

DEUTERIUM ET OXYGENE-18 DANS LES EAUX DU LAC TCHAD

J. -Ch. FONTES

Laboratoire de géologie dynamique,
Faculté des sciences, Paris, France

R. GONFIANTINI*

Laboratoire de géologie nucléaire,
Université de Pise, Italie

et

M. -A. ROCHE

Office de la recherche scientifique
et technique outre-mer,
Centre de Fort-Lamy, Tchad

Abstract — Résumé

DEUTERIUM AND OXYGEN-18 IN WATER OF LAKE CHAD.

Lake Chad is a water body, without outlet, of approximately 20 000 km² in the heart of tropical Africa. In this semi-arid zone with a climate ranging from the western-Sahara to the sub-desert type, the high rate of evaporation (over 2 m per year) gives rise to an extensive isotopic tracing effect in the surface waters. The proportions and nature of the hydrogeological problems of this internal drainage basin of more than 2 million km² provide ample justification for the use of isotope techniques. Our studies form part of an extensive program involving the action of various international organizations (Chad Basin Commission, UNESCO, FAO). The results reported in the paper cover the following subjects: (a) Inflow to lake: four pluviometric stations situated at the north and south of the lake provide a means for evaluating the weighted mean isotopic composition of rainfall on the lake. Weekly sampling and gauging carried out on the Chari River (accounting for 94% of the inflow from rivers) indicates an "annual isotopic modulus" of $\delta^{18}\text{O} = -3.3\text{‰}$ vs SMOW in 1967 and -2.8‰ in 1969. (b) Lake: the heavy isotope content increases with distance from the mouth of the Chari. The increase amounts to 20‰ in oxygen-18 and 110‰ in deuterium in the isolated branches of the northeast shore. However, the enrichment varies with time, as a function of the inflow conditions and the various climatic parameters, and affords a means of defining two areas of evolution in the lake. (c) Losses from the lake: the influence of the enriched waters of the lake is very distinct in the fringe of groundwater near the shore but further inland it disappears.

DEUTERIUM ET OXYGENE-18 DANS LES EAUX DU LAC TCHAD.

Le lac Tchad constitue un plan d'eau sans émissaire de près de 20 000 km² au cœur de l'Afrique tropicale. Dans cette zone semi-aride à climat sahélien à subdésertique, la forte évaporation, supérieure à 2 m par an, occasionne un intense traçage isotopique des eaux de surface. Les dimensions et la nature des problèmes hydrogéologiques de cette cuvette endoréique de plus de 2 000 000 km² justifient par ailleurs l'emploi des techniques isotopiques. Les études effectuées par les auteurs s'insèrent dans un vaste programme qui fait intervenir divers organismes internationaux (Commission du Bassin tchadien, UNESCO, FAO). Les résultats dont ils font état dans le mémoire portent sur les points suivants: a) Apports au lac: quatre stations pluviométriques au nord et au sud du lac permettent d'évaluer la composition isotopique moyenne pondérée des pluies sur le lac; les prélèvements et les jaugeages hebdomadaires dans le fleuve Chari (94% des apports fluviaux) indiquent un «module isotopique annuel» de $\delta^{18}\text{O} = -3,3\text{‰}$ vs SMOW en 1967 et de $-2,8\text{‰}$ en 1969. b) Lac: les teneurs en isotopes lourds croissent à partir du delta du Chari; l'augmentation atteint 20‰ en oxygène-18 et 110‰ en deutérium, dans les bras isolés de la rive nord-est; cependant, l'enrichissement varie au cours du temps en fonction des conditions d'alimentation ainsi que des différents paramètres climatiques, et permet de définir deux unités évolutives dans le lac. c) Pertes du lac: l'influence des eaux enrichies du lac est bien nette dans la frange littorale des nappes phréatiques et s'estompe par la suite.

* Adresse actuelle: Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, Autriche.

INTRODUCTION

Le bassin tchadien, cuvette fermée de quelque 2 300 000 km², se subdivise de nos jours en bassins secondaires endoréiques. Le plus vaste, celui du lac Tchad, qui s'étend entre 6° et 15°N et 7° et 25°E, correspond à la presque totalité de l'activité hydrologique de la cuvette.

Le lac Tchad se caractérise par une faible profondeur (4 m en moyenne) et une vaste superficie (environ 20 000 km²). Les apports des tributaires (Chari-Logone: 83%, El Beïd 4%, autres 1%) et des pluies (12%) totalisent de 40 à 50·10⁹ m³/an et sont concentrés sur 5 à 6 mois (saison des pluies et crue annuelle du Chari), ce qui provoque l'oscillation annuelle, de l'ordre de 80 cm, du niveau du lac [1]. Les pertes proviennent surtout de l'évaporation, mais étant donné l'incertitude sur le calcul de ce terme du bilan, les auteurs retiennent en général [2-4] l'éventualité de pertes par infiltration dans une proportion au maximum égale à 10%.

Les tributaires apportent une moyenne annuelle d'environ 2·10⁶ tonnes de sels dissous au lac [5], où la minéralisation des eaux augmente sous l'effet de l'évaporation. En dépit de ces conditions, la salure moyenne reste faible, de l'ordre de 250 mg/l [6]. L'arrivée de la crue des tributaires, alliée à l'influence des vents et à des facteurs morphologiques comme la faible profondeur, la largeur des passes, la configuration des côtes et des îles, engendre la complexité du déplacement des masses liquides, déterminant ainsi d'importantes variations de salure [6-9].

Ces conditions d'alimentation, d'évaporation et de circulation des eaux laissent également prévoir l'établissement de grandes variations isotopiques que des études préliminaires entreprises depuis plusieurs années ont effectivement confirmé [10-12]. A l'issue de cette reconnaissance, l'espoir de prolonger les interprétations obtenues par l'emploi des méthodes classiques nous a incités à entreprendre une étude isotopique détaillée sur l'hydrologie du bassin du lac Tchad. Nous envisageons ici l'hydrologie de surface: précipitations, tributaires, lac, ainsi que les rapports avec les nappes côtières (fig.1); enfin, on a également étudié la vapeur atmosphérique.

A la suite des études de divers organismes et en particulier de l'ORSTOM et du BRGM, la « Commission du Bassin tchadien », qui regroupe les Etats riverains, a récemment sollicité le concours de l'UNESCO pour l'établissement d'une synthèse hydrologique [13]. Sur le plan pratique, une campagne de sondages systématiques réalisés par la FAO est en cours. Pour sa part, l'ORSTOM développe actuellement une série d'études interdisciplinaires détaillées où s'intègre notre programme isotopique.

PRÉCIPITATIONS

Le régime pluviométrique sur le bassin est lié aux déplacements du front intertropical, surface de discontinuité entre les masses d'air tropical continental (harmattan) et équatorial maritime (mousson). De novembre à février, le front intertropical reste cantonné au sud du bassin, puis il commence à migrer vers le nord. Son passage marque le début de la saison humide, d'autant plus tardive et plus brève que l'on se déplace vers le nord, déterminant ainsi une évolution continue jusqu'à un climat de type subdésertique [14].

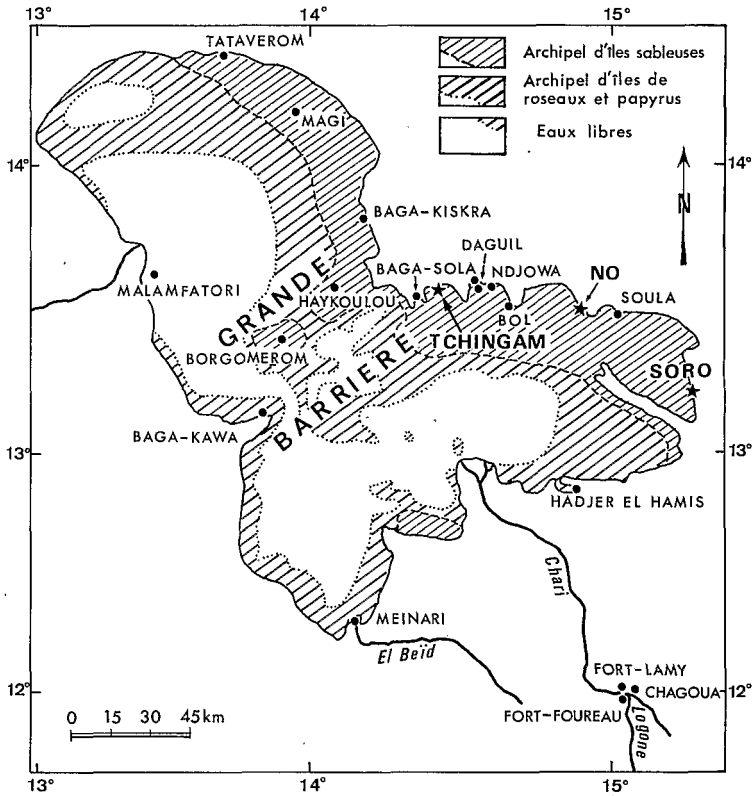


FIG. 1. Lac Tchad et tributaires. Principales stations de prélèvements périodiques (cercles pleins) et situation des sites de polders (étoiles) où le contact lac-nappes a été étudié en sondage. La complexité des contours des rives, en particulier sur la côte nord-est, n'est pas représentée.

TABLEAU I. HAUTEURS ET COMPOSITIONS ISOTOPIQUES MOYENNES PONDEREES DES PLUIES

Station	1967		1969	
	Pluies (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Pluies (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
Sarki (6°57' N, 15°21' E)	-	-	1649	(-6, 6 ₂)
Déli (8°43' N, 15°02' E)	1116	-5, 7 ₉	1416	-4, 7 ₉
Fort-Lamy (12°08' N, 15°02' E)	656	-5, 3 ₂	477	-2, 5 ₉
Bol (13°28' N, 14°43' E)	347	-5, 2 ₉	265	-3, 0 ₀

La valeur de $\delta^{18}\text{O}$ établie pour Sarki en 1969 correspond aux pluies de la période de juillet à novembre, soit 1066 mm.

Les stations de collection des pluies sont réparties en latitude depuis le haut bassin jusqu'au nord du lac. Les données climatologiques et la composition isotopique des pluies sont résumées sur la figure 2. A titre de référence, on peut considérer les moyennes annuelles pondérées et les comparer aux valeurs obtenues en 1967 [11] (tableau I).

Les différences d'une année à l'autre rendent difficile l'évaluation d'une moyenne isotopique interannuelle sur la base des données dont on dispose. Il est toutefois vraisemblable que la valeur moyenne pluri-annuelle de la partie des précipitations qui s'infiltre s'établit autour de $\delta^{18}\text{O} = -5\text{‰}$, correspondant aux valeurs des eaux météoriques les plus fréquemment rencontrées à la partie supérieure des nappes phréatiques [10].

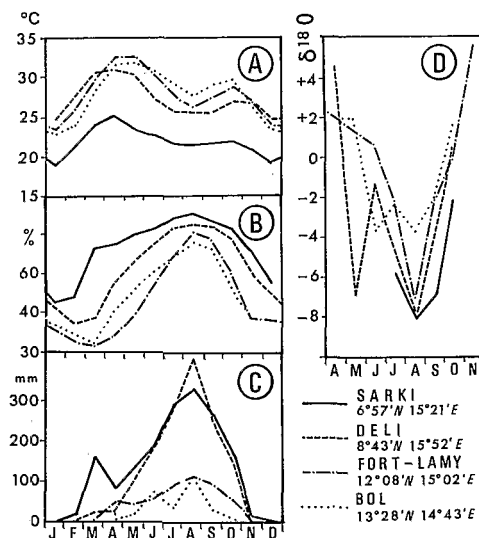


FIG. 2. Moyennes interannuelles des températures (A), de l'humidité relative (B), de la hauteur de pluie (C), et composition isotopique moyenne pondérée (D) des précipitations en 1969. Les données climatologiques affectées à la station de collection de Déli proviennent de la station de Moundou à une vingtaine de kilomètres au nord.

TRIBUTAIRES DU LAC TCHAD

1) Chari et Logone

Les eaux des deux fleuves montrent des variations saisonnières de composition isotopique (fig. 3). L'écart maximal de $\delta^{18}\text{O}$ est sensiblement le même en 1967 [11] et 1969, pour le Chari (6,5‰) et le Logone (7,5‰), prélevés immédiatement en amont de leur confluence (Chagoua et Fort-Foureau).

Les valeurs minimales sont plus basses pour le Logone dont l'alimentation s'effectue essentiellement sur le haut plateau de l'Adamaoua, à la différence du Chari dont la collection des eaux se produit à une altitude inférieure.

L'augmentation de la teneur en isotopes lourds due à l'évaporation s'étale sur plusieurs mois avec, de décembre à février, un palier dû à l'alimentation par les nappes des berges rechargées lors de la crue [13].

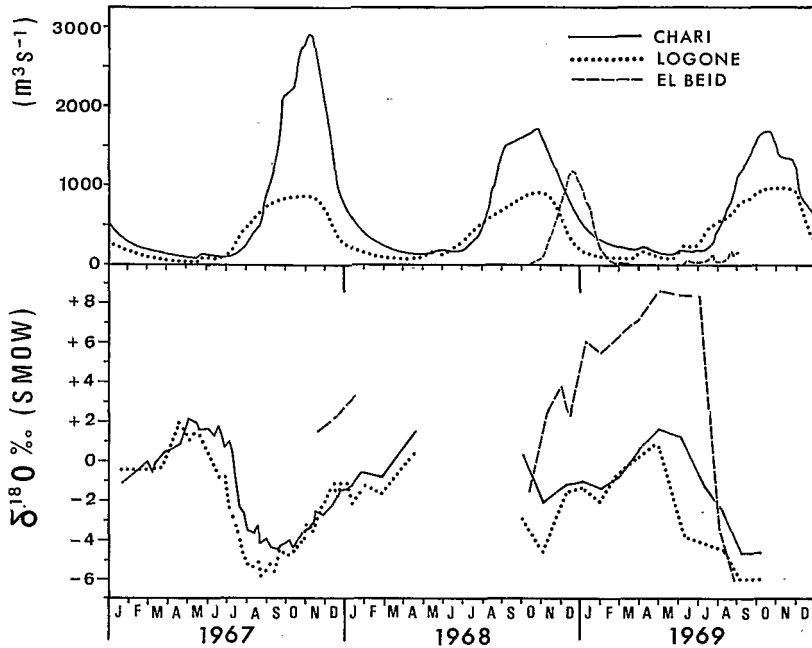


FIG. 3. Compositions isotopiques et débits du Chari à Chagoua, du Logone à Fort-Foureau, et de l'El Beid à Meinari. Les débits de l'El Beid ont été multipliés par 10. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ de février et avril 1968 sont tirées des documents de l'UNESCO [13].

Cet enrichissement affecte la même allure pour les deux fleuves, et le maximum synchrone est atteint en avril-mai. Cependant, le caractère évaporé des eaux apparaît dès le mois de décembre dans l'évolution des teneurs en deutérium et en oxygène-18, alors que les deux cours d'eau réunis écoulent encore près de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. Ceci est dû au drainage partiel des plaines inondées pendant la crue où l'eau s'évapore sur de larges surfaces. La fin de la saison sèche coïncide avec des oscillations et une tendance à la baisse de la teneur en ^{18}O de l'eau des deux fleuves. On peut y voir l'influence des premières pluies, encore que les précipitations qui inaugurent la saison humide sont en général assez chargées en isotopes lourds. Il est d'autre part possible que l'enrichissement isotopique soit également limité par l'apport des nappes phréatiques régionales, sollicitées par l'abaissement du plan d'eau.

Pour le Chari et le Logone, l'amorce de la crue se manifeste dans les teneurs en ^{18}O par une baisse brutale qui intervient plus tôt pour le Logone, dont la montée des eaux est plus précoce. Dans les eaux du Logone le minimum isotopique s'établit sensiblement deux mois avant l'arrivée du maximum de la crue à Fort-Foureau.

Les teneurs en ^{18}O et en D montrent que le léger enrichissement en isotopes lourds qui précède la pointe de crue est le produit d'une variation dans la composition isotopique des crues au cours de leur déroulement et non un effet d'évaporation. La crue comporte à son maximum une proportion d'eaux de pluie des mois de septembre et d'octobre dont la teneur en isotopes lourds est plus haute que celle du cœur de la saison des pluies.

TABLEAU II. DEBITS ET COMPOSITIONS ISOTOPIQUES MOYENNES PONDEREES DU CHARI A CHAGOUA ET DU LOGONE A FORT-FOUREAU EN 1967 ET 1969

Fleuves	1967		1969	
	Débit (10^9 m ³)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Débit (10^9 m ³)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
Logone	12	-3,5 ₄	13	-3,8 ₄
Chari	25	-3,1 ₃	20	-2,1 ₃
Logone + Chari	37	-3,2 ₆	33	-2,8 ₄

Bien que pour le Chari le phénomène ne soit pas aussi net, on constate l'existence d'un déphasage d'environ un mois entre le minimum isotopique et la pointe de crue.

Les moyennes annuelles pondérées, obtenues par planimétrage de la courbe $Q \delta^{18}\text{O}$ en fonction du temps (Q = débit), sont reportées dans le tableau II.

2) El Beïd

Ce petit fleuve draine une plaine d'inondation alimentée par les déversements du Logone [1]. Au début de l'écoulement de l'El Beïd les eaux montrent à la station de Meinari une composition isotopique voisine de celle du Logone, puis, sous l'effet de l'évaporation, s'enrichissent considérablement en ^{18}O dont les teneurs tendent, à la fin de la saison sèche, vers un maximum nettement plus élevé que ceux du Chari et du Logone, et proche des valeurs relevées pour le lac lui-même. Il est possible qu'après l'arrêt de l'écoulement l'enrichissement se réalise dans des conditions d'évaporation analogues à celles des eaux du lac Tchad; mais la station de prélèvement est suffisamment proche du lac pour que les eaux lacustres elles-mêmes puissent y parvenir à cette période.

LAC

Les teneurs en oxygène-18 et en deutérium varient largement dans les eaux du lac selon la saison et la position par rapport au delta du Chari. Pour suivre et étudier ces variations nous avons considéré plusieurs stations d'échantillonnage périodique et effectué des campagnes de prélèvements à diverses périodes de l'année.

1) Corrélation $\delta^{18}\text{O}$ -conductivité

La complexité de la circulation des eaux dans le lac, mise en évidence par l'étude de la conductivité [8], se retrouve dans les teneurs en isotopes lourds des échantillons prélevés lors des missions sur l'ensemble du lac (fig. 4). Dans ce cas les eaux montrent une étroite corrélation entre conductivité et composition isotopique (fig. 5).

Les échantillons prélevés au large du delta du Chari ont des compositions isotopiques voisines de celle du fleuve pour la période considérée.

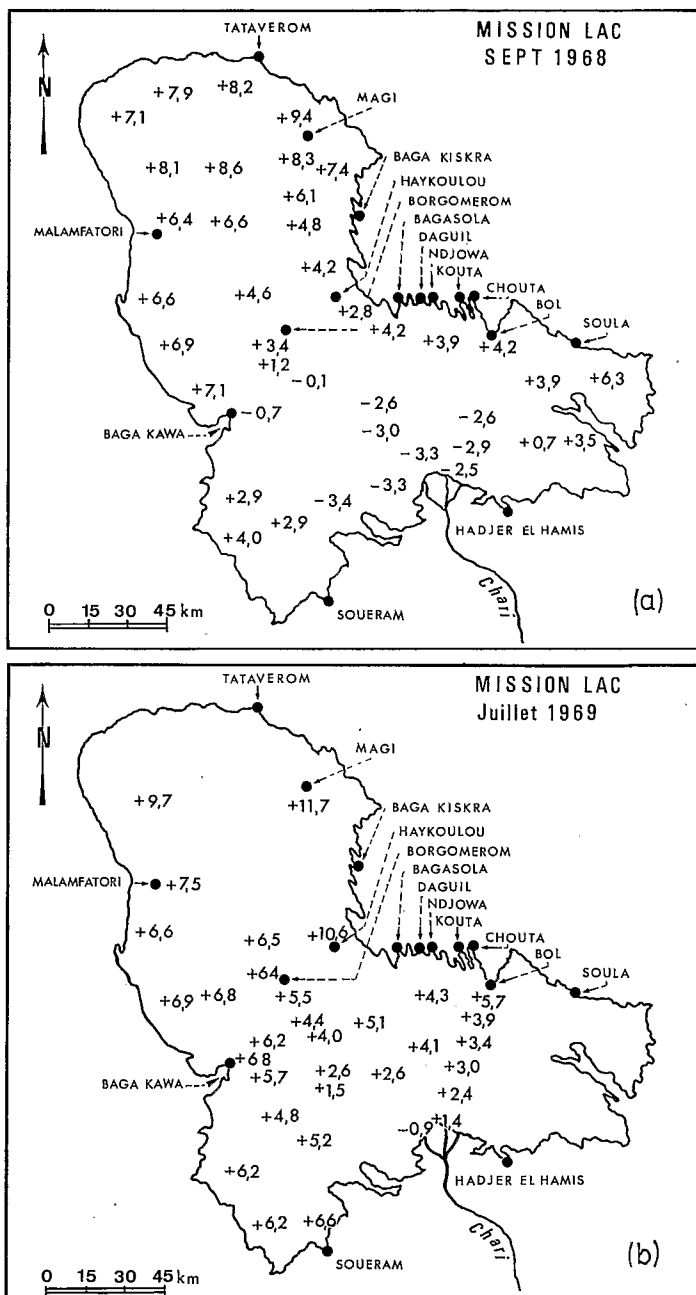


FIG. 4. Composition isotopique des eaux du lac Tchad au cours de deux campagnes d'échantillonnage sérié, et position des stations de prélèvements périodiques. La Grande barrière est jalonnée du nord-est au sud-ouest par les stations de Haykoulou, Borgomerom, Baga-Kawa. Bien que l'effet de séparation des eaux en deux masses soit plus apparent lors de l'arrivée de la crue du Chari (septembre), la comparaison des compositions isotopiques et des conductivités (cf. fig. 5) montre que le phénomène est général.

Au-delà, les eaux subissent ensuite un enrichissement en oxygène-18 qui dépend de leur trajet et du temps de séjour défini par les courants. Comme il est normal, la partie nord la plus lointaine du delta du Chari correspond aux eaux les plus chargées en isotopes lourds. Au mois de septembre 1968, alors que la crue du Chari pénètre largement dans le lac, les eaux se trouvent nettement plus enrichies au nord de la zone de séparation entre les parties sud et nord du lac (région de hauts fonds et d'flots de la « Grande barrière »: fig. 1) tandis qu'en juillet 1969 les différences sont plus faibles de part et d'autre de la Grande barrière (fig. 4).

Aux stations périodiques, les courbes de variations isotopiques saisonnières montrent une valeur maximale au mois de mai, en fin de saison sèche, et un minimum en octobre-novembre qui coïncide avec la poussée de la crue de Chari (fig. 6).

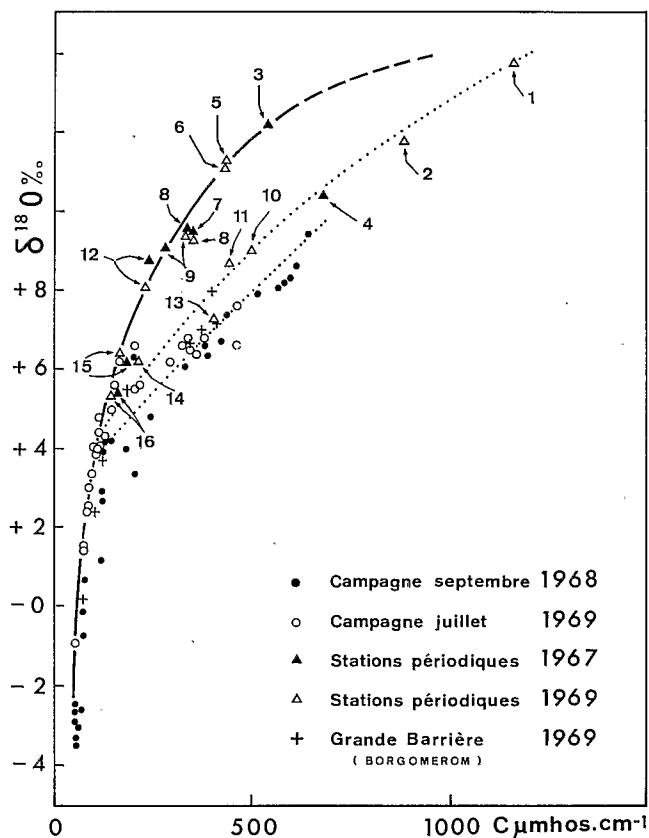


FIG. 5. Composition isotopique et conductivité des eaux du lac Tchad. Moyennes aux stations: Tataverom (1), Magi (2), Isseïrom (3), moyenne de 35 prélèvements au nord de la Grande barrière en avril 1967 (4), Daguil fond de bras (5), Hadjer el Hamis (6), Kouta (7), Daguil (8), N' Djowa (9), Baga-Kiskra (10), Haykoulou (11), Soula (12), Malamfatori (13), Baga-Kawa (14), Baga-Sola (15), Bol (16). Les valeurs correspondant aux eaux libres (missions sur la zone nord du lac et stations de Malamfatori et Borgomerom), où le brassage est plus efficace, tendent à s'aligner sur des segments de droite, tandis que les points correspondant aux stations côtières de la même zone se répartissent encore sur une courbe à faible concavité vers le bas, témoignant d'un mélange imparfait.

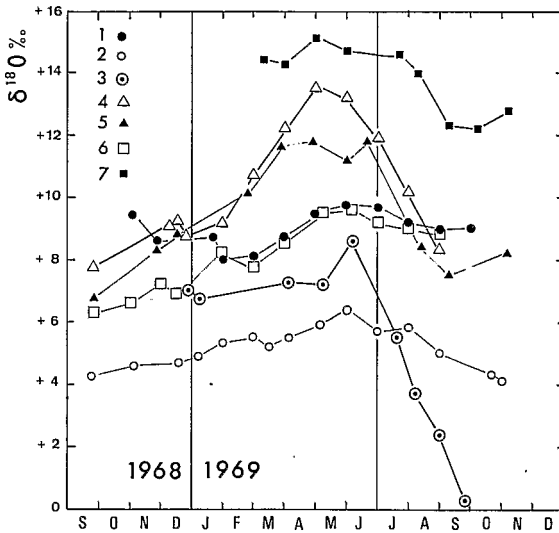


FIG. 6. Evolution de la teneur en oxygène-18 des eaux du lac Tchad aux stations Baga-Kiskra (1), Bol (2), Borgomerom (3), Hadjer el Hamis (4) N'Djowa (5), Soula (6), Tataverom (7).

Toutefois les corrélations entre composition isotopique et conductivité n'apparaissent pas aussi régulières que dans les échantillons provenant des campagnes sur le lac. Mais, si l'on reporte les compositions isotopiques moyennes des stations en fonction de leur conductivité moyenne ainsi que les valeurs correspondant aux missions sur le lac, il apparaît une répartition sur plusieurs courbes distinctes qui se coupent autour des valeurs $\delta^{18}\text{O} = +4\text{‰}$, $C = 100 \mu\text{mhos/cm}$ (fig. 5). La courbe la plus haute regroupe toutes les eaux de la partie sud du lac, la famille inférieure, toutes les eaux du nord, au-delà de la Grande barrière; dans la zone d'intersection des deux courbes on retrouve les stations de la Grande barrière. Il faut y voir l'effet de ce seuil dans la séparation des eaux en deux masses d'évolution distincte.

Or, les paramètres qui régissent l'évaporation et l'enrichissement isotopique sont assez homogènes sur l'ensemble du lac. On devrait donc obtenir une seule courbe d'évolution de la composition isotopique des eaux en fonction de la salure qui rend compte de la fraction évaporée [15]. Dans la zone sud du lac, y compris les fonds de bras, la composition isotopique des eaux évolue dans le diagramme ($\delta^{18}\text{O}$, C) sur une courbe d'évaporation bien définie. Au contraire, dans la zone nord un processus de mélange se superpose à l'évaporation. La courbe tend ici vers un segment de droite de mélange. Une des extrémités de ce segment est constituée par les valeurs moyennes de $\delta^{18}\text{O}$ et de C dans des eaux de la partie sud qui alimentent la partie nord; l'autre représenterait les valeurs d'enrichissement maximal en sels et en isotopes lourds dans les eaux du lac susceptibles de participer au mélange. Sur le plan hydrologique ceci traduit l'évolution suivante: les eaux du Chari pénètrent dans la zone sud, s'enrichissent corrélativement en sels et en oxygène-18 sous l'effet de l'évaporation, une partie des eaux alimente alors la zone nord où les trajets sont favorables au brassage. Le lac Tchad est donc essentiellement formé

de deux bassins, l'un correspondant à la partie sud, avec émissaire vers le bassin fermé du nord. Les eaux du nord ne refluent pas de façon décelable vers le bassin du sud. Les sels devraient ainsi s'accumuler dans le bassin septentrional où doit donc être recherché un mécanisme autonome de régulation saline qui peut être le processus régulateur du lac Tchad dans son ensemble. Ceci doit être rapproché de la localisation, sur les marges orientales du bassin nord, des dépressions évaporitiques interdunaires («natronières») où cristallisent à chaque saison sèche d'importants tonnages de sels véhiculés par les nappes selon un mécanisme complexe [11].

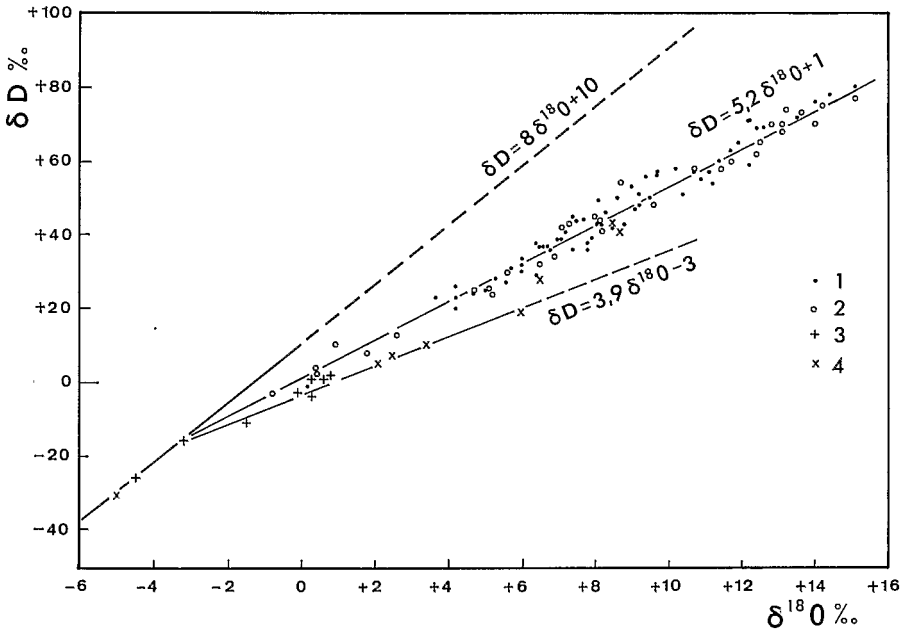


FIG. 7. Evolution comparée des teneurs en deutérium et oxygène-18: Lac Tchad 1966 à 1968 (1), Lac Tchad 1969 (2), Chari à Chagoua (3), El Beïd à Meinari (4).

2) Corrélation $\delta^{18}\text{O} - \delta\text{D}$

Les variations de composition isotopique de l'hydrogène sont parallèles à celles de l'oxygène, et les conclusions que l'on peut en tirer sont donc les mêmes. On peut toutefois ajouter les observations suivantes:

Les échantillons provenant des stations fixes sur le lac se disposent sur le diagramme ($\delta^{18}\text{O}$, δD) de la figure 7 sur une droite de pente un peu plus élevée que celle des trois fleuves, Chari, Logone, El Beïd. Nous n'avons pas pour l'instant d'explication satisfaisante à proposer de ce phénomène qui traduit des conditions d'évaporation différentes. Quoi qu'il en soit, on peut envisager ainsi un moyen de caractériser les eaux évaporées provenant du lac, ce qui présente un intérêt pour l'étude des nappes souterraines de la région.

D'autre part, la distinction sur la base des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et δD apparaît en particulier dans les échantillons prélevés dans l'El Beïd, dont la composition isotopique évolue le long de la droite caractéristique des

fleuves, puis, au milieu de la saison sèche, se déplace dans le domaine de variation des échantillons du lac, démontrant qu'à cette époque les eaux immobiles du lit de l'El Beïd sont assimilables à celles du lac.

On doit enfin noter que les deux droites coupent celles des eaux météoriques pratiquement au même point ($\delta^{18}\text{O} = -3,2$, $\delta\text{D} = -16$ pour la droite des fleuves, et respectivement $-3,3$ et -16 pour celle du lac), point qui correspond à la composition moyenne annuelle pondérée des eaux du Chari, telle qu'elle a été évaluée en 1967.

NAPPES COTIERES

La nappe phréatique de la zone supérieure des formations du Tchad a été étudiée en trois sites des côtes nord et est de la partie méridionale du lac Tchad (fig.8) [16]. L'aquifère, quaternaire supérieur [17], est constitué de sables fins à moyens comportant deux ou trois niveaux de lentilles argileuses. Il repose sur un mur imperméable argileux situé entre 60 et 70 m de profondeur.

A No, en s'éloignant du rivage on observe dans la partie supérieure de la nappe littorale une diminution des teneurs en ^{18}O . Il faut y voir l'augmentation régulière des proportions d'eaux de pluie infiltrées dans la dune par rapport à celles qui proviennent du lac. Pour la même raison, sous le polder adjacent à la dune du Tao, la proportion d'eau météorique décroît avec la profondeur tandis que la conductivité augmente. Ceci traduit le mélange au cours du temps de proportions croissantes d'eau météorique à l'eau lacustre. Sous le polder nord-est, la nappe montre une teneur en isotopes lourds plus haute, dénotant une plus grande proportion d'eau lacustre. Par suite de l'importance de la masse hydrique d'origine météorique à Tao et No-Maïga, on peut exclure une infiltration par le sud-ouest et on est conduit à admettre qu'elle se produit, ou s'est produite, selon l'axe de l'ancien bras. A la différence de la dune de Tao, celle de Maïga ne semble pas contribuer de façon sensible à l'alimentation de la nappe en eau météorique.

A Tchingam, on relève une disposition comparable à celle de la dune de Tao et du polder de No-Maïga. Une étude spécifique de la nappe des argiles craquelées dans le polder lui-même a mis en évidence des eaux à fortes conductivités et teneurs relativement basses en ^{18}O . Ici l'eau météorique qui provient de la dune subit une évaporation modérée dans les argiles et se minéralise donc essentiellement par dissolution de sels.

A Soro, dans la presqu'île de Fatou, la répartition des eaux est du même type qu'à Tao, avec une augmentation en ^{18}O et en sels vers la base, justiciable d'une explication analogue. Il est probable que cette répartition est représentative de celle des îles et presqu'îles du lac. Dans le sens longitudinal du polder de Soro, il se produit une infiltration axiale sous le barrage. Les eaux lacustres se mélangent aux eaux météoriques en provenance des dunes bordières. Il semble effectivement que la proportion des eaux lacustres diminue en profondeur et vers le bord du polder. A l'extrémité, jusqu'à la profondeur maximale atteinte de 15 m, la nappe est d'origine météorique. D'après les observations faites à No, l'interface entre les eaux lacustres et météoriques doit être une zone de mélange progressif.

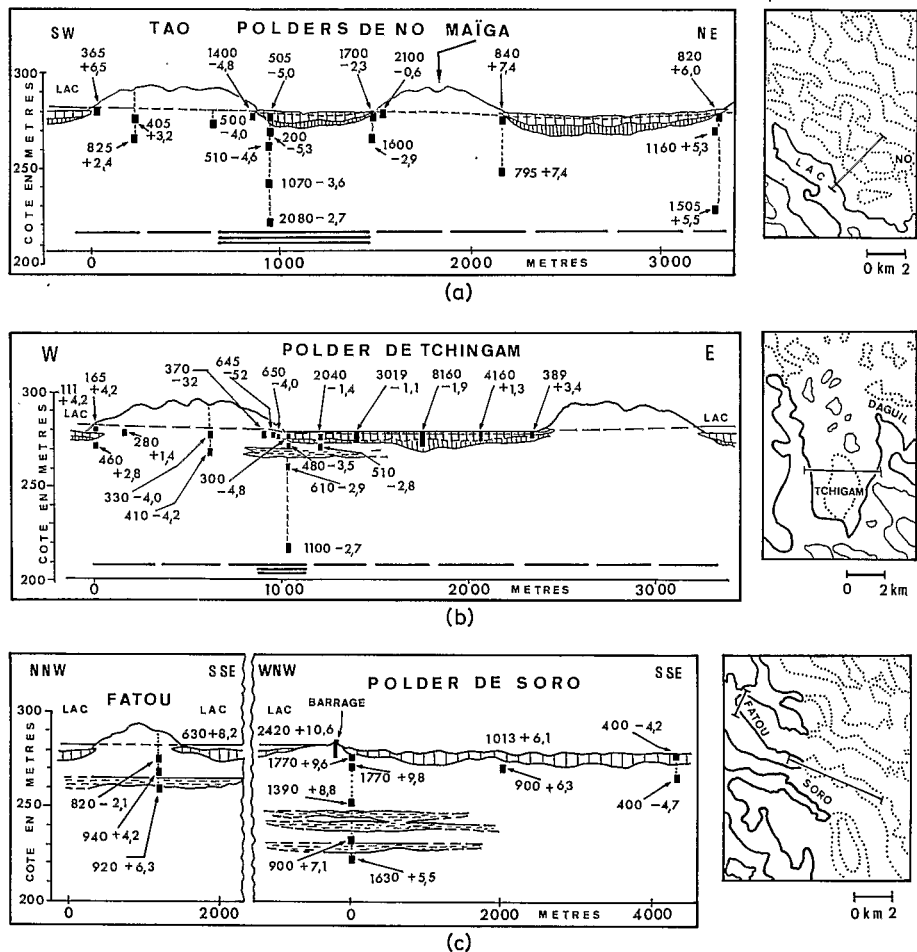


FIG. 8. Coupes hydrogéologiques des sites des polders de No, Tchigam et Soro (cf. fig. 1). Les dépressions interdunaires qui correspondent à d'anciens bras du lac sont représentées en pointillés sur les schémas de situation des coupes. L'aquifère sableux à intercalations argileuses repose à No et Tchigam sur une couche d'argile imperméable épaisse, non reconnue à Soro. Les anciens fonds de bras transformés en polders sont tapissés de couches argileuses. Chaque point de prélèvement correspond à un forage isolé avec tubage crépiné au niveau indiqué sur le schéma. La composition isotopique et la conductivité sont reportées en $\delta^{18}\text{O}$ vs SMOW et en $\mu\text{mhos/cm}$.

CONCLUSIONS

Outre la possibilité d'une évaluation précise du terme apport (fleuves et pluies) du bilan isotopique du lac Tchad, cette revue des résultats permet de dégager les points suivants:

Le lac Tchad est en réalité composé de deux bassins d'évolution distincte. Au sud, les eaux s'enrichissent progressivement en isotopes lourds et en sels sous l'effet de l'évaporation et alimentent le bassin nord.

Au nord, l'analyse des teneurs en isotopes lourds et en sels révèle en plus un mélange partiel des eaux qui n'apparaît pas dans la partie sud. Il n'y a pas retour des eaux du nord vers le sud et le bassin nord devrait donc retenir et concentrer les sels en solution. Cependant, même dans ce bassin les eaux restent peu minéralisées, ce qui implique l'intervention de phénomènes de régulation saline qui pourraient rendre compte de la faible salure des eaux de l'ensemble du lac.

L'étude par sondage des nappes côtières confirme que le système dunaire constitue un réservoir d'eaux météoriques qui se mêlent en proportions variables à des eaux d'origine lacustre. Dans la partie supérieure de la nappe, au gradient piézométrique orienté vers l'intérieur des terres, l'infiltration des eaux de pluie à travers les dunes conduit à une diminution généralement rapide des proportions d'eaux lacustres lorsqu'on s'éloigne des rives. Sur toute l'épaisseur de la nappe, il existe une stratification des eaux; on relève également l'existence d'un mélange où les proportions d'eaux lacustres augmentent avec la profondeur. Localement, la nappe peut être toutefois constituée d'eaux essentiellement lacustres infiltrées selon l'axe des anciens bras. Cette situation complexe reflète probablement les états d'équilibres successifs entre le lac et la réserve hydrique des dunes au cours de l'histoire géologique récente du lac.

APPENDICE

VAPEUR ATMOSPHERIQUE

De décembre 1968 à novembre 1969, une série d'échantillons de vapeur atmosphérique ont été recueillis à Fort-Lamy. Le but poursuivi était d'avoir une idée de la composition isotopique de la vapeur qui échange avec la surface du lac Tchad. Etant donné la difficulté à disposer sur place de glace carbonique, tous les échantillons à l'exception d'un seul ont été prélevés en utilisant comme agent réfrigérant un mélange de 2/3 de glace et de 1/3 de NaCl qui permet de maintenir une température de -20°C : à cette température, une fraction non négligeable de la vapeur atmosphérique ne se trouve pas piégée. On doit donc appliquer à la composition isotopique de la vapeur recueillie une correction qui tienne compte de la fraction de vapeur ainsi perdue. Cette correction a été évaluée en admettant que la fraction perdue est égale au rapport entre la tension de vapeur à -20°C et la tension de vapeur de l'atmosphère ambiante, rapportée à la température de -20°C . On considère d'autre part que la vapeur perdue a une composition isotopique liée à celle de la vapeur piégée par l'intermédiaire des facteurs de fractionnement à l'équilibre à -20°C entre la glace et la vapeur.

Pour tester la méthode on a recueilli simultanément en laboratoire la vapeur atmosphérique dans deux pièges séparés, l'un refroidi avec le mélange de glace et de sel, l'autre avec de la glace carbonique; dans le même temps, l'humidité relative et la température de l'atmosphère étaient mesurées. Les facteurs de fractionnement isotopique pour l'équilibre glace-vapeur à -20°C utilisés pour la correction sont: $\alpha^{18\text{O}} = 1,017$,

TABLEAU III. COMPARAISON DES TENEURS EN ISOTOPES LOURDS DE LA VAPEUR PRELEVEE AVEC LE MELANGE DE GLACE ET DE SEL (T = -20°C) ET DE LA VAPEUR PRELEVEE AVEC LA GLACE CARBONIQUE

	<u>2-10-1969</u>	<u>9-10-1969</u>
Température moyenne (°C)	23	23
Humidité relative moyenne (‰)	80	49
<u>A. Vapeur prélevée avec le mélange de glace et de sel:</u>		
Fraction non condensée (‰)	5,4	8,8
Valeurs isotopiques observées: $\delta D\text{‰}$	-80	-79
$\delta^{18}O\text{‰}$	-12,8	-13,7
Valeurs isotopiques corrigées: $\delta D\text{‰}$	-87	-91
$\delta^{18}O\text{‰}$	-13,7	-15,1
<u>B. Vapeur prélevée avec la glace carbonique:</u>		
Valeurs isotopiques observées: $\delta D\text{‰}$	-94	-97
$\delta^{18}O\text{‰}$	-13,6	-14,9

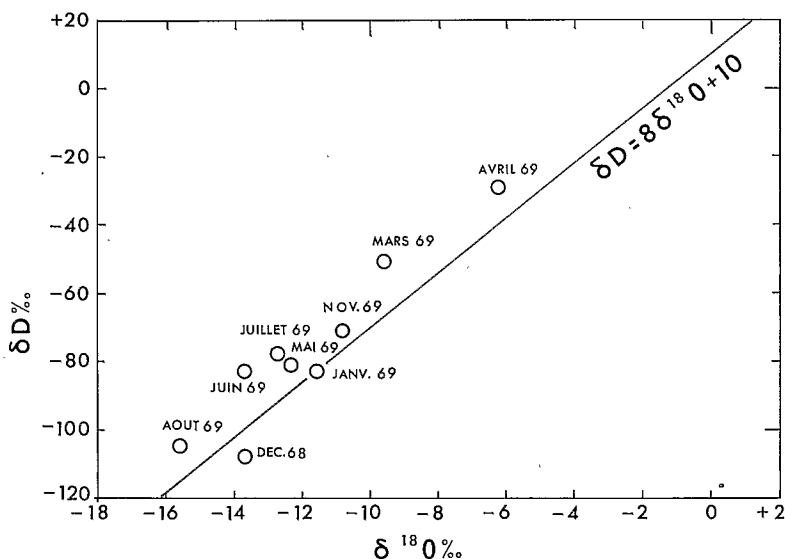


FIG. 9. Teneurs en deutérium et en oxygène-18 de la vapeur atmosphérique à Fort-Lamy, comparées à la corrélation générale des eaux météoriques. Ces valeurs ont été corrigées pour la condensation incomplète dans le mélange réfrigérant utilisé (-20°C) sauf pour l'échantillon de décembre 1968 qui a été condensé dans de la glace carbonique. Les prélèvements correspondent à un pompage continu de 12 h avec un débit de 3 litres/min d'air, à intervalles réguliers d'un mois.

obtenu en extrapolant à -20°C la corrélation pour l'équilibre isotopique entre eau et vapeur [18] augmentée du fractionnement entre glace et eau [19], et $\alpha_D = 1,173$ [20]. Les résultats sont reportés dans le tableau III.

Tandis que pour l'oxygène on peut observer une très bonne correspondance entre les valeurs corrigées et celles de la vapeur condensée dans la glace carbonique, l'accord est nettement moins bon pour l'hydrogène et il y aurait peut-être lieu d'appliquer un facteur de correction empirique. Toutefois, ceci n'a pas été retenu comme suffisamment justifié pour l'instant.

Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et δD corrigées dans les échantillons de vapeur atmosphérique prélevés à Fort-Lamy sont reportées sur la figure 9. Evidemment, les échantillons disponibles, relativement peu nombreux, ne permettent pas de tirer des conclusions sûres à propos des variations saisonnières de la composition isotopique de la vapeur atmosphérique. Il semble, toutefois, que les valeurs les plus hautes interviennent plus fréquemment pendant la saison sèche. On observe que six échantillons sur neuf se répartissent sur une droite d'ordonnée à l'origine $+23\%$ et parallèle à la droite classique des eaux météoriques. Cette valeur de l'ordonnée à l'origine est peut-être partiellement due à la méthode de prélèvement (les essais en laboratoire ont montré un δD , calculé pour le prélèvement avec le mélange de glace et de sel, d'environ 6 à 7% plus élevé que celui observé pour le prélèvement avec la glace carbonique), mais reste certainement en partie réelle.

REMERCIEMENTS

Monsieur J. Rodier, Directeur du Service hydrologique de l'ORSTOM, a encouragé et facilité la réalisation de ce programme. Monsieur H. Faure, Professeur à la Faculté des sciences de Paris, a bien voulu relire et critiquer le manuscrit.

REFERENCES

- [1] TOUCHEBOEUF de LUSSIGNY, P., Monographie hydrologique du lac Tchad, Serv. hydrol. ORSTOM, Paris (1969) 169p.
- [2] BOUCHARDEAU, A., Le lac Tchad, Serv. hydrol. ORSTOM, Paris, Annuaire hydrologique de la France d'Outre-Mer (1956) 9-26.
- [3] TOUCHEBOEUF de LUSSIGNY, P., «Bilan hydrologique du lac Tchad», Comptes Rendus du Symposium de Garda, A.I.H.S., n° 70, 1 (1966) 7-16.
- [4] ROCHE, M. A., Evaluation des pertes du lac Tchad par abandon superficiel et infiltrations marginales, à parafre, 1970.
- [5] ROCHE, M. A., Première estimation des apports en sels au lac Tchad par le Chari, Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol. V 1 (1968) 55-89.
- [6] ROCHE, M. A., «Salinité des eaux du lac Tchad», Monographie hydrologique du lac Tchad (1969), Serv. hydrol. ORSTOM, Paris (1969) 127-62.
- [7] HOPSON, A. J., Annual Report 1966-1967, Federal Fisheries Services, Lake Tchad Research Station, Malamfatori (1968) 83p.
- [8] ROCHE, M. A., Evolution 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. ORSTOM, Sér. Hydrol. VI 1 (1969).
- [9] CARMOUZE, J. P. C., Salures globales et spécifiques des eaux du lac Tchad en 1968, Sect. hydrobiol. ORSTOM, Fort-Lamy (1969) 15p.
- [10] FONTES, J.-Ch., MAGLIONE, G., ROCHE, M. A., Données isotopiques préliminaires sur les rapports du lac Tchad avec les nappes de la bordure nord-est, Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol. VI 1 (1969) 17-34.

- [11] FONTES, J.-Ch., MAGLIONE, G., ROCHE, M. A., Eléments d'hydrologie isotopique dans le bassin du lac Tchad, Serv. hydrol. ORSTOM (1969) 12p.; id., Utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques en Afrique (C. r. Coll. Kinshasa, 1969), AIEA, Vienne (1970) 209-19.
- [12] FAURE, H., FONTES, J.-Ch., GISCHLER, C. E., MOOK, W., VOGEL, J. C., Un exemple d'étude d'hydrogéologie isotopique en pays semi-aride, le bassin du lac Tchad, J. Hydrol. 2 (1969) 145-54.
- [13] UNESCO, Synthèse hydrologique du Bassin du lac Tchad, Rapport technique présentant les principaux travaux des opérations, Projet UNESCO/Fonds Spécial, 1966-69, UNESCO, Paris (sept.-oct. 1969).
- [14] RODIER, J., Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'ouest du Congo, ORSTOM, Paris (1964) 137p.
- [15] FONTES, J.-Ch., GONFIANTINI, R., Comportement isotopique au cours de l'évaporation de deux bassins sahariens, Earth Planet. Sci. Letters 2 (1967) 258-66 et 2 (corr.) (1968) 386.
- [16] ROCHE, M. A., Etude hydrogéologique des côtes du lac Tchad à No, Tchingam, et Soro (Kanem), à paraître.
- [17] SERVANT, M., SERVANT, S., DELIBRIAS, G., Chronologie du Quaternaire récent des basses régions du Tchad, C. r. hebd. Séanc. Acad. Sci., Paris 269 (1969) 1603-06.
- [18] BOTTINGA, Y., CRAIG, H., Oxygen isotope fractionation between CO_2 and water and the isotopic composition of marine atmospheric CO_2 , Earth Planet. Sci. Letters 5 (1969) 285-95.
- [19] O'NEIL, J. R., Hydrogen and oxygen isotope fractionation between ice and water, J. phys. Chem. 72 (1968) 3683-84.
- [20] MERLIVAT, L., NIEF, G., Fractionnement isotopique lors des changements d'état solide-vapeur et liquide-vapeur de l'eau à des températures inférieures à 0°C , Tellus 19 (1967) 122-27.

DISCUSSION

C. E. GISCHLER: I should like to add some comments concerning the region surrounding Lake Chad.

During the period 1966-69 UNESCO conducted a study of water resources in the Chad basin, correlating all available data on Chad and the bordering countries Nigeria, Cameroon and Niger. The UNESCO project preceded a current FAO study directed more towards development.

As a means to evaluating the available data and existing theories, and with a view to filling in certain gaps, an investigation of natural isotopes (including ^{18}O , deuterium, ^{14}C , ^{13}C and tritium) was carried out. With

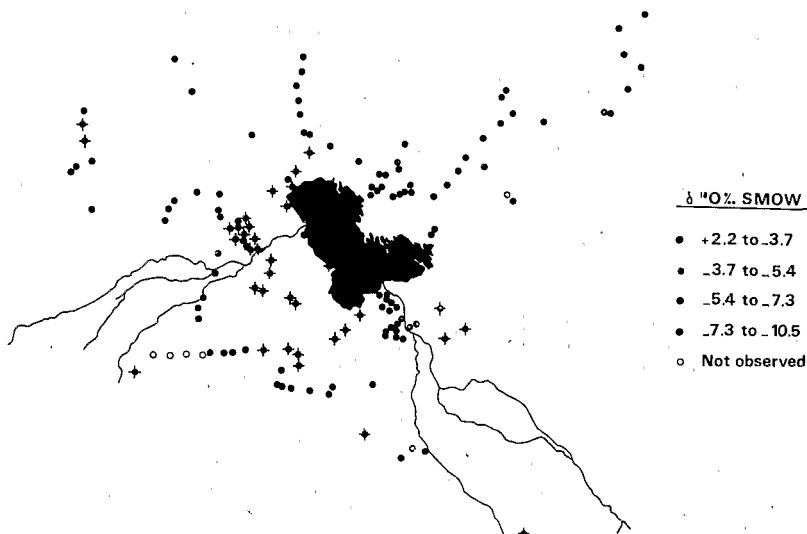


FIG. A. Distribution of $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ SMOW of water samples in the Chad basin.

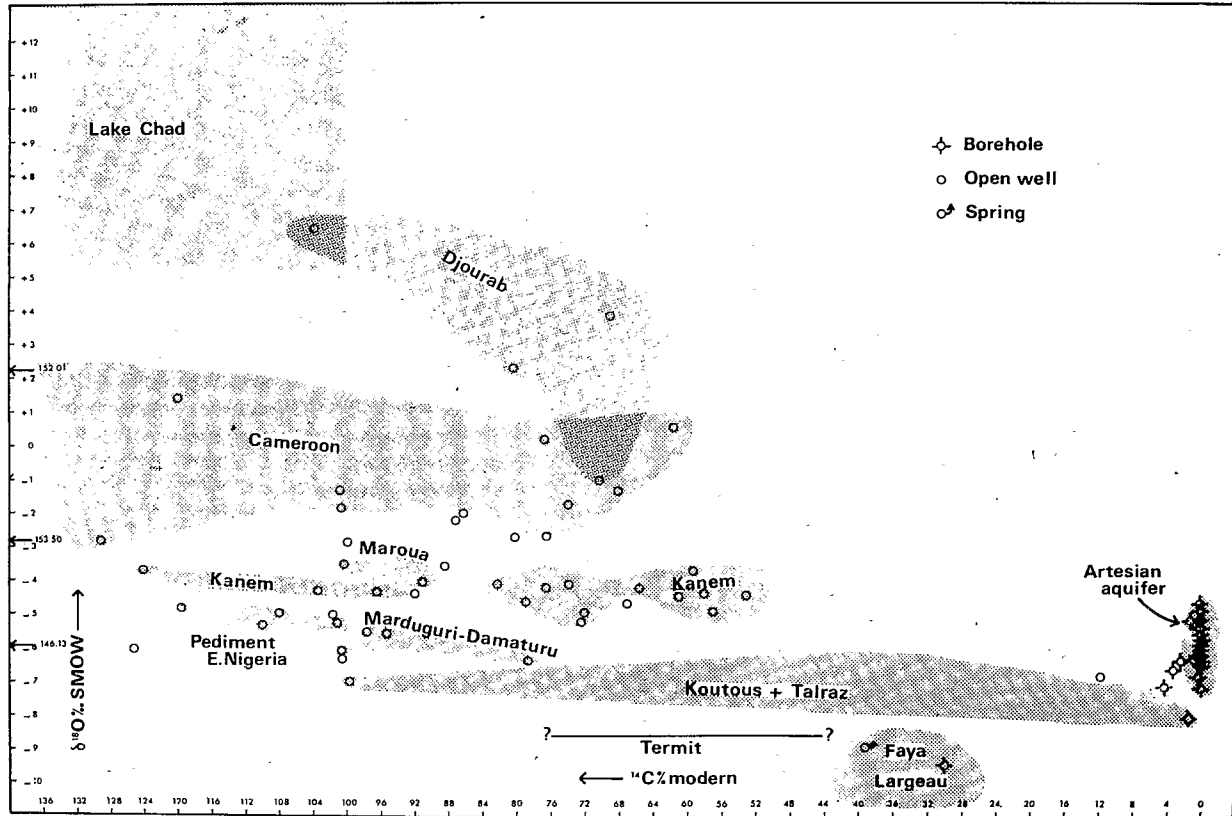


FIG. B. Relationship between ^{18}O and ^{14}C contents in water samples of the Chad basin.

the exception of the tritium, which was analysed by the IAEA in Vienna, all samples were analysed at Groningen, Netherlands.

Although we were interested primarily in groundwater collected from open wells and boreholes (including flowing boreholes tapping the same pressure aquifer), we also collected a limited number of surface water and rain-water samples for reference purposes.

In the Chad basin rainfall decreases as one moves north. It is concentrated in a three-month period, the other months being dry. As a consequence, evaporation greatly exceeds precipitation in the north.

Rivers draining the mountains in the south spread their yearly peak floods over the vast inundated areas, adding to the effect of the local rainfall. Most of the water evaporates, only a small percentage finding its way by surface runoff to the rivers which finally feed Lake Chad.

This and other circumstances create conditions favourable for determining the origin of the different groundwaters, with the help of natural isotopes.

Figure A shows the distribution of the ^{18}O results. The groundwaters of the pressure aquifer have values of about -6‰ SMOW. The groundwaters near the rivers clearly show the influence of evaporation.

The waters from the Mandara mountains reveal the fact that they originate at higher altitudes (this kind of water must have fed the upper (phreatic) aquifer exploited in Marduguri).

The Kanem area is somewhat unusual in the sense that the groundwater level is about 40 m above the level of Lake Chad; the groundwater is presumably precipitation which occasionally - but almost directly - infiltrates the permeable, unleached brown desert soils.

Towards the north there is a depression 120 m below the present lake level where water is found at a depth of 1 m; it can be demonstrated in several ways that this water is subject to continuous evaporation.

Figure B shows the relationship between ^{18}O and ^{14}C for different regions in the Chad basin. The Faya Largeau borehole and spring waters apparently originate in the Tibesti area and form a separate category.

It seems that the waters of Lake Chad do not exchange intensively with the surrounding groundwater and cannot possibly be confused with them.

Many problems remain to be solved and we look forward to seeing how our hydrological theories change as more information becomes available.

Reprint from
"ISOTOPE HYDROLOGY 1970"

29 JUN 1971

~~O. R. S. T. O. M.~~

~~Collection de Référence~~

n° 4791

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
VIENNA, 1970

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

⁸⁰ N° : 4791

Cote : B

80 510