

Les teneurs en cations des eaux du Chari varient de 0.35 me/l. en août à 0.80 me/l. en avril et celles de l'El Beïd de 1.2 à 1.6 me/l. En tous les points du lac, les salures présentent généralement un seul minimum et un seul maximum annuels plus ou moins étalés (Fig. 3). En raison du mode de circulation des eaux, cette variation temporelle peut être très différente, même en deux régions voisines. Le minimum et le maximum annuels peuvent être, selon les points, observés à n'importe quelle époque de l'année. Toutefois, les mois les plus fréquents sont de loin compris entre septembre et février pour les minimums et entre mai et août pour les maximums.

Variations spatiales des teneurs ioniques relatives

Les eaux fluviales qui alimentent le lac ne contiennent pratiquement que des bicarbonates de Ca, Mg, Na et K. Au delta du Chari, les teneurs relatives moyennes en cations des eaux sont: Ca = 39.0 pour cent, Mg = 28.5 pour cent, Na = 24.5 pour cent, K = 8.0 pour cent (par rapport à la teneur totale en cations exprimée en me/l.).

Elles demeurent bicarbonatées dans le lac, bien qu'apparaissent de faibles teneurs en carbonates à partir de 3.5 à 4 me/l. de cations. Les teneurs relatives en sulfates et en chlorures restent aux environs de 1 pour cent. L'évolution des teneurs relatives en cations est en revanche beaucoup plus marquée. En même temps que les teneurs en sels augmentent par suite de l'évaporation, on assiste à une augmentation des proportions en sodium accompagnée d'une diminution des proportions en magnésium dans le sud-est et en calcium et magnésium dans le sud-ouest, la Grande Barrière et le sud du Bassin nigérian et des Îlots-bancs du Kanem. Toutefois, à salures globales égales, les proportions en cations sont loin d'être les mêmes selon les grandes régions du lac. Dans la majeure partie de la zone SE, où l'évolution est la moins marquée, les eaux demeurent bicarbonatées calciques avec des valeurs voisines de celles du Chari. Dans les zones SW

et N, elles deviennent rapidement sodiques. Dans la moitié nord du lac, les proportions ioniques demeurent à peu près stables pour des teneurs globales en cations comprises entre 3 et 7 me/l. Les valeurs moyennes, de l'ordre de Na = 40 pour cent, Ca = 27 pour cent, Mg = 23 pour cent, K = 10 pour cent, occupent une vaste superficie. Sur des superficies plus restreintes des évolutions particulières peuvent avoir lieu. Ainsi, au-delà de 7 me/l., dans les Ilots-bancs du Niger et dans l'Archipel nord, une diminution des proportions en Ca au profit de Na, K et Mg conduit, à l'extrémité de bras côtiers, à des compositions finales telles que Na = 47 pour cent, Mg = 26 pour cent, K = 14 pour cent, Ca = 13 pour cent.

Les modifications de composition observées sont probablement en relation avec la formation de minéraux argileux (montmorillonite) ainsi qu'avec des adsorptions et des échanges ioniques avec les minéraux argileux et la matière organique. Il est à souligner que les apports en suspension du Chari sont constitués essentiellement de kaolinite tandis que la sédimentation argileuse lacustre est à dominante montmorillonite (Dupont, 1970; Carré, 1972; Lemoalle et Dupont, 1971). Du carbonate de calcium précipite dans les régions plus septentrionales et participe également à l'élaboration de tests de mollusques (Lévêque, 1971).

PRINCIPE DE DETERMINATION DU MOUVEMENT DES EAUX

L'évaporation intense des eaux entraîne une différenciation spatiale très forte des teneurs globales en ions dissous. Ces salures marquent les eaux et peuvent être utilisées comme autant de traceurs qualitatifs individuels pour suivre leur déplacement pendant un temps déterminé. Afin de pouvoir repérer l'eau à l'issue de la période considérée, il convient d'évaluer les modifications de salure intervenues, c'est-à-dire:

D'estimer régionalement la variation des teneurs globales en ions provoquée

(1) Par l'évaporation et les pluies en fonction des paramètres physiques et climatiques. Deux modèles simplifiés peuvent être appliqués selon l'époque de l'année:

$$rp_2^+ = rp_1^+ \exp\left(\frac{E-P}{H}\right) \quad \text{et} \quad rp_2^+ = rp_1^+ \left(\frac{H}{H-E+P}\right)$$

dans lesquels rp^+ est la teneur globale en cations (me/l.), H la hauteur dans le lac et $E-P$ la hauteur d'évaporation diminuée de la hauteur de pluie. Pour une période de deux mois, séparant deux campagnes de mesures, les résultats obtenus sont cependant sensiblement analogues.

(2) Par les gains ou pertes spécifiques aux différents ions. Un bilan salin permet de conclure que le piégeage du sodium (temps de résidence: 15 ans) est relativement faible dans le lac. En se basant sur la teneur moyenne en ce cation, on calcule, probablement par défaut, que la régulation saline interannuelle est partiellement assurée dans le lac même par des pertes d'ions qui représentent par rapport aux apports: Ca = 59 pour cent, Mg = 48 pour cent, K = 19 pour cent. Plus de 42 pour cent des ions et 83 pour cent de la silice sédimentent ainsi, le complément étant évacué sans sélectivité avec les eaux qui s'infiltrent. Toutefois, la variation de salure provoquée par l'évaporation reste prédominante car les modifications physico-chimiques ne se réalisent pas totalement au cours des deux mois séparant le relevé des cartes de salures, ni sur l'ensemble de la superficie où sont étudiés les mouvements. Enfin, les données concernant la salure globale, plus nombreuses que celles qui concernent les teneurs en sodium, permettent par ailleurs une détermination spatio-temporelle beaucoup plus précise des mouvements des eaux.

De connaître les autres causes qui interviennent dans certaines régions dans la répartition des salures

Il s'agit des quantités et des qualités variables des eaux d'alimentation, qui permettent par ailleurs leur identification dans les régions proches des débouchés.

En pratique, ces déterminations spatiales ont été faites par superposition de deux cartes de salures globales tracées en moyenne à deux mois d'intervalle. Une flèche permet de concrétiser le déplacement d'une eau de salure donnée, après avoir évalué, suivant les régions, la variation de concentration au cours de la période. En procédant de proche en proche, on peut déterminer l'ensemble des mouvements dans les régions où les salures ont été mesurées.

Selon un principe analogue d'évaluation de la variation de concentration, les valeurs journalières mesurées aux stations d'observation permettent de préciser la chronologie des phénomènes observés spatialement. Elles permettent aussi de compléter éventuellement l'interprétation des cartes de salures en précisant l'origine, puis le sens du déplacement aux alentours de la station.

Une cause d'erreur est liée aux mélanges des eaux qui accompagnent les translations en masse. Ces mélanges sont dus essentiellement à des vitesses et des directions de déplacements différentes sur une même verticale puis à une homogénéisation rapide, à des déplacements latéraux à vitesses variables, en particulier dans les flots-bancs et en bordure des côtes insulaires, à des mélanges latéraux par turbulence à la suite de convergence de courants.

CHRONOLOGIE, SENS ET VITESSES DES MOUVEMENTS

Au début de juin, un courant de décharge, perceptible depuis le delta du Chari, prend toute son ampleur dans la Grande Barrière où il diverge dans la partie septentrionale en direction W et NNE (Fig. 5). Les déplacements vont en s'atténuant vers l'extrémité nord du lac. Le courant portant vers l'ouest au large du delta de la Komadougou se divise en deux branches sur celui-ci. Ce type de circulation se développe jusqu'à fin septembre. Le courant d'alimentation de la partie nord s'élargit considérablement dans les Eaux-libres méridionales de la Grande Barrière. Les eaux continuent à progresser en direction des côtes nigériennes sans que puisse être mis en évidence le courant de retour vers le sud.

En octobre, le mode de circulation s'inverse. Les eaux pénètrent dans le Bassin nigérian le long des rives occidentales. Le courant diverge au niveau de la Komadougou en partie vers les Ilots-bancs du Niger, en partie vers l'Archipel du Kanem et la Grande Barrière, selon un mouvement circulaire orienté dans le sens des aiguilles d'une montre. Dans cette dernière région, les eaux de fortes salures, venues du N, convergent et se mélangent par turbulence avec les eaux plus douces originaires de la partie méridionale du lac et principalement du Chari. Elles repartent alors vers le sud-ouest alimenter le courant occidental. De décembre à février, des quantités importantes d'eau peu minéralisées sont transportées dans le Bassin nigérian. En février, le courant occidental diminue et se trouve plaqué contre la rive par les eaux de salures élevées venues du NE, qui contribuent largement à son alimentation.

En mars et avril, on perçoit, très ralenti dans la partie septentrionale, le mouvement circulaire dont le centre s'est déplacé vers le nord. Le courant occidental semble persister en avril, mais la tendance prédominante est à une homogénéisation des eaux qui se déplacent très lentement. Le mouvement le plus marqué a lieu dans la Grande Barrière où les eaux de fortes salures se dirigent vers le sud et atteignent la zone SW. En mai, l'homogénéisation continue; le mouvement des eaux vers le Bassin méridional ne semble plus se réaliser que dans le sud de la Grande Barrière.

Dans la zone SE, en juillet, les mouvements sont très limités en direction du NE tandis qu'un mouvement circulaire de faible importance est observé dans l'archipel au

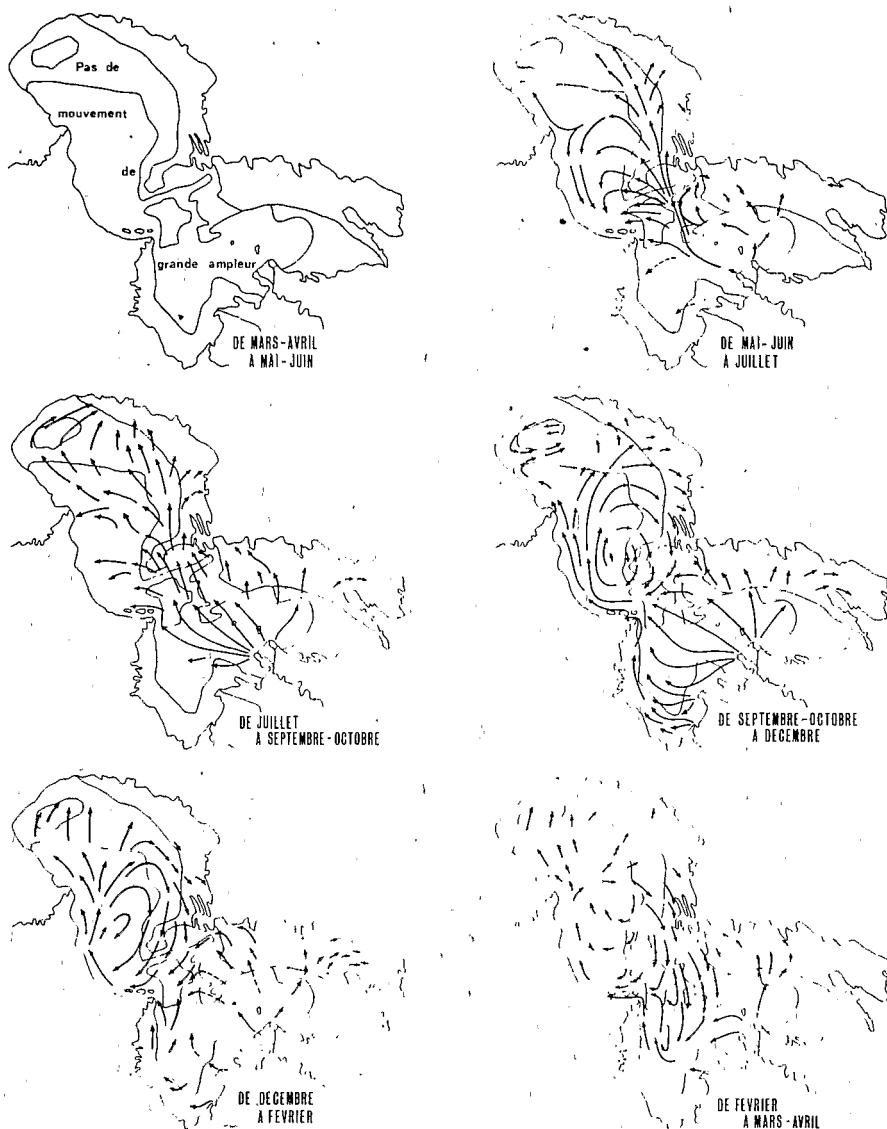


FIGURE 5. Déplacement saisonnier des eaux du lac.

large de Baga-Sola. La progression des eaux vers le Kanem semble être permanente; elle est maximale de septembre à février, puis décroît jusqu'en juillet ou août.

Les eaux fluviales envahissent la zone SW du lac en octobre ou novembre, probablement à la fin d'octobre. Les eaux du Chari y remplacent les eaux qui datent de la crue précédente en les refoulant le long des rives nigériennes avec celles de l'El Beïd. Les eaux, repérables par leurs fortes salures, se dirigent ainsi vers le nord, participant au courant occidental. A partir de mars, les eaux venues de la Grande Barrière se mélangent avec les précédentes, tandis qu'un faible contre-courant continue à refluer vers le nord le long des rives. Les mouvements paraissent ensuite très réduits jusqu'en octobre.

Des vitesses maximales de l'ordre de 20 cm/s ont pu être mesurées localement dans les archipels. Momentanées et susceptibles de s'inverser en quelques heures, elles ne sont pas significatives de la circulation générale. Les vitesses moyennes sur une période de deux mois ne dépassent guère 1 cm/s.

CAUSES DES MOUVEMENTS D'EAU

Si à partir d'août l'importance des débits déversés est la cause principale des circulations, l'explication n'est pas suffisante en juin, bien que débute alors la crue annuelle du Chari. La disparition totale des vents de nord-est, relayés par ceux du sud-ouest, et une différence plus marquée de la hauteur 'évaporation—pluie' entre le sud et le nord, en début de saison des pluies, concourent probablement au déclenchement du courant de décharge dans la partie nord. Alors que les vents du SW tendent à repousser le courant vers la partie orientale de la Grande Barrière, l'apparition de ceux du NE en octobre amène le changement de circulation en repoussant le courant de décharge vers l'ouest. Il est possible que les débits du Chari, qui sont maximaux en octobre et novembre, concourent aussi à ce changement de circulation. Les vents demeurent le principal facteur de l'homogénéisation des eaux. Le rôle de la Grande Barrière comme zone de mélange a été mis également en évidence par l'étude isotopique (Fontes *et al.*, 1970).

CONCLUSION

Les variations spatio-temporelles des salures globales ont permis de déterminer le mode de circulation saisonnière des eaux du lac Tchad sous l'influence du déversement de la crue annuelle du Chari et du frottement des vents. De juin à septembre, un courant de décharge alimente la partie septentrionale essentiellement par l'est de la Grande Barrière. D'octobre à février les eaux pénètrent le long des côtes nigériennes tandis que s'établit un mouvement circulaire qui les ramène dans la Grande Barrière. Ce courant va en s'atténuant jusqu'en avril. Les eaux du Chari envahissent la zone sud-ouest d'octobre à mars.

Des mesures directes du sens et de la vitesse des courants permettraient maintenant de préciser régionalement ce premier schéma de circulation générale des eaux. En effet, les variations interannuelles des facteurs hydroclimatiques et morphologiques, ainsi que les autres observations sur la salure effectuées depuis 1966, permettent de penser que le mode de circulation est peu différent d'une année à l'autre, pour un niveau du lac compris entre 281.5 et 284 m.

BIBLIOGRAPHIE

- Carmouze, J. P. (1969) La salure globale et les salures spécifiques des eaux du lac Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol.* III (2), 3–14.
- Carmouze, J. P., *et al.* (1970) Altération, érosion, transport, sédimentation dans un bassin continental endoréique: la cuvette tchadienne. *Conference on African Geology*, pp. 363–370: Ibadan.
- Carré, P. (1972) Quelques aspects du régime des apports fluviaux de matériaux solides en suspension vers le lac Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.* IX (1), 19–45.
- Dupont, B. (1970) Distribution et nature des fonds du lac Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.* II (1), 9–42.
- Fontes, J. C., Gonfiantini, R. et Roche, M. A. (1970) Oxygène 18 et deutérium; dans les eaux du lac Tchad. *Coll. sur les Isotopes en Hydrologie*, pp. 387–404: AIEA, Vienne.
- Hopson, A. J. (1968) *Annual report 1966–1967*: Federal fisheries Services, Lake Chad Research Station, Malamfatori.
- Lemoalle, J. et Dupont, B. (1971) Les colithes ferrugineuses et les conditions de la sédimentation actuelle du fer dans le lac Tchad. *8ème Congr. Intern. Sediment*: Heidelberg.
- Lévêque, C. (1972) Mollusques benthiques du lac Tchad: Ecologie, production et bilans énergétiques. Thèse doctorat es-science, Paris VI, Octobre.

- Roche, M. A. (1969) Evolution dans l'espace et le temps de la conductivité électrique des eaux du lac Tchad d'après les résultats de 1908, 1967, 1962 à mars 1968. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.* VI (1), 35-74.
- Roche, M. A. (1970a) Hydrogéologie des côtes du lac Tchad à No, Tchingam et Soro (Kanem). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.* VII (3), 89-116.
- Roche, M. A. (1970b) Evaluation des pertes du lac Tchad par abandon superficiel et infiltrations marginales. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.* II (2), 67-80.
- Rodier, J. (1964) Régimes Hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo: ORSTOM, Paris.
- Touchebeuf de Lussigny, P. (1969) *Monographie Hydrologique du Lac Tchad*: Sect. hydrol. ORSTOM, Paris.