

## ELEMENTS D'HYDROLOGIE ISOTOPIQUE DANS LE BASSIN DU LAC TCHAD

J. -Ch. FONTES

Laboratoire de géologie dynamique,

Faculté des sciences,

Paris, France

et

G. MAGLIONE, M.A. ROCHE

Centre de Fort-Lamy (ORSTOM),

Tchad

### Abstract — Résumé

USE OF ISOTOPE HYDROLOGY IN THE LAKE CHAD BASIN. This study relates to precipitations, surface waters (Chari and Logone, secondary tributaries and Lake Chad), isolated evaporation basins and underground waters in the area north-east of Lake Chad. The method is based on isotope trace measurements after evaporation.

The oxygen-18 content of rain storms is generally within the range +4‰ to -12‰ vs SMOW. The weighted annual means from four stations distributed from the north to the south of the country vary from -7.84 to -5.29‰. The mean contribution to the lake is estimated at approximately -5.3‰. The variation in the isotopic composition of the Chari and the Logone is specified in relation to the hydrograph reading. The mean contribution of these two rivers to Lake Chad is estimated at  $\delta^{18}\text{O} = -3.3\text{‰}$  vs SMOW and that of all the tributaries and the rainwaters at -3.4‰.

The evaporative nature of Lake Chad is brought out by the variations in the oxygen-18 and deuterium contents of the waters. The enrichment which begins from the Chari delta is mainly a function of the relative humidity and may reach 20‰ oxygen-18 and 100‰ deuterium at the extreme end of certain river branches. The isotopic composition of the aquifers ( $\delta^{18}\text{O} = -5\text{‰}$  vs SMOW) is evidence of meteoric feeding. Participation of the lake in the feeding of the aquifers cannot be detected beyond a limited littoral zone. Enrichment due to upward capillary movement of the aquifers in the clay beds of the Kanem evaporation basins reaches +20‰ oxygen-18 and +54‰ deuterium at the moment of salt precipitation. These salts are carried by the infiltrating rainwater which has not undergone appreciable evaporation.

ELEMENTS D'HYDROLOGIE ISOTOPIQUE DANS LE BASSIN DU LAC TCHAD. L'étude porte sur les précipitations, les eaux superficielles (Chari, Logone, tributaires secondaires, lac Tchad), les bassins évaporatifs isolés et les nappes souterraines dans la région nord-est du lac Tchad. Le traçage isotopique consécutif à l'évaporation constitue le fondement de cette étude sur le bassin tchadien.

Les teneurs en oxygène-18 des averses s'inscrivent généralement dans la gamme de +4‰ à -12‰ vs SMOW. Les moyennes annuelles pondérées, correspondant à quatre stations réparties du nord au sud du pays, s'étalent de -7,84 à -5,29‰. L'apport moyen au lac est estimé voisin de -5,3‰. La variation de la composition isotopique du Chari et du Logone est précisée par rapport à l'hydrogramme. L'apport moyen de ces deux fleuves au lac Tchad est évalué à  $\delta^{18}\text{O} = -3,3\text{‰}$  vs SMOW. Celui de tous les tributaires et des pluies est estimé à -3,4‰.

Le caractère évaporitif du lac Tchad est souligné par les variations des teneurs en oxygène-18 et en deutérium des eaux. L'enrichissement à partir du delta du Chari est principalement fonction de l'humidité relative et peut atteindre 20‰ en oxygène-18 et 100‰ en deutérium à l'extrémité de certains bras. La composition isotopique des nappes souterraines ( $\delta^{18}\text{O} = -5\text{‰}$  vs SMOW) témoigne d'une alimentation météorique. La participation du lac à l'alimentation des nappes n'a pu être décelée au-delà d'une zone littorale réduite. L'enrichissement sous l'effet des remontées capillaires des nappes dans les fonds argileux des cuvettes évaporatives du Kanem atteint +20‰ en oxygène-18 et +54‰ en deutérium au moment de la précipitation des sels. Ceux-ci sont véhiculés par des eaux de pluie infiltrées sans avoir subi d'évaporation notable.

## INTRODUCTION

Le bassin tchadien est particulièrement propice aux études d'hydrologie et d'hydrogéologie isotopiques. Son bilan peut s'exprimer par celui du lac Tchad, vaste étendue d'eau libre d'environ 20 000 km<sup>2</sup> [1] essentiellement alimentée par le Chari grossi du Logone (fig. 1 et 2) et à un degré moindre par les précipitations. Le lac ne possède pas d'émissaire de surface. L'évaporation qui, d'après le bilan hydrologique, est comprise entre 2,0 et 2,4 m par an [1], joue un rôle essentiel dans la régulation de ce système. Cependant le lac conserve des eaux peu minéralisées au lieu d'évoluer en sebkha sursalée comme la plupart des bassins fermés continentaux soumis à de telles conditions évaporitiques. Tout le bassin, et en particulier la zone du lac, est bien pourvu en nappes souterraines superposées dont les plus profondes sont ascendantes, souvent même artésiennes. La faible salinité des eaux du lac a été mesurée au début du siècle par les premières missions scientifiques, puis de 1957 à 1969 par l'ORSTOM. On suppose généralement qu'une faible partie des eaux s'infiltré, évacuant ainsi les sels dans les nappes souterraines. La rive nord-est, très circonvolutionnée du fait qu'elle correspond à la submersion d'un ancien relief dunaire, semble particulièrement favorable à une perte des eaux lacustres. Elle est en outre bordée par une gouttière drainante dont le niveau piézométrique est plus bas que celui du lac [2]. Par ailleurs, c'est dans cette région que certaines cuvettes évaporantes, localisées dans les interdunes et alimentées par les nappes, laissent précipiter une quantité de sels du même ordre de grandeur que les 2 · 10<sup>6</sup> tonnes apportées annuellement au lac par le Chari [3]. L'étude des nappes phréatiques et éventuellement profondes dans cette région présente donc un intérêt particulier en ce qui concerne l'approche du mécanisme de désalinisation du lac.

Après avoir inauguré les recherches isotopiques dans la cuvette tchadienne, notre programme s'inscrit maintenant dans le contexte d'une étude isotopique concertée qui a vu tour à tour intervenir l'UNESCO [4], puis actuellement la FAO, dans le cadre de la Commission du bassin tchadien. Les premiers résultats obtenus à l'issue des échantillonnages, séparément menés à bien par l'ORSTOM et l'UNESCO, ont fait l'objet d'une publication commune préliminaire [5].

Nous faisons ici état des compositions isotopiques des précipitations, des deux fleuves Chari et Logone, du lac Tchad, des nappes phréatiques associées au lac sur ses rives nord-est ainsi que des bassins évaporitiques alimentés par ces nappes.

## RAPPELS THEORIQUES

On rappellera brièvement les quelques données théoriques nécessaires à l'interprétation:

a) La composition isotopique d'une eau se repère en parts pour mille de différence par rapport à un standard de référence et s'exprime en unité delta ( $\delta$ )

$$\delta = \frac{R_{\text{éch.}} - R_{\text{std.}}}{R_{\text{std.}}} \times 1000$$

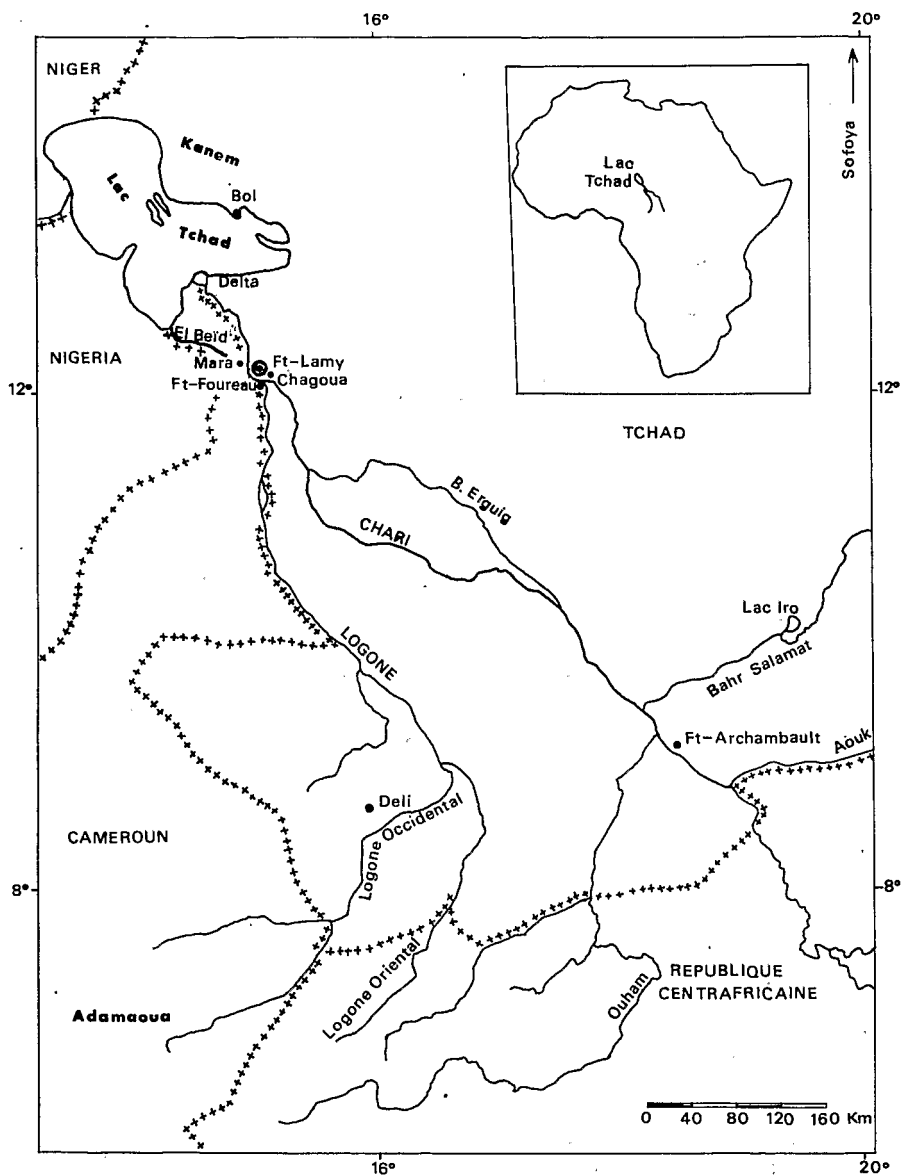


FIG. 1. Carte de situation.

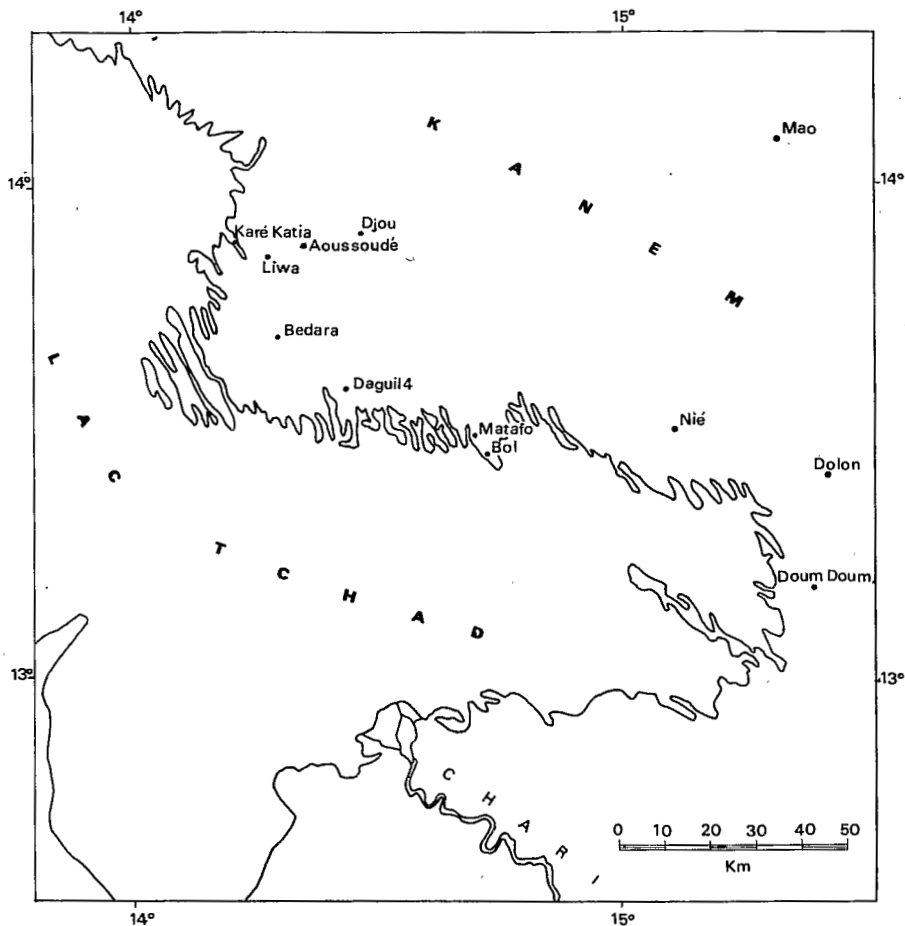


FIG. 2. Points d'eau étudiés dans les nappes souterraines en bordure du lac Tchad.

avec

$$R = \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \text{ ou } \frac{\text{D}}{\text{H}}$$

b) Le standard de référence (std.) est le SMOW (Standard Mean Oceanic Water) qui définit la composition isotopique moyenne théorique de la masse océanique.

c) Par suite de la tension de vapeur plus grande de «l'eau banale»  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  pour une température donnée, l'évaporation à partir des océans entraîne la formation de masses de vapeur appauvries en isotopes lourds par rapport au SMOW.

d) Le processus se produit en sens inverse pour la condensation qui affecte préférentiellement les molécules «lourdes»  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  et DHO.

e) Ces mécanismes de fractionnement évoluent en fonction inverse de la température dans la gamme des températures de surface.

Ainsi on observe que les précipitations ont une teneur en isotopes lourds généralement plus basse que le SMOW, et plus ou moins liée, en ce qui concerne les moyennes, à la température au niveau du sol [6]. Par ailleurs, l'évaporation des eaux continentales, d'origine météorique et de composition isotopique inférieure au SMOW, enrichit la phase liquide restante en isotopes lourds.

f) Les teneurs en oxygène-18 et en deutérium d'une eau évoluent simultanément [7]. Ces variations s'expriment dans le diagramme ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) par des droites dont la pente varie selon qu'il s'agit d'une condensation (processus d'équilibre, droite de pente 8 représentative des précipitations à la surface du globe [6]) ou d'une évaporation (processus de déséquilibre, droites de pente variable inférieure à 8).

Le principe de notre étude repose sur l'examen du traçage isotopique naturel à l'évaporation.

## RESULTATS

### Précipitations

Nous avons choisi quatre stations étagées en latitude sur le territoire de la République du Tchad: Déli, Fort-Lamy, Bol et Sofoya. Les résultats sont résumés dans le tableau I.

TABLEAU I. PRECIPITATIONS (1967)

Localité	Situation	Altitude (m)	P (mm)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{max}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{min}}$	$\bar{\delta}$ pondéré
Sofoya	16°04' N 20°56' E	450	112	-2,1	-9,9	-7,84
Bol	13°28' N 14°43' E	291	347	+4,1	-9,9	-5,29
Fort-Lamy	12°08' N 15°02' E	292	656	+3,2	-11,8	-5,32
Déli	8°43' N 15°52' E	428	1116	-	-11,1	-5,79

Les teneurs en  $^{18}\text{O}$  des averses s'inscrivent généralement dans la gamme de +4‰ à -12‰ vs SMOW. A Déli, seules les pluies supérieures à 10 mm ont été prélevées, soit 809 mm, représentant 72% des précipitations totales. Cela ne change certainement pas le  $\delta^{18}\text{O}_{\text{min}}$ , qui est en général lié aux fortes pluies [6], mais cela ne permet pas de proposer une valeur pour  $\delta^{18}\text{O}_{\text{max}}$ . Par ailleurs, la moyenne isotopique pondérée à cette station se trouve certainement entachée d'erreur par défaut.

En ce qui concerne l'apport au lac par les pluies qui représente en moyenne 12% des apports liquides, on peut fixer autour de -5,3‰  $^{18}\text{O}$  vs SMOW la composition isotopique moyenne des 340 mm de pluie tombés sur le lac en 1967. La moyenne interannuelle, qui est de 320 mm [1], peut être affectée de la même valeur.

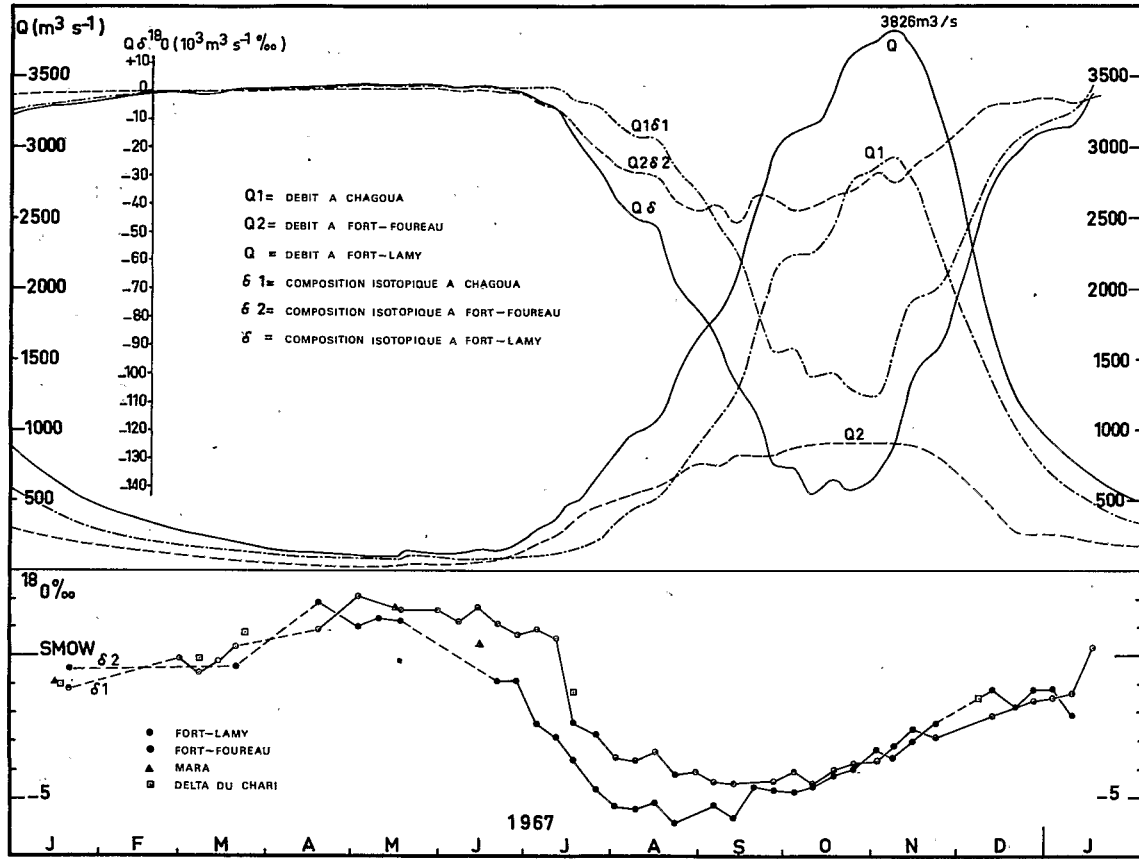


FIG. 3. Variations de la composition isotopique, hydrogramme et débit d'isotopes du Logone à Fort-Foureau et du Chari à Chagoua et Fort-Lamy.

### Tributaires du lac Tchad

C'est essentiellement le couple Chari-Logone (étudié à Chagoua, Fort-Foureau et Fort-Lamy) qu'il convient ici de considérer (fig.1). Les deux fleuves, qui confluent à Fort-Lamy, fournissent au lac environ 94% des apports fluviaux. Le complément est écoulé par l'El Beid (5%) ainsi que par la Komadougou-Yobé et le Yedséram (1%). L'évolution des compositions isotopiques du Chari et du Logone, comparée aux hydrogrammes respectifs (fig.3), montre une étroite analogie. En bref, on retiendra que la crue annuelle se manifeste par une diminution sensible de la teneur en isotopes lourds de l'eau des deux fleuves. L'effet est un peu plus prononcé dans le cas du Logone, qui prend sa source dans le massif montagneux de l'Adamaoua, et montre peut-être ainsi la trace d'un effet de température. Les eaux provoquant la montée de la crue n'ont pratiquement pas subi d'évaporation. Le minimum isotopique est atteint en septembre et correspond à l'ablation évaporatoire minimale. Le déphasage avec le maximum de la crue, qui se situe au début de novembre, suggère qu'à cette époque les eaux ont déjà subi une certaine évaporation. Ce phénomène s'accroît par la suite et les basses eaux d'avril-mai correspondent à la composition isotopique maximale.

L'apport moyen en oxygène-18 de ces deux fleuves au lac Tchad en 1967 est évalué à -3,3‰ par planimétrage de la courbe des débits d'isotopes. Le volume annuel de 1967,  $37 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ , s'inscrit à proximité de la moyenne interannuelle des dix dernières années, qui est de  $41 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ . On peut alors penser que la composition isotopique de 1967 est de même assez représentative de l'apport isotopique interannuel moyen au lac par le Chari.

Les eaux des tributaires secondaires sont généralement plus évaporées que celles du Chari et les quelques valeurs dont nous disposons permettent de fixer leur composition annuelle autour de 0‰  $^{18}\text{O}$  vs SMOW.

### Intérêt de l'étude des apports

La connaissance détaillée de la composition isotopique des pluies permet d'étudier leur contribution éventuelle à la recharge des nappes aquifères. Dans le cas d'une infiltration rapide, la plus grande partie des pluies peut parvenir à la nappe phréatique qui aura une composition isotopique moyenne peu différente de la moyenne isotopique annuelle pondérée des précipitations (-5,3‰ vs SMOW dans la zone centrale du bassin). Si les averses les plus fortes peuvent alimenter la nappe, on trouvera pour celle-ci des compositions isotopiques généralement voisines des minimums relevés pour les pluies, ceci toujours dans le cas d'une infiltration sans évaporation notable. Au contraire, si seule une fraction des plus fortes averses peut après évaporation parvenir jusqu'à la nappe, celle-ci aura alors une composition isotopique témoignant d'un enrichissement variable et difficile à prévoir par rapport aux valeurs minimales des pluies. Le cas des terrains à forte perméabilité et faible rétention est donc le seul susceptible d'interprétations relativement simples. C'est précisément le cas de la plupart des zones riveraines du lac Tchad, occupées par d'anciens systèmes dunaires, en particulier au nord et à l'est.

Le calcul de la moyenne isotopique pondérée des apports au lac (précipitations et tributaires) donne une valeur de -3,4‰  $^{18}\text{O}$  vs SMOW, peu différente de l'apport isotopique moyen annuel du couple Chari-Logone.

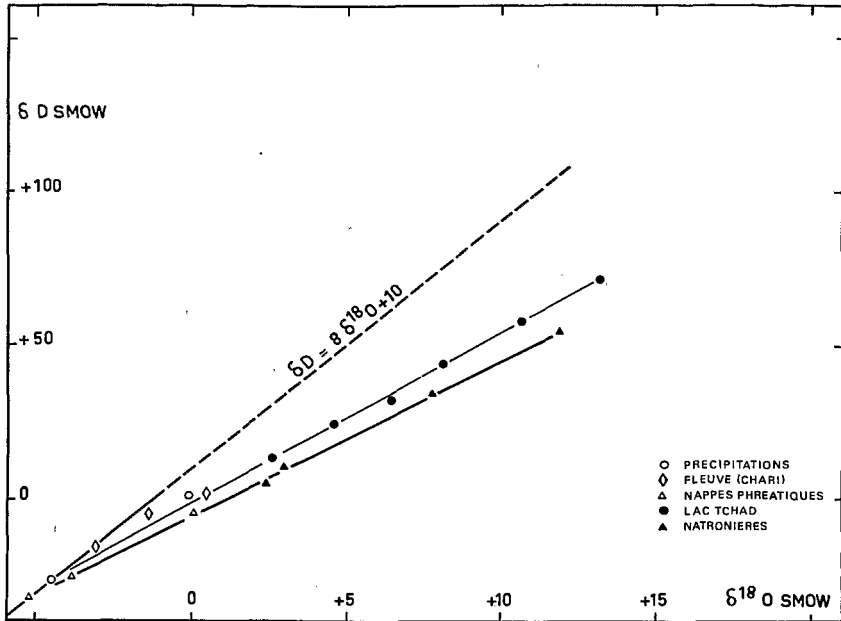


FIG. 4. Corrélation entre la composition isotopique de l'oxygène et celle de l'hydrogène dans les eaux de précipitations, du Chari, du lac Tchad, des nappes phréatiques et des natronières.

### Lac Tchad

Système évaporitique sans émissaire, le lac Tchad montre à partir du delta du Chari un fort enrichissement isotopique sous l'effet de l'évaporation. Cet effet est particulièrement visible dans les variations des teneurs en oxygène-18 et en deutérium des eaux du lac (fig. 4). Cependant ce phénomène est limité par l'intervention de phénomènes d'échanges avec la vapeur atmosphérique. Ainsi, l'enrichissement isotopique de l'eau se trouve plus marqué pendant la saison sèche et dans les zones où l'humidité relative est plus faible, en particulier au fond des bras de la côte nord-est. L'augmentation de la teneur en isotopes lourds peut alors y dépasser 20% en oxygène-18 et 100% en deutérium.

Etant donné la grande surface du plan d'eau pour une masse liquide très peu profonde, les eaux du lac montrent d'assez grandes variations saisonnières (tableau II), dues aux fluctuations des conditions d'échanges avec la vapeur mais aussi à l'intervention des pluies, aux variations de la composition isotopique de l'apport fluvial et aux déplacements des masses liquides [8].

### Nappes souterraines

Notre attention s'est portée sur les nappes de la bordure nord-est (fig. 2) dont on a vu le rôle qu'elles pouvaient jouer dans la régulation saline du lac. Une étude spécifique préliminaire de ce problème [9] montre que les eaux du lac participent à l'alimentation des nappes phréatiques littorales



TABLEAU II. LAC TCHAD - OBSERVATIONS MENSUELLES (1967)

Localité	Situation		Station	t eau (°C)		Hauteur (cm)		C ( $\mu\text{mho} \cdot \text{cm}^{-1}$ )		$\delta^{18}\text{O}$ SMOW	
				min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Karé-Katia	13°54' N	14°11' E	Fond de bras, 6 m de la rive	18,5	32,6	377	444	654	931	+8,9	+15,8
Bol	13°28' N	14°43' E	Point à 200 m de la rive	17,0	30,0	367	454	152	177	+3,8	+7,1

TABLEAU III. NAPPES AQUIFERES DE LA BORDURE NORD-EST

Localité	Djôu	Aoussoudé	Bedara	Daguil 4	Matafo	Nié	Dolon	Doum-Doum
C( $\mu\text{mho} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	970	433	1814	336	139	110	3380	618
$\delta^{18}\text{O}_{\text{min.}}$	-5,4	-5,3	-6,1	-6,8	-5,6	-5,0	-4,1	-4,2

car les compositions isotopiques sont assez voisines. En revanche, plus à l'intérieur des terres, les eaux des nappes phréatiques ont des compositions isotopiques généralement proches de  $-5\text{‰}$   $^{18}\text{O}$  vs SMOW, bien différentes de celles du lac qui sont au minimum de  $+5\text{‰}$   $^{18}\text{O}$  vs SMOW dans cette région. Dans les localités étudiées jusqu'ici, les nappes souterraines témoignent donc d'une alimentation météorique (tableau III).

A Bol des eaux à composition isotopique de l'ordre de  $-4\text{‰}$   $^{18}\text{O}$  vs SMOW ont été prélevées à moins d'un kilomètre de la rive et à 40 m en dessous du niveau du lac. Ainsi, la participation des eaux du lac à l'alimentation des nappes de la bordure nord-est n'a pu être décelée au-delà d'une zone littorale réduite. Le problème de la régulation saline du lac Tchad se pose, semble-t-il, en termes différents d'un simple écoulement de solutions concentrées vers les nappes phréatiques. On a fait l'hypothèse d'un ensemble aquifère vraisemblablement d'origine fossile et actuellement réalimenté par les pluies à sa partie supérieure. Le lac ne jouerait qu'un rôle mineur dans cette alimentation [9].

### Natronières

Dans les dépressions interdunaires (ouadis), la présence de sédiments fins argileux, la faible profondeur de la surface piézométrique et la mise en charge locale de la nappe entretiennent le phénomène de remontée capillaire. L'évaporation est assez intense pour déterminer la saturation et la précipitation d'une série de sels essentiellement alcalins complexes dont le terme ultime est ici le trona ( $\text{NaHCO}_3, \text{Na}_2\text{CO}_3, 2\text{H}_2\text{O}$ ) [10], improprement qualifié de natron ( $\text{Na}_2\text{CO}_3, 10\text{H}_2\text{O}$ ), d'où le nom de certaines de ces cuvettes qui donnent lieu à une exploitation active dans la région de Liwa. Depuis la dune jusqu'au centre de la cuvette du ouadi, une série de trous à la tarière a permis de prélever des échantillons dont les teneurs en isotopes lourds montrent un accroissement régulier depuis les valeurs basses de l'eau de la dune jusqu'aux saumures carbonatées très enrichies qui affleurent au centre de la dépression (tableau IV).

Cette filiation entre l'eau météorique des nappes et les saumures apparaît nettement dans la variation continue relevée sur la figure 4 entre les teneurs en oxygène-18 et en deutérium. Cette étude sériée permet de mettre en évidence le rôle vecteur, vis-à-vis des sels dissous, d'une eau météorique n'ayant pas subi d'évaporation intense avant de s'infiltrer dans le sable dunaire.

TABLEAU IV. NATRONIERE DE LIWA (7. X. 67)

Distance de la dune (flanc ouest)	0 m	20 m	71 m	180 m	220 m	260 m
$C(\mu\text{mho}\cdot\text{cm}^{-1})$	2 022	37 925	104 068	107 785	100 933	104 700
$\delta^{18}\text{O}$ vs SMOW	-0,3	+0,9	+2,5	+2,9	+7,7	+11,9
$\delta\text{D}$ vs SMOW	-4	+1	+5	+10	+34	+54

## CONCLUSION

Les précipitations montrent un appauvrissement sensible en isotopes lourds. Les eaux d'origine pluviale soumises à évaporation s'enrichissent ensuite d'une façon considérable en oxygène-18 et en deutérium. Ceci entraîne un traçage isotopique particulièrement net, susceptible d'applications immédiates aux recherches hydrogéologiques. En particulier, on peut distinguer la composition isotopique des nappes phréatiques de celle du lac dans la région nord-est. La mise en évidence de l'alimentation météorique de ces nappes constitue en fait nouveau et limite la participation des eaux lacustres à une frange littorale qu'il appartient aux études futures de préciser, mais qui reste certainement réduite. Les sels qui précipitent dans les cuvettes du Kanem sont véhiculés par des eaux de pluies infiltrées sans avoir subi d'évaporation notable. La désalinisation du lac Tchad prend ainsi l'aspect d'un ensemble de mécanismes plus complexes qu'il ne semblait et où interviennent des quantités massives d'eau météorique.

## REMERCIEMENTS

Les mesures de teneur en deutérium ont été aimablement exécutées par le Professeur R. Gonfiantini, du Laboratorio di Geologia Nucleare de Pise (Italie).

## REFERENCES

- [1] TOUCHEBEUF DE LUSSIGNY, P., Monographie hydrologique du bassin du lac Tchad, ORSTOM, Service hydrologique, Paris (1969) 241p.
- [2] SCHNEIDER, J.L., Relations entre le lac Tchad et la nappe phréatique (République du Tchad), Extrait de la publication n° 70 de l'AIHS (Symposium de Garda) (1967) 122-31.
- [3] ROCHE, M.A., Première estimation des apports en sels au lac Tchad par le Chari, Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie V 1 (1968) 55-89.
- [4] GISCHLER, C.E., Synthèse hydrologique du bassin du lac Tchad, Nature et Ressources III 3 (1967) 10-16.
- [5] FAURE, H., FONTES, J.-Ch., GISCHLER, C.E., MOOK, W., VOGEL, J.C., Un exemple d'étude d'hydrogéologie isotopique en pays semi-aride, La cuvette tchadienne, J. Hydrol., sous presse.
- [6] DANSGAARD, W., Stable isotopes in precipitation, Tellus 16 4 (1964) 436-68.
- [7] CRAIG, H., Isotopic variations in meteoritic water, Science 133 (1961) 1702-03.
- [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, 1962 à mars 1968, Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie VI 1 (1969) 35-78.
- [9] 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, Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie VI 1 (1969) 16-34.
- [10] MAGLIONE, G., Présence de gaylussite et de trona dans les natronières du Kanem (pourtour nord-est du lac Tchad), Bull. Soc. fr. Minéral. Cristallogr. 91 (1968) 388-95.

## DISCUSSION

M. NDAYIZIGA: Are the aquifers fed by the lake or by infiltration from the rivers?

M. A. ROCHE: As I pointed out, lake water can represent at most a tiny fraction of the water which feeds these phreatic water-courses at points more than a very short distance from the shore. The work which we now have in hand is in fact intended to explain how water does infiltrate these aquifers.

Reprint from  
"PEACEFUL USES OF ATOMIC ENERGY IN AFRICA"

-5 FEVR. 1965  
O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 4535

Cote : B

19 DEC. 1970

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

Collection de Référence

n° ~~4535~~