

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

Jean-Charles FONTES
Laboratoire de Géologie Dynamique, Faculté des Sciences, Paris V

Gilbert MAGLIONE
Section Géologie, Centre O.R.S.T.O.M., B.P. 65, Fort-Lamy, Tchad

Michel-Alain ROCHE
Section Hydrologie, Centre O.R.S.T.O.M., B.P. 65, Fort-Lamy, Tchad

Communication présentée au colloque de l'O.U.A.
sur les utilisations pacifiques de l'énergie atomique.
Kinshasa, 28 Juillet - 1er Août 1969.

Résumé :

L'étude porte sur les précipitations, les eaux superficielles (Chari, Logone, tributaires secondaires, lac Tchad), les bassins évaporitiques 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 ^{18}O des averses s'inscrivent généralement dans la gamme de + 4 ‰ à -12 ‰ vs SMOW. Les moyennes annuelles pondérées, correspondant à 4 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 $\delta^{18}\text{O} = -3,3$ ‰ vs SMOW. Celui de tous les tributaires et des pluies est estimé à -3,4 ‰.

Le caractère évaporitique du lac Tchad est souligné par les variations des teneurs en ^{18}O et ^2H des eaux. L'enrichissement à partir du delta du Chari est principalement fonction de l'humidité relative et peut atteindre 20 ‰ en ^{18}O et 100 ‰ en ^2H à l'extrémité de certains bras. La composition isotopique des nappes souterraines ($\delta^{18}\text{O} = -5$ ‰ 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 évaporitiques du Kanem atteint + 20 ‰ en ^{18}O et + 54 ‰ en ^2H au moment de la précipitation des sels. Ceux-ci sont véhiculés par des eaux de pluie infiltrées sans avoir subi d'évaporation notable.

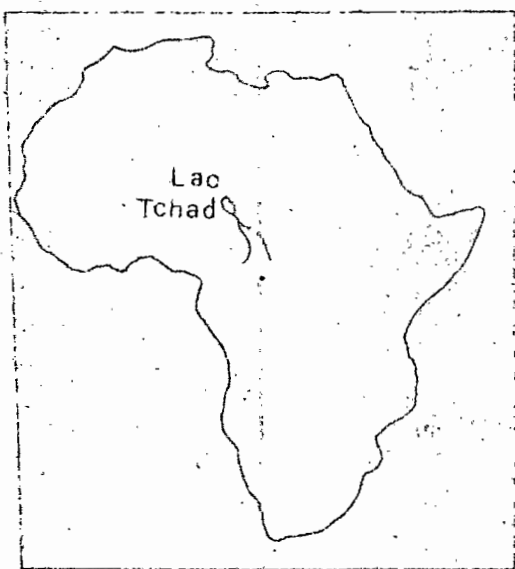
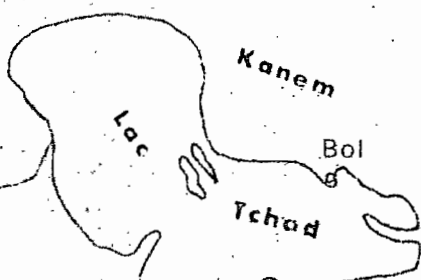
LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 : Carte de situation.
- Fig. 2 : Points d'eau étudiés dans les nappes souterraines en bordure du lac Tchad.
- 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.
- Fig. 4 : Corrélation entre la composition isotopique de l'oxygène et celle de l'hydrogène dans les eaux des précipitations, du Chari, du lac Tchad, des nappes phréatiques et des "natronières".

16°

20°

Fig. 1



12°

12°

NIGERIA

Ft-Lamy
Chagoua

Ft-Foureaux

El Beïd

Mara

Delta

Bol

TCHAD

B. Erguig

CHARI

Lac Iro

Bahr Salamat

Ft-Archambault

Aouki

LOGONE

Deli
Logone Occidentale

CAMBODJAN

3°

8°

Adamoua

Logone Orientale

Ouhang

REPUBLIQUE
CENTRAFRICAINE

0 40 80 120 160 Km

16°

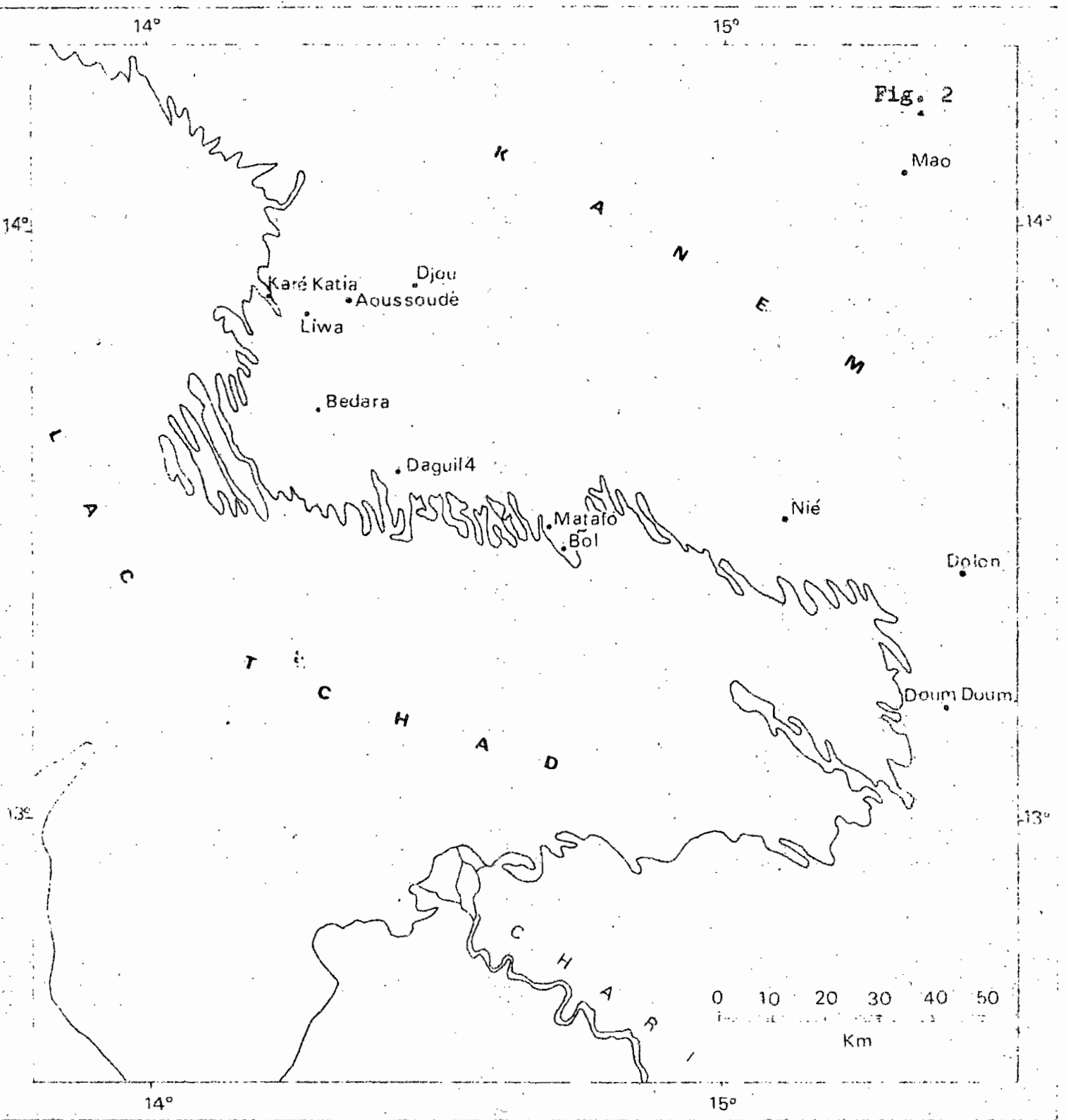
20°

INTRODUCTION

Le bassin tchadien est particulièrement propice aux études d'hydrologie et d'hydrogéologie isotopique. Son bilan peut s'exprimer par celui du lac Tchad, vaste étendue d'eau libre d'environ 20.000 km² (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'O.R.S.T.O.M. 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 de 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 2.10⁶ 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 une étude isotopique

Fig. 2



concertée qui a vu tour à tour intervenir l'U.N.E.S.C.O. (4), puis actuellement la F.A.O., dans le cadre de la Commission du bassin tchadien. Les premiers résultats obtenus à l'issue des échantillonnages, séparément menés à bien par l'O.R.S.T.O.M. et l'U.N.E.S.C.O., 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 :

1. 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 (δ)

$$\delta = \frac{R \text{ éch.} - R \text{ std.}}{R \text{ std.}} \times 1000 \text{ avec } R = \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \text{ ou } \frac{\text{D}}{\text{H}}$$

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

3. Par suite de la tension de vapeur plus grande de "l'eau banale" H_2^{16}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.

4. Le processus se produit en sens inverse pour la condensation qui affecte préférentiellement les molécules "lourdes" H_2^{18}O et D_2O .

5. 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.

6. 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

1. Précipitations

Nous avons choisi 4 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 : Précipitations - 1967

Localité	Situation	Altitude (m)	P (mm)	^{18}O max	^{18}O min	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}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 ^{18}O min. qui est en général lié aux fortes pluies (6), mais cela ne permet pas de proposer une valeur pour ^{18}O 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}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.

2. Tributaires du lac Tchad

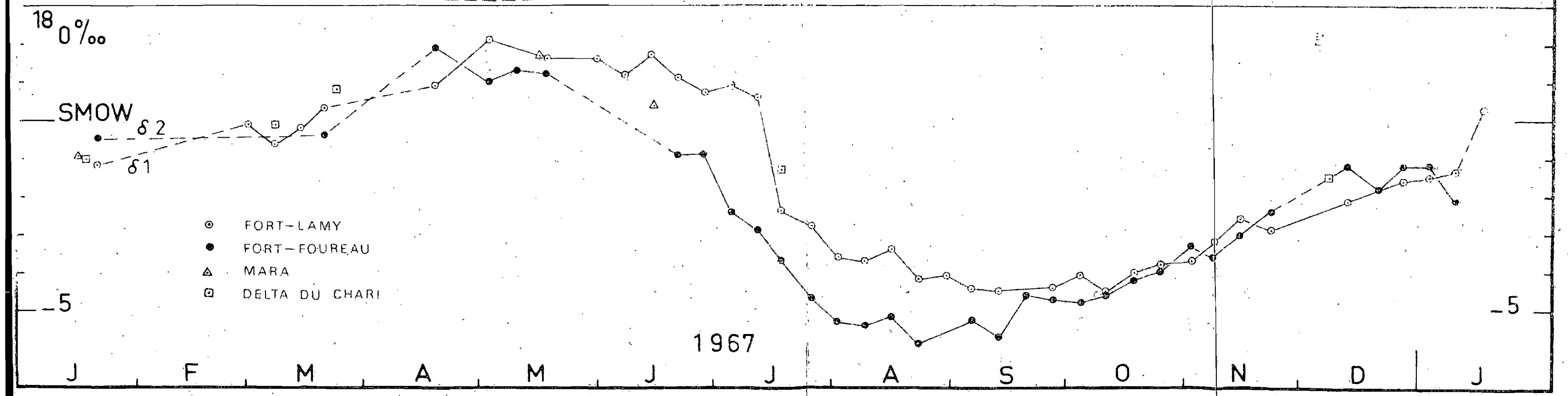
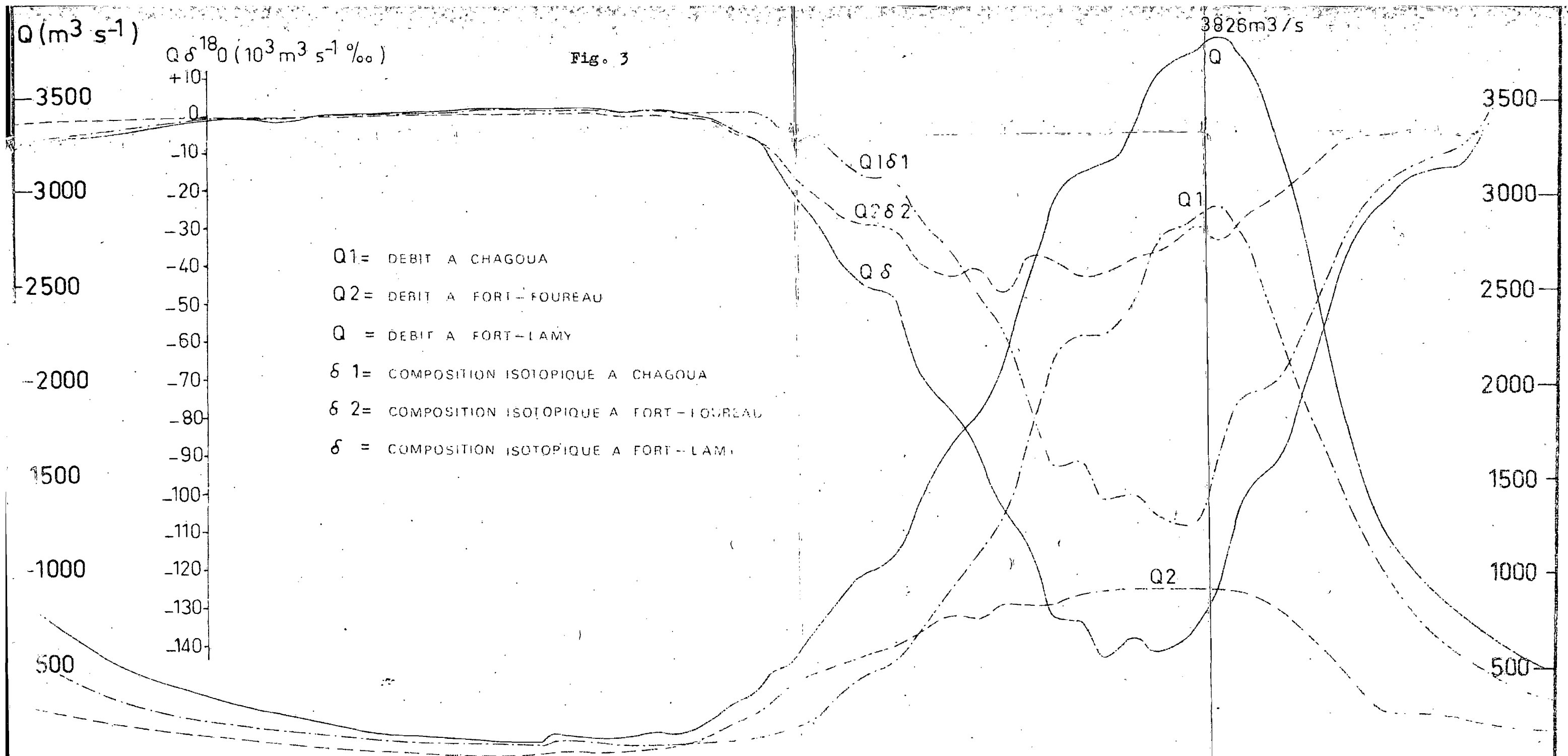
C'est essentiellement le couple Chari - Logone (étudié à Chagoua, Fort-Foureau et Fort-Lamy) qu'il convient ici de considérer (fig. 1). Les deux fleuves, qui confluent à Fort-Lamy, fournissent au lac environ 94 % des apports fluviaux. Le complément est écoulé par l'El Beid (5%) ainsi que par

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 $-3,3 \text{ ‰}$ par planimétrage de la courbe $Q \int$ (Q : débit) de la figure 3. Le volume annuel de 1967, 37.10^9 m^3 , s'inscrit à proximité de la moyenne interannuelle des dix dernières années qui est de 41.10^9 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 $0 \text{ ‰ } ^{18}\text{O}$ vs SMOW.

Fig. 3



3. 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}O vs SMOW, peu différente de l'apport isotopique moyen annuel du couple Chari-Logone.

4. 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 lisible dans les variations des teneurs en oxygène 18 et en deutérium des eaux du lac (figure 4).

Fig. 4

δD SMOW

+100

+50

0

0

+5

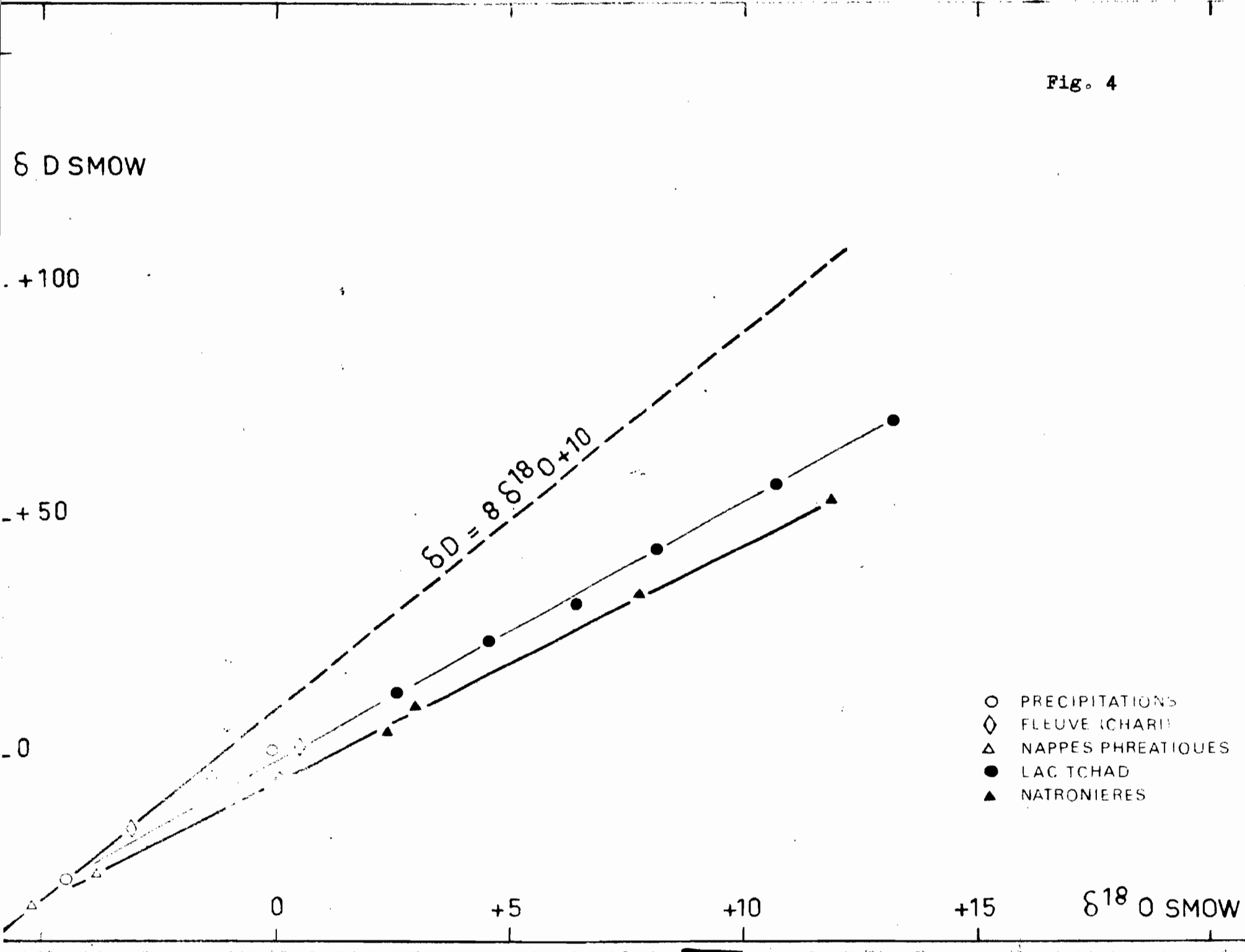
+10

+15

$\delta^{18}O$ SMOW

$$\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$$

- PRECIPITATIONS
- ◇ FLEUVE (CHARI)
- △ NAPPES PHREATIQUES
- LAC TCHAD
- ▲ NATRONIERES



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).

Tableau II. Lac Tchad - Observations mensuelles - 1967

			t(°c) eau min.-max.	hauteur (cm) min.-max.	C µmhos.cm ⁻¹ min.-max.	¹⁸ O SMOW min.-max.
Karé-Katia	13°54'N, 14°11'E	Fond de bras, 6m 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

5. 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 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).

Tableau III : Nappes aquifères de la bordure nord-est.

Localité	Djou	Aoussoudé	Bedara	Daguil	Matafo	Nié	Dolon	Doum-Doum
$\mu\text{mhos.cm}^{-1}$	970	433	1.814	336	139	110	3380	618
$\delta^{18}\text{O min.}$	-5,4	-5,3	-6,1	-6,8	-5,6	-5,0	-4,1	-4,2

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 (9). Le lac ne jouerait qu'un rôle mineur dans cette alimentation.

6. 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 ($\text{Na H CO}_3, \text{Na}_2 \text{CO}_3, 2 \text{H}_2\text{O}$) (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),

Tableau IV : Natronière de Liwa 7-10-67

Distance de la dune (flanc ouest)	0 m	20 m	71 m	180 m	220 m	260 m
C $\mu\text{mhos. cm}^{-1}$	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
δD vs SMOW	- 4	+ 1	+ 5	+ 10	+ 34	+ 54

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.

C O N C L U S I O N

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 un 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).

B I B L I O G R A P H I E

- (1) TOUCHEBEUF DE LUSSIGNY P. (1969). Monographie hydrologique du bassin du lac Tchad. O.R.S.T.O.M., Service Hydrologique, Paris, 169 p., 1 carte hors texte, annexe 72 p.
- (2) SCFNEIDER J.L. (1967). Relations entre le lac Tchad et la nappe phréatique (République du Tchad). Extrait de la publication n° 70 de l'A.I.H.S., symposium de Garda, pp. 122-131, 3 fig.
- (3) ROCHE M.A. (1968). Première estimation des apports en sels au lac Tchad par le Chari. cahiers O.R.S.T.O.M., Sér. Hydrologie, vol. V, n° 1, pp. 55-89.
- (4) GISCHLER C.E. (1967). Synthèse hydrologique du bassin du lac Tchad. Nature et Ressources, vol. III, n° 3, pp. 10-16.
- (5) FAURE H., FONTES J. Ch., GISCHLER C.E., MOOK W., et VOGEL J.C. (1969). Un exemple d'étude d'hydrogéologie isotopique en pays semi-aride. La cuvette Tchadienne. Journal of Hydrology, sous presse.
- (6) DANSGAARD W. (1964). Stable isotopes in precipitation, Tellus, vol. 16, n° 4, pp. 436-468.
- (7) CRAIG H. (1961). Isotopic variations in meteoritic water. Science, 133, pp. 1702-1703.
- (8) 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, 1962 à mars 1968, Cahiers O.R.S.T.O.M., Sér. Hydrologie, vol. VI, n° 1, pp. 35-78.
- (9) FONTES J. Ch., MAGLIONE G., et ROCHE M.A. (1969) Données isotopiques préliminaires sur les rapports du lac Tchad avec les nappes de la bordure nord-est. Cahiers O.R.S.T.O.M., série Hydrologie, vol. VI, n° 1, pp. 16-34.
- (10) MAGLIONE G. (1968) Présence de gaylussite et de trona dans les natronières du Kanem (pourtour nord-est du lac Tchad) Bull. Soc. fr. Minéral. Cristallogr., 91 pp. 388-395.