

J. C. FONTES*, G. MAGLIONE** et M. A. ROCHE***

Données isotopiques préliminaires sur les rapports du lac Tchad avec les nappes de la bordure nord-est

Depuis plusieurs années, l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, a entrepris une opération concertée multidisciplinaire visant à une définition des mécanismes d'altération, érosion, transport et sédimentation, dans la cuvette tchadienne. Actuellement, les phénomènes impliqués dans cette étude peuvent être rapportés au cycle hydrologique des tributaires du lac Tchad, à la dynamique de ce dernier ainsi qu'à ses rapports avec les nappes environnantes.

Le problème majeur est posé par l'aboutissement de la sédimentation chimique. En effet, le lac Tchad, dépourvu d'émissaire de surface et soumis à une évaporation intense, conserve néanmoins des eaux peu minéralisées. De plus, les archives disponibles depuis le début du siècle (1, 2, 3, 4) ne permettent pas de constater une augmentation de salinité au cours du temps. L'investigation de cette anomalie apparente exige un examen des rapports éventuels entre le lac et les nappes bordières. Nous rendons ici compte d'une telle étude entreprise sur les marges septentrionales du lac. Ce programme a été harmonisé avec l'essai de synthèse hydrologique entrepris par l'UNESCO sous les auspices de la « Commission du Bassin Tchadien ».

* Laboratoire de Géologie Dynamique, Faculté des Sciences, Paris-5^e.

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

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

La rive nord-est du lac présente l'intérêt d'avoir été le siège de recherches hydrogéologiques d'ensemble (6, 7) ainsi que d'études de détail sur le site des polders de Bol Guini (8, 9) (fig. 1).

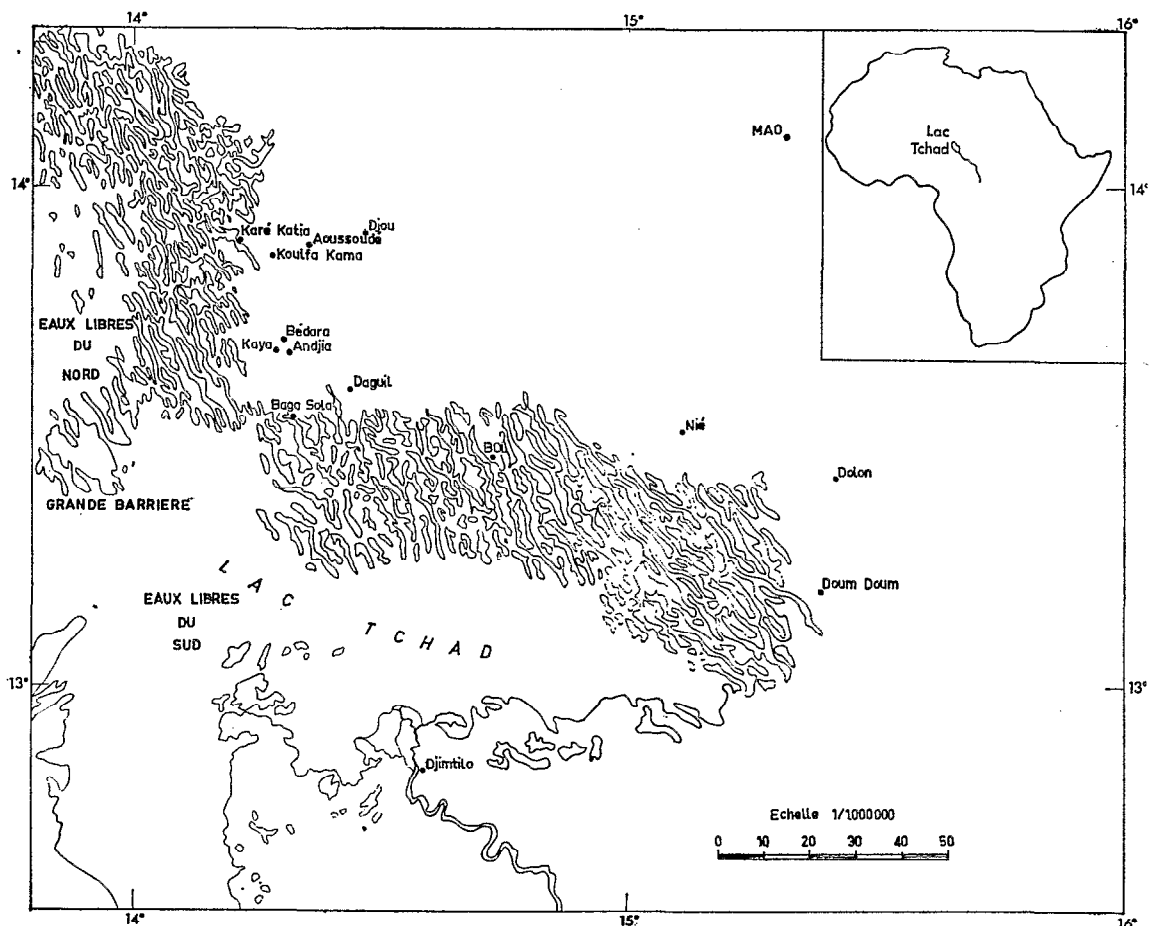


FIG. 1. — Carte de situation et de localisation des prélèvements.

PROGRAMME ET MÉTHODES

Sur ses bordures nord, et nord-est, le lac Tchad est encombré d'un très grand nombre d'îlots frangés d'une végétation dense de *Cyperus papyrus* de *Phragmites* et de *Typha*. Ces îles correspondent aux sommets émergés de l'ancien relief dunaire qui occupe toute la région du Kanem au nord du lac. Lorsque la submersion n'est pas totale le système dunaire constitue une série de digitations complexes. La ligne de rivage est ainsi extrêmement sinueuse. A l'intérieur des terres, certaines zones basses sont facilement inondées pendant les crues du lac et fonctionnent lors des phases de retrait, en cuvettes évaporantes isolées. Si la période de basses eaux se prolonge, ces bassins circonscrits, (ouadis), généralement situés à une cote plus basse que celle du plan d'eau du lac, drainent les nappes phréatiques. Sous l'effet conjugué d'une diminution de la profondeur de la surface piézométrique, et d'une augmentation locale de la capillarité dans les fonds argileux, les eaux de la nappe s'évaporent préférentiellement au centre des cuvettes et abandonnent en cours de remontée les sels qu'elles détenaient en solution.

Le fonctionnement des ouadis sera détaillé (10) dans le cadre d'une étude spécifique de ces bassins endoréiques à paragenèses salines peu fréquentes (11) (trona, gaylussite).

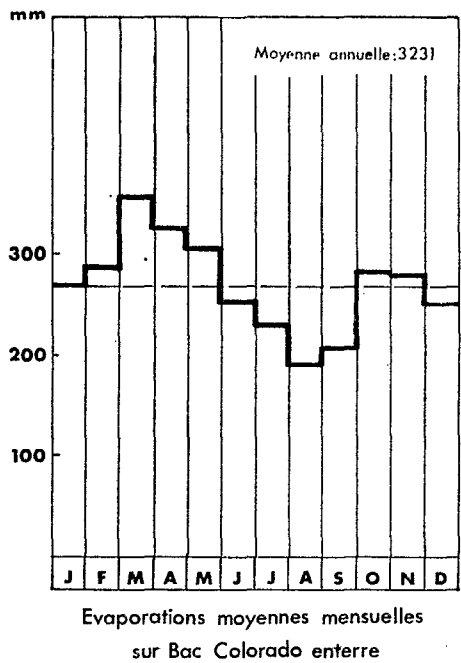
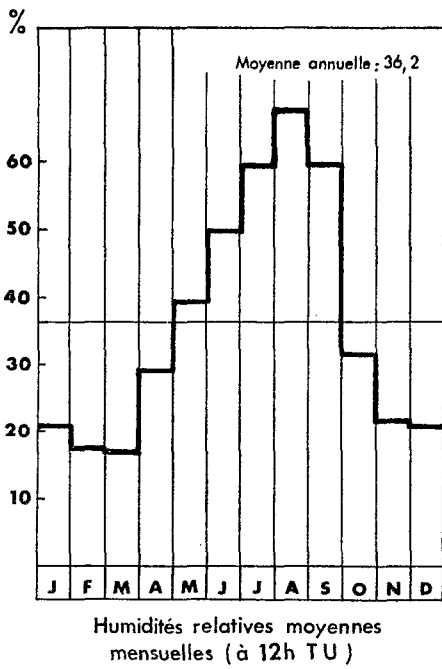
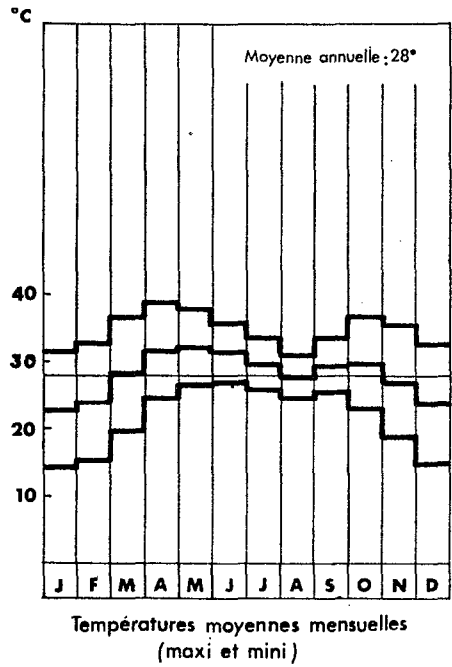
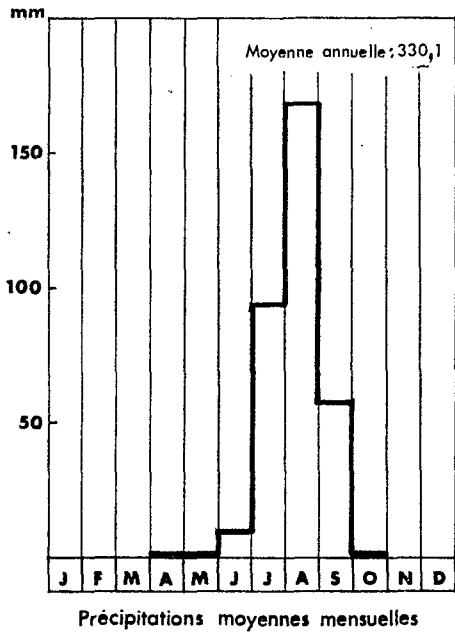


FIG. 2. — Données climatologiques moyennes à la station de Bol-dune (période 1957-1966).

Le programme d'échantillonnage, aménagé en fonction des possibilités locales de prélèvements, a été axé sur trois rubriques :

- lac Tchad sur ses bordures est et nord;
- nappes dunaires littorales;
- nappes d'alimentation des cuvettes fermées de l'intérieur (nappes phréatiques du Kanem).

Pour le lac Tchad, les 3 points de prélèvements choisis jalonnent la plus grande partie de l'une des zones d'infiltration supposée. Bol et Baga-Sola sont situés à l'est d'une zone de hauts fonds dénommée « Grande Barrière » qui marque une discontinuité entre les « eaux libres ». Au nord de cette démarcation, la station de Karé-Katia sera considérée comme représentative de l'évolution des eaux septentrionales sous l'effet de cet isolement par ailleurs bien décelable grâce aux mesures de conductivité et aux analyses chimiques.

Dans chacune de ces localités, la nappe littorale a subi un prélèvement à une distance du rivage variant de 3 à 80 mètres (tableau II).

Les nappes phréatiques ont été atteintes grâce à des puits non cimentés, des pompes, des sources, et des trous à la tarière. Dans le cas des polders de Bol les prélèvements concernent une série de piézomètres. Les zones choisies pour l'étude de ces nappes phréatiques constituent une transversale au lac sur plus de 40 kilomètres jusqu'à l'isopièze 300 m. Les jalons principaux en sont la station de Karé-Katia, ainsi que les puits d'Aoussoudé et Djou (fig. 1). De leur côté les prélèvements échelonnés dans l'arrière pays de Bol à Baga-Sola rendent compte de l'état des eaux sur une frange de quelques 3 km de large par rapport à la rive.

Les mesures effectuées se rapportent à la composition isotopique de l'oxygène de l'eau, ainsi qu'à la température, la conductivité et la hauteur d'eau à l'échelle ou la profondeur du niveau piézométrique.

Les teneurs en $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ont été déterminées selon les méthodes classiques (équilibre à 25 °C de l'échantillon d'eau avec CO_2 et analyse du gaz carbonique au spectromètre de masse à double collection). Les résultats sont exprimés en termes de δ ou parts pour mille par rapport au standard classique : (SMOW = composition isotopique moyenne des eaux océaniques).

$$\delta = \left[\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{ECH}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} - 1 \right] 1000$$

La déviation standard est de 0,15 ‰.

RÉSULTATS

1. Rive Nord du lac.

Les valeurs relevées sur la rive nord du lac Tchad (Tableau I) montrent une teneur élevée en oxygène 18. La composition isotopique présente, du sud au nord du lac, un gradient d'augmentation dont l'étude des conditions d'établissement se révèle essentielle pour l'évaluation du bilan isotopique du lac (12). On peut estimer qu'entre Bol et Karé-Katia l'enrichissement différentiel est voisin de 6 ‰. Ces teneurs élevées en isotopes lourds permettent d'évaluer les valeurs moyennes des eaux susceptibles de s'infiltrer dans les nappes bordières tout au long de la côte nord-est. Les variations annuelles observées en chaque station (fig. 3) sont assez importantes et atteignent plusieurs ‰. Mais de toutes façons les valeurs restent largement supérieures au SMOW, dans la zone généralement retenue comme front d'infiltration possible. Quelle que soit donc la période d'infiltration éventuelle, on peut admettre que les eaux qui transiteraient du lac vers les nappes auraient des compositions isotopiques pouvant dépasser + 16 ‰, et de toutes façons supérieures à 4 ‰, selon les bras côtiers intéressés.

2. Nappes littorales (tableau II).

D'une façon générale les eaux prélevées dans les nappes littorales à proximité immédiate des rives ont des teneurs en ^{18}O moins variables que celles du lac. Par rapport à ce dernier la conductivité est le plus souvent supérieure tandis que la composition isotopique est plutôt moins élevée.

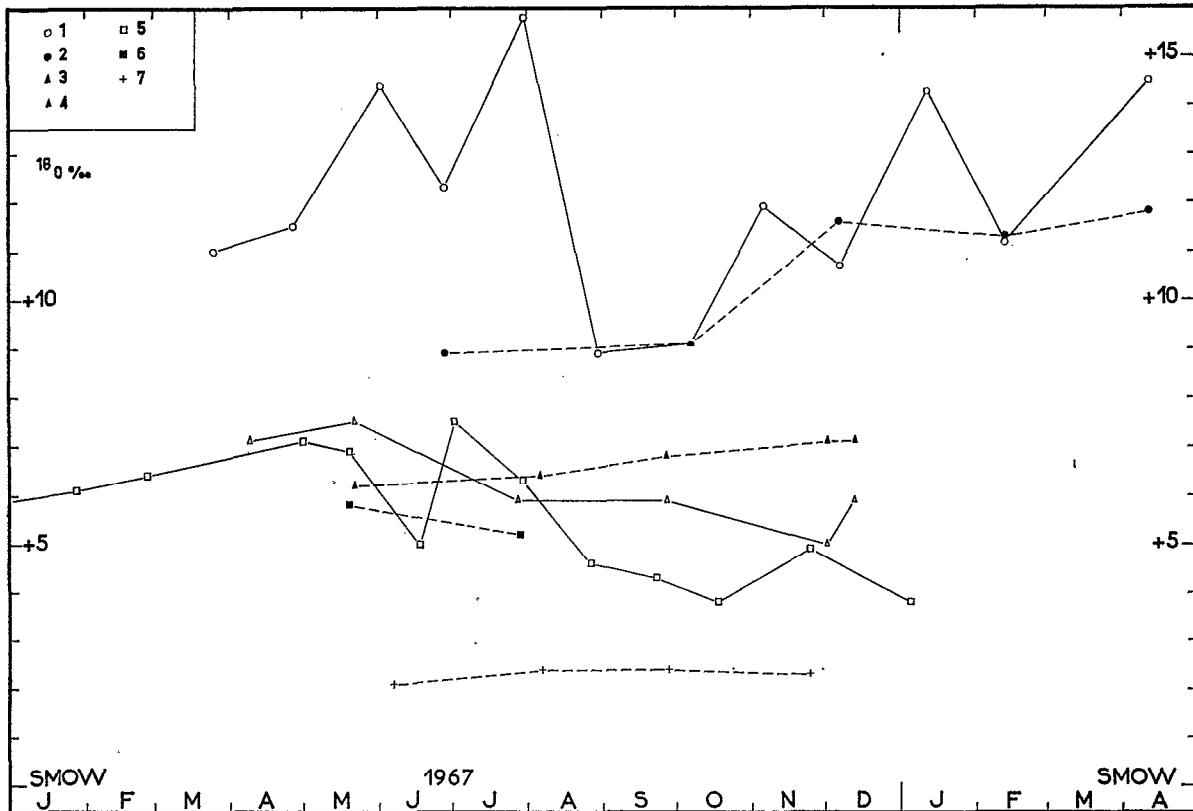


FIG. 3. — Évolution dans le temps de la composition isotopique des eaux du lac Tchad et des nappes littorales.
 1. Karé-Katia, lac - 2. Karé-Katia, nappe - 3. Baga Sola, lac - 4. Baga Sola, nappe - 5. Bol, lac - 6. Bol, nappe (30 mètres de la rive) - 7. Bol nappe (80 mètres de la rive).

On désignera ces variations relatives sous la forme $\Delta = \delta \text{ lac} - \delta \text{ nappe}$, quantité algébrique positive si le lac est plus riche en ^{18}O que la nappe, et inversement.

A Bol, on relève une différence sensible entre les deux points de prélèvements. Dans les premiers mètres de la rive, la nappe a, par rapport au lac, une composition isotopique plus basse ($\Delta \simeq +1 \text{ ‰}$). A 80 mètres du lac la composition isotopique semble très constante. De juin à novembre 1967 nous n'avons pas relevé en ce point de variations significatives pour l'eau de cette nappe. Les valeurs restent groupées entre +2 et +2,5 ‰, bien au-dessous de la composition isotopique du lac Tchad à Bol ($\Delta \simeq +4 \text{ ‰}$).

A Baga Sola, les eaux de la nappe littorale affichent au cours du temps une évolution isotopique distincte de celle du lac. Alors que la teneur en ^{18}O du lac fluctue, les eaux de la nappe conservent une composition isotopique peu différente de mai à décembre 1967. Au mois de mai 1967 la nappe est moins chargée en ^{18}O que le lac ($\Delta \simeq +2 \text{ ‰}$). Vers la fin juin les deux types d'eaux présentent sensiblement les mêmes teneurs ($\Delta \simeq 0$).

La tendance s'inverse alors et la concentration en ^{18}O des eaux du lac devient plus faible que celle de la nappe. L'écart, maximal à la fin du mois de novembre 1967 ($\Delta \simeq -2 \text{ ‰}$), tend ensuite à se réduire.

A Karé-Katia la nappe littorale montre une composition isotopique beaucoup plus basse que le lac à la fin juillet 1967 ($\Delta \simeq +7 \text{ ‰}$). Par la suite, les teneurs en isotopes lourds du lac et de la nappe sont sensiblement égales. Puis dès la fin du printemps 1968, le lac redevient plus chargé en isotopes lourds que la nappe ($\Delta \text{ avril } 68 \simeq +4 \text{ ‰}$).

3. Les nappes phréatiques du Kanem.

Les eaux subsuperficielles de la région nord ont dans l'ensemble des compositions isotopiques comprises entre -3 et -6 ‰. La majeure part des teneurs en ^{18}O est même groupée entre -5 et -6 ‰. Cependant deux points d'eau peuvent atteindre des valeurs plus hautes. La nappe, accessible au puits de Koulfa-Kama a une teneur en ^{18}O qui reste comprise entre $+0,6$ et -3 ‰. De leur côté, les eaux du puits de Djou montrent des variations importantes avec des valeurs de

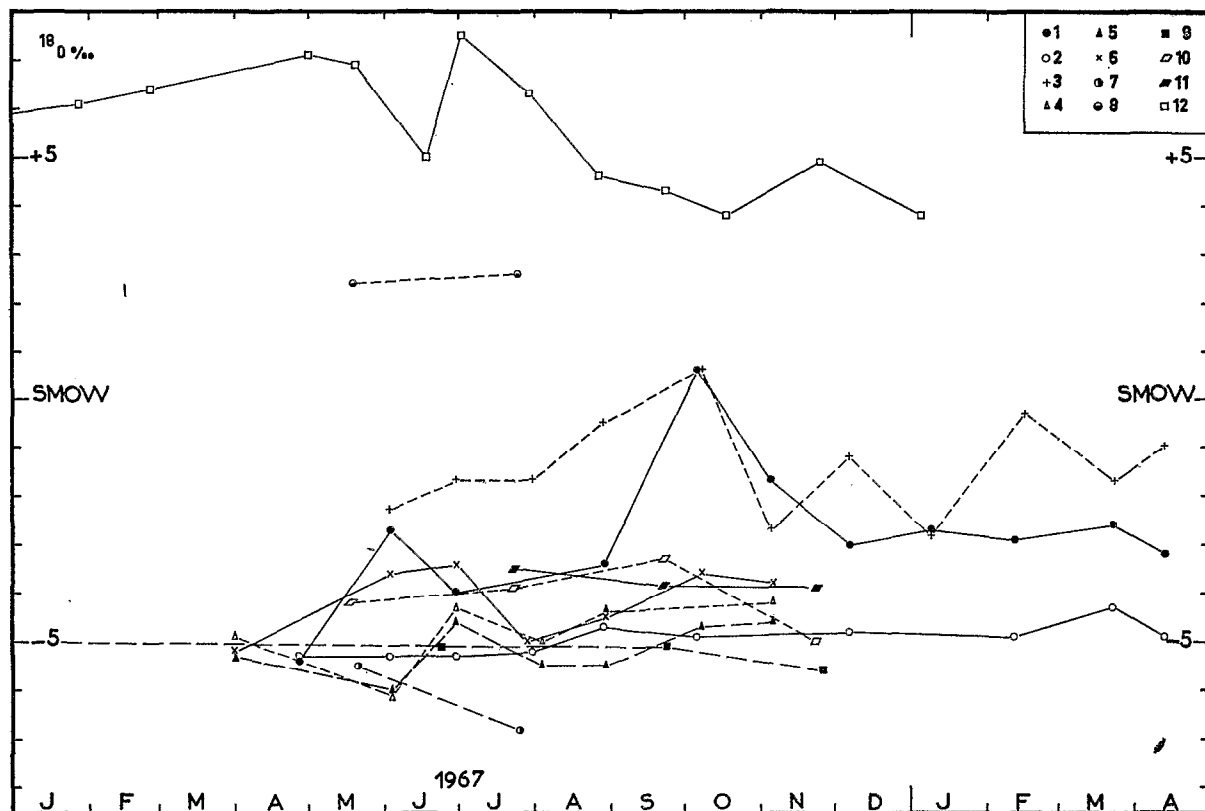


Fig. 4. — Évolution dans le temps de la composition isotopique des eaux des nappes phréatiques du Kanem.

1. Djou - 2. Aoussoudé 3. Koulfa-Kama - 4. Bedara - 5. Andjia - 6. Kaya - 7. Daguil 8. Source du Polder de Bol Guini - 9. Puits de Matafo - 10. Nié - 11. Dolon - 12. Lac Tchad à Bol.

l'ordre de -5 ‰ en avril 1967 avec montée vers un maximum, également de $+0,6$ ‰ en septembre, et descente vers des valeurs à nouveau plus basses ($-3,2$ ‰ en avril 1968).

Tous les autres points d'eau sont beaucoup plus stables au cours du temps (fig. 4). En particulier le puits d'Aoussoudé montre entre mars 1967 et avril 1968 une remarquable constance autour de -5 ‰. L'homogénéité de ces valeurs s'observe également dans l'espace depuis Doum Doum jusqu'à la transversale de Liwa sur près de 200 km. (fig. 1).

DISCUSSION DES RÉSULTATS

1. Rappels théoriques.

On sait que la composition isotopique d'une eau dépend de son histoire au sein du cycle hydrologique considéré. L'ensemble de ces cycles est réglé par le vaste réservoir tampon des masses océaniques qui représente plus de 97 ‰ de la totalité de l'eau de l'hydrosphère. Le fractionnement isotopique qui se produit lors de l'évaporation des eaux marines et de la constitution d'une réserve de vapeur atmosphérique, appauvrit cette dernière en isotopes lourds. Au fur et à mesure que les précipitations interviennent au détriment des masses nuageuses, la condensation à l'inverse du processus d'évaporation, enlève au système une proportion plus élevée d'isotopes

lourds. Au cours de la chute des gouttes de pluie deux processus susceptibles de modifier la composition isotopique prennent place, ce sont l'évaporation des gouttelettes d'une part et l'échange isotopique avec la vapeur atmosphérique d'autre part. Ce sont ces mêmes mécanismes qui déterminent les variations du rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou D/H dans les eaux de surface. De leur côté, les eaux infiltrées ne seront soumises qu'à l'action de l'évaporation, d'autant plus faible, que la nappe sera mieux protégée par les couches susjacentes. Dans certains cas cette évaporation peut être de type capillaire, au sens isotopique, c'est-à-dire suffisamment ménagée pour déterminer dans le toit de la nappe l'établissement d'un gradient d'enrichissement de la phase liquide. Lorsque ce gradient atteint une certaine valeur, la vapeur qui s'échappe a précisément la composition isotopique moyenne du liquide du réservoir. Dès cet instant, le système est en état d'équilibre stationnaire. L'évaporation peut se poursuivre sans enrichir la masse d'eau de la nappe. Les fractionnements isotopiques dans les phénomènes assimilables à des distillations partielles (évaporation et condensation) sont déterminés par les faibles différences entre les tensions de vapeur des deux espèces moléculaires H_2^{18}O et H_2^{16}O . Cet écart étant thermodépendant, il est clair que la température est l'un de facteurs qui régit le fractionnement isotopique, en particulier à la condensation. A l'évaporation deux facteurs supplémentaires interviennent. L'humidité relative conditionne l'échange avec la vapeur atmosphérique. Par ailleurs les activités respectives des liquides H_2^{18}O et H_2^{16}O en voie d'évaporation déterminent en quelque sorte leur aptitude à passer en phase gazeuse.

Le détail des actions de ces différents mécanismes est relativement complexe mais assez bien connu (13, 14) et dans certains cas favorables, une représentation quantitative peut être tentée (15). Qu'il nous suffise ici de considérer les quelques résultantes nécessaires à l'interprétation de nos données : les eaux météoriques sont généralement moins chargées en ^{18}O que les masses marines dont la composition isotopique moyenne est prise comme standard de référence (SMOW). Les eaux de surface en voie d'évaporation s'enrichissent en isotopes lourds et peuvent alors être affectées de teneurs $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ supérieures à celle du SMOW.

2. Interprétation.

Un simple examen des résultats nous permet d'envisager trois niveaux distincts dans leur discussion.

Tout d'abord une évidence; les molécules d'eau du lac et celles des nappes phréatiques ont eu des histoires thermodynamiques diverses et sans filiation dans le sens du lac vers ces nappes. De leur côté, les compositions respectives du lac et des nappes littorales témoignent de rapports certains, tempérés par l'intervention d'autres facteurs. Là encore, l'interprétation paraît aisée. Plus délicat est le sens à donner aux variations de détail de la composition des eaux des nappes phréatiques.

a) Comparaison entre lac et nappes phréatiques.

La composition isotopique des eaux du lac sur ses marges septentrionales, rend compte d'un enrichissement lié aux conditions régionales d'évaporation. L'évaporation annuelle mesurée sur bac Colorado enterré au sommet de la dune à Bol (16) (fig. 2) est de 3,2 m. Notons que de leur côté les estimations de bilan hydrologique conduisent en ce qui concerne les pertes totales à une valeur moyenne de l'ordre de 2,3 m. Quelle que soit donc la quantité d'eau réellement évaporée, celle-ci est considérable. L'intensité du phénomène est régie par le couple température de surface — humidité relative (28 °C, 36,2 %) (fig. 2). L'effet isotopique est d'autant plus sensible que la surface évaporante est grande par rapport à la masse liquide.

Les eaux des nappes phréatiques au contraire ne portent pas dans leur composition isotopique la trace d'une évaporation notable. Les valeurs relevées sont en bon accord avec celles des précipitations et légèrement plus basses que celles des eaux affluentes du Chari. On peut estimer en effet la composition isotopique moyenne des pluies aux alentours de — 5,7 ‰ vs SMOW tandis que le « module isotopique annuel » du Chari est de — 3,3 ‰ vs SMOW (12).

Nous sommes donc conduits à assigner une origine météorique à la tranche d'eau accessible à l'échantillonnage dans les nappes phréatiques du Kanem. Dans la région de Bol (fig. 5), cette affirmation s'applique également aux eaux de la nappe jusqu'à une profondeur de l'ordre de 40 m

FIG. 5. — Polder de BOL GUINI.

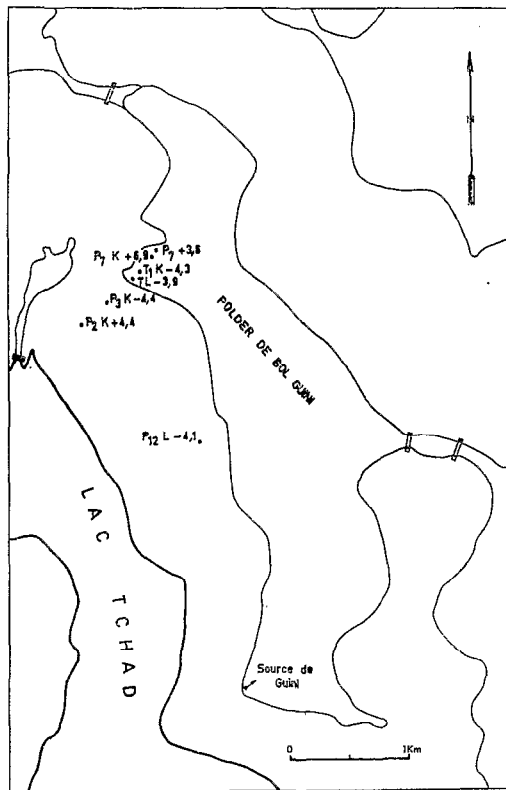


FIG. 5a. — Plan de situation des points de prélèvement.

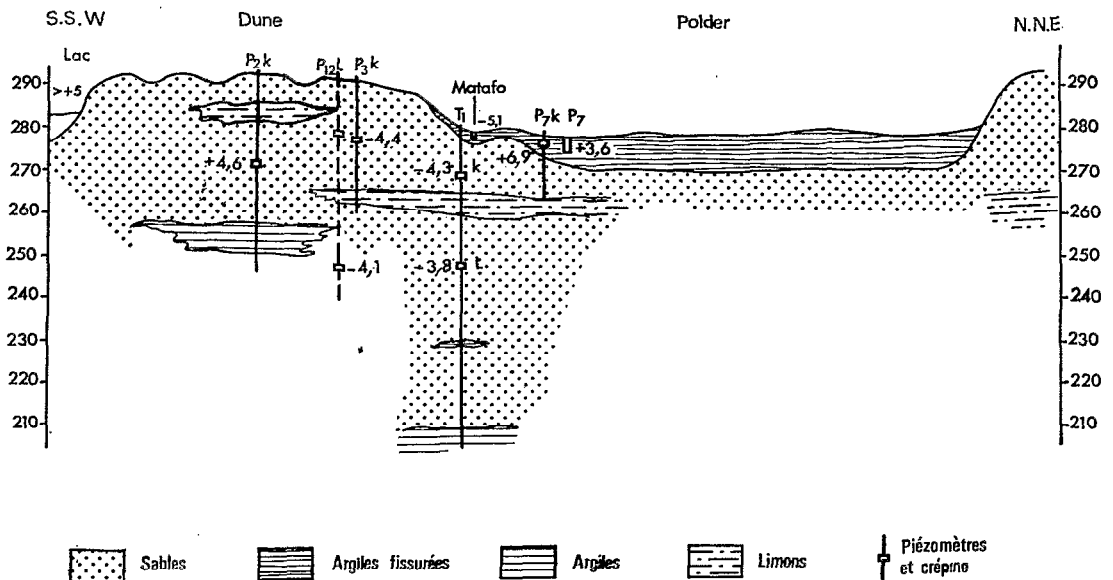


FIG. 5b. — Coupe schématique d'après DIELEMAN et DE RIDDER (8) modifiée. Les compositions isotopiques des eaux sont reportées aux cotes de prélèvement.

par rapport au niveau actuel du lac Tchad (≈ 282 m). Sans préjuger de son épaisseur, à ce stade de l'interprétation, nous pouvons considérer que la réserve de la nappe phréatique, d'origine météorique et indépendante de tout mélange décelable avec l'eau du lac, est certainement très importante.

Ce résultat est d'autant plus remarquable que le lac constitue un point haut vis-à-vis de la surface piézométrique de ces nappes (6).

Le problème se pose alors du mode et de la période d'alimentation de ces nappes. Nous serons amenés plus loin à discuter les quatre éventualités suivantes :

- nappes de constitution et d'alimentation météorique récentes.
- alimentation actuelle météorique d'un réservoir aquifère hérité et constitué par les pluies d'une période plus humide.
- nappes entièrement fossiles alimentées par les pluies d'une période plus humide.
- nappes fossiles, alimentées par le lac lors d'une période de hautes eaux de ce dernier, et dont la partie supérieure serait actuellement influencée par les pluies.

b) Comparaison entre lac et nappes littorales.

Les compositions isotopiques témoignent d'une participation du lac à l'alimentation de la nappe littorale. Cet apport toutefois est conditionné dans le temps et dans l'espace.

Dans le temps tout d'abord, l'alimentation est limitée. En particulier à Karé-Katia, le lac alimente la nappe pendant la période de fin septembre à mi-février 1967. Dans l'ensemble, cet intervalle de temps correspond à l'étalement de la crue du lac en cette localité. Auparavant la nappe littorale était largement influencée par l'eau météorique légèrement mise en charge dans la dune pendant la saison des pluies (fig. 2). L'abaissement de la teneur en isotopes lourds des eaux du lac, relevé à Karé-Katia à la fin juin, correspond précisément à l'influence des premières pluies de composition isotopique évidemment plus basse que celle du lac. C'est à ce moment-là que la nappe littorale révèle un écoulement vers le lac, comme l'un de nous (G. M.) a pu l'observer *in situ*. À Karé-Katia, la dynamique des rapports lac-nappe littorale peut être résumée ainsi, pour la période de notre étude :

- fin de la saison sèche (mai), étiage du lac, écoulement de la nappe dunaire vers le lac.
- saison des pluies, recharge de la nappe par les précipitations.
- fin de la saison des pluies, crue du lac et alimentation de la nappe littorale par le lac. L'apport maximal se produit aux mois d'octobre et novembre 1967. C'est au début décembre que la composition isotopique de la nappe est la plus élevée.
- début de la décrue du lac fin janvier 1968, le niveau piézométrique de la nappe décroît moins rapidement que le niveau d'eau libre du lac et commence à l'alimenter.

La composition isotopique de la nappe dont l'alimentation mixte se trouve répartie sur une période assez courte, n'évolue guère pendant le reste de l'année. La nappe semble en particulier exempte de tout processus d'évaporation. Il faut y voir l'effet du rôle protecteur des sables dunaires.

En ce qui concerne la localité de Baga Sola on peut considérer que la nappe littorale est alimentée par la crue du lac de janvier-février 1967 et n'évolue pratiquement pas par la suite.

À Bol, les eaux de la nappe littorale reflètent un mélange entre des eaux d'origine météorique et l'eau du lac. Cette dilution est de l'ordre de 10 % dans les 30 premiers mètres si l'on retient un mélange entre l'eau du lac ($\delta \approx +5\text{‰}$) et l'eau de pluie ($\delta \approx -5\text{‰}$). À 80 mètres du bord, la contribution de l'eau de pluie, estimée selon le même schéma, s'élève déjà à 30 %.

En bref, les variations de la teneur en ^{18}O du lac ne trouvent pas d'écho notable dans les eaux de la nappe littorale qui reflètent par ailleurs l'influence des précipitations.

Il semble donc que la circulation des eaux du lac vers la nappe littorale soit très limitée. Il s'agirait beaucoup plus d'une imprégnation saisonnière que d'un sous-écoulement continu.

c) Données tirées de l'investigation de nappes phréatiques.

On a vu que la composition isotopique de ces nappes dénotait une alimentation par les pluies. Si l'on excepte les variations momentanées et locales, l'homogénéité des teneurs en ^{18}O de tous les points d'eau implique une origine commune des molécules d'eau. De même la composition

isotopique extrêmement constante de l'eau de certains puits (Aoussoudé) est en accord avec la notion d'un vaste réservoir où sont homogénéisées les variations des précipitations. En regard des faibles précipitations annuelles (fig. 2), il nous paraît difficile d'imaginer la constitution récente ou actuelle d'un tel réservoir et nous estimons que dans cette localité les infiltrations récentes sont largement diluées dans un grand volume d'eau fossile météorique, constitué lors d'une phase humide. Il convient de rappeler à ce sujet que les relevés piézométriques (6) désignent cette localité comme le point le plus bas de la nappe phréatique. Par ailleurs les observations de terrain montrent que la nappe est, à cet endroit, particulièrement protégée des infiltrations superficielles comme de l'évaporation, par une couche de près de 3 m de sédiments fins.

Pour les autres localités, les variations isotopiques ne semblent guère pouvoir être conciliées avec le rythme de l'alimentation météorique. Pour les puits de Djou et de Kouffa-Kama (fig. 4), on peut retenir cependant que la nappe intégrerait localement sur une année les pulsations dues aux apports espacés dans le temps de plusieurs saisons humides. La recharge des nappes dunaires par les pluies fait monter le niveau piézométrique et la nappe devient alors sensible à l'évaporation dans sa partie superficielle. Ceci expliquerait les valeurs hautes observées dans les deux puits à la fin de la saison humide à l'époque où la nappe est plus proche de la surface.

Une autre explication possible consisterait à invoquer ici une alimentation momentanément plus chargée en isotopes lourds par les premières pluies de la saison. De toutes façons et indépendamment de l'argumentation tirée de l'examen des nappes littorales, nous voyons là une autre donnée en faveur d'une alimentation actuelle dans les dunes.

Cette recharge actuelle apparaît de façon plus ou moins nette selon les conditions locales des différents points de prélèvements. Dans le cas des puits de Bedara, Andjia et Kaya, il s'avère que la nappe subit une évaporation maximale qui coïncide avec la fin de la saison sèche. Au début de la saison des pluies, les eaux semblent atteindre rapidement la nappe. Les points d'eau de Daguil 4, Matafo, Nié et Dolon, ont une composition assez stable et peuvent être justiciables du même raisonnement qu'Aoussoudé.

La composition isotopique de la source du polder de Bol Guini (+ 2,5 ‰) peut s'interpréter comme un mélange entre l'eau du lac et celle de la nappe. Ceci conduirait à une participation météorique de sensiblement 25 %, selon les modalités des calculs de mélanges évoquées plus haut.

Plus intéressants sont les résultats relatifs aux piézomètres du polder de Bol Guini (tableau 3, fig. 5). Les mesures permettent de limiter l'influence des eaux d'infiltration du lac au niveau P₂K (+ 4,6 ‰) sur l'axe de la dune. L'eau du lac se trouve au-dessous d'une lentille d'eau météorique récente P₃K (-4,4 ‰) et repose sur un matelas d'eau, également d'origine météorique, accessible en T₁L (-3,8 ‰). Dans le polder lui-même les arrivées latérales en provenance du lac (9) à travers les barrages sont sensibles en P₇(+3,6 ‰) et en P₇K (+6,9 ‰).

Le fait que l'eau relativement profonde accessible en P 12 (-4,1 ‰) et en T₁L présente ainsi une composition isotopique d'eau de pluie, peu ou pas modifiée par l'évaporation, nous paraît apporter un argument supplémentaire en faveur de l'existence d'un volant tamponné d'eau météorique profonde, probablement fossile.

A cause de la composition isotopique des eaux de cette nappe, nous préférons invoquer ce mode d'alimentation par les pluies plutôt que par des avancées lacustres. Les eaux sont en effet restées à l'écart de tout processus notable d'évaporation.

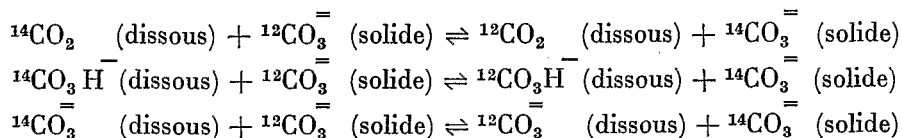
A la partie supérieure de ce réservoir, les pertes annuelles seraient sensiblement compensées par l'apport météorique.

3. Problèmes et perspectives.

a) *Chronologie absolue.*

Les mesures radiochronométriques sur les eaux susceptibles de se révéler fossiles sont évidemment du plus haut intérêt. Cependant, le caractère souvent délicat de l'interprétation des mesures de teneur en ¹⁴C, des eaux a été récemment souligné (17, 18, 19, 20). Dans la région considérée, on peut à ce sujet se poser le problème de l'influence des conditions particulières de la

sédimentation chimique dans le bassin au cours du Quaternaire. On sait en effet que les eaux du lac Tchad sont bicarbonatées et carbonatées. Dans les ouadis isolés du nord, des carbonates sodiques et calci-sodique arrivent à saturation dans les saumures et précipitent dans des salines qui font actuellement l'objet d'une exploitation active. La mobilisation de quantités notables de ces sels apparaît nettement dans les valeurs relativement élevées de la conductivité électrique des nappes pourtant essentiellement alimentées par de l'eau de pluie. Si l'on tient compte du fait que le carbonate de sodium est particulièrement soluble (près de 350 g/l) on peut craindre que les âges indiqués par les teneurs en radiocarbone ne soient en certains cas affectés d'un « vieillissement » par dilution des teneurs en ^{13}C ou par une série de réactions d'échange du type :



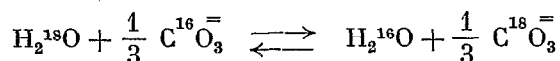
A cet égard il sera extrêmement intéressant de confronter les datations prévues au programme UNESCO (21) et confiées à l'interprétation critique d'une équipe précisément spécialisée* dans ces problèmes, aux données géologiques disponibles (22, 23) sur les avancées lacustres liées aux périodes humides du Quaternaire supérieur.

Par ailleurs étant donné les conditions particulières du milieu carbonaté sodique, les pH élevés rendent la silice particulièrement mobile et risquent ainsi de perturber les essais de datation au ^{32}Si .

En ce qui concerne le tritium, les teneurs des précipitations sont en général faibles sous ces basses latitudes. Au prix d'un enrichissement par diffusion en phase gazeuse, on peut cependant en attendre de précieuses indications sur les modalités de la recharge actuelle.

b) *Problème de l'échange eau-carbonates.*

On peut penser que la présence de sels carbonatés risque également de modifier la composition isotopique de l'eau. On sait que les échanges isotopiques sont très rapides entre l'eau et le carbonate soluble selon la réaction :



Le facteur d'enrichissement défini par :

$$\varepsilon = \left[\frac{(\frac{18\text{O}}{16\text{O}})_{\text{CO}_3}}{(\frac{18\text{O}}{16\text{O}})_{\text{H}_2\text{O}}} - 1 \right] \times 1000$$

dépend de la nature du cation mis en jeu et du sel qui précipite. Dans le cas du carbonate de calcium ε est de l'ordre de 30 ‰ à 25 °C. Pour la dolomite il est de l'ordre de 36 ‰. Nous pensons envisager une limite supérieure en prenant $\varepsilon_{\text{max}} (\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{H}_2\text{O}) = 40$ ‰. En considérant une solution de 350 g de Na_2CO_3 par litre d'eau météorique ($\delta \simeq 5$ ‰), la modification de la composition isotopique de l'eau, serait alors à l'équilibre, de l'ordre de 3,5 ‰ en admettant que le carbonate de sodium a préalablement cristallisé à partir d'une saumure très enrichie ($\delta \simeq 17$ ‰) comparable à celle que l'on observe actuellement (10).

Quoi qu'il en soit, cet effet resterait absolument négligeable au stade de concentration dans les nappes étudiées, qui ne dépasse pas 3 g par litre de bicarbonate.

c) *Évacuation des sels.*

A la vue de nos résultats il devient difficile d'attribuer l'évacuation des sels du lac Tchad à l'infiltration en masse d'une solution concentrée. Ceci tout au moins en ce qui concerne la rive nord-est que nous avons étudiée.

* Laboratoire de Physique de l'Université de Groningue (Prof. J. C. VOGEL).

La confrontation des données de terrain et des mesures isotopiques permet à ce sujet de verser au dossier les éléments suivants qui sont des faits d'observation ou de mesure :

- L'eau circule depuis les dunes littorales vers l'intérieur des terres. Ce trajet est marqué dans le fond des ouadis par un gradient de concentration au fur et à mesure que l'on s'éloigne du lac.
- L'eau qui circule ainsi est plus chargée en sels que le lac.
- Cette eau est d'origine météorique et ne contient au maximum que quelques pourcents d'eau du lac.

Le rôle de l'eau de pluie dans le transport des sels est un fait nouveau. Il est difficile, au stade actuel de nos connaissances, de savoir si cette eau météorique joue un rôle de simple moteur des solutions sous l'effet de la recharge dans les dunes, ou s'il faut également lui attribuer un rôle mobilisateur au niveau des lasses salines consécutives aux décrues saisonnières du lac.

Conclusion

Les rapports du lac Tchad avec les nappes bordières de la région nord-est peuvent se résumer ainsi, à l'issue de notre étude (fig. 6) :

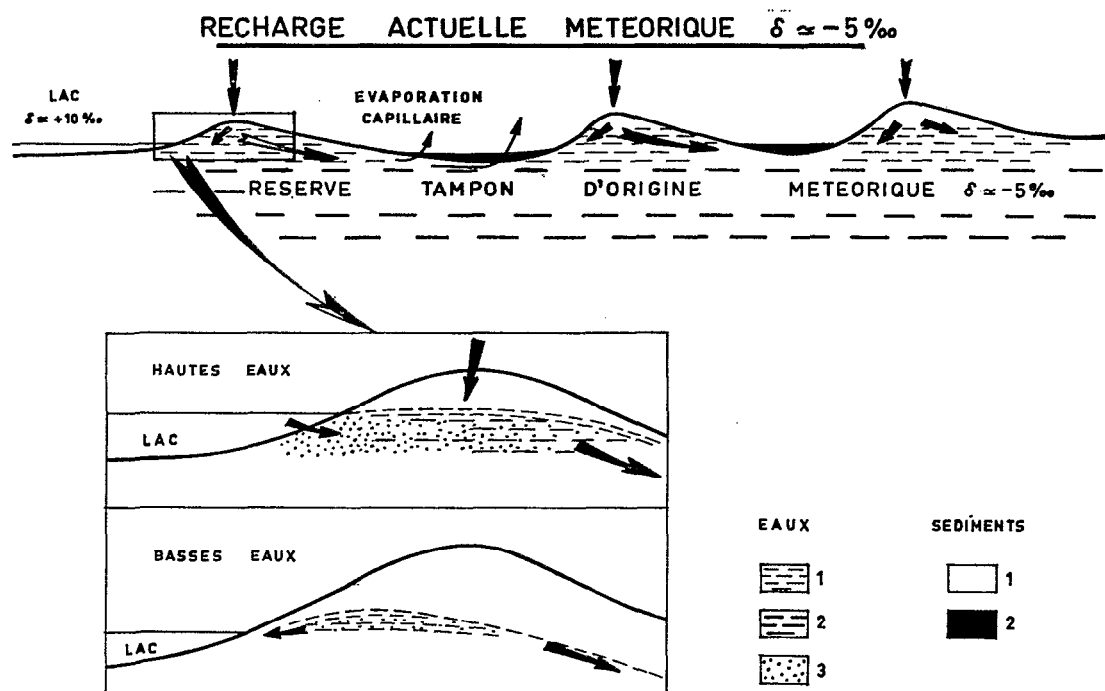


FIG. 6. — Schéma interprétatif des rapports dynamiques :
Lac, nappe, apports météoriques et évaporation.
Eaux : 1. Pluies actuelles - 2. Réserve tampon - 3. Lac.
Sédiments : 1. Sable dunaire - 2. Argile des fonds de ouadis.

Le lac Tchad ne présente pas de phénomènes d'infiltration massive vers l'intérieur des terres. Il imprègne périodiquement les rives sur une frange limitée, de l'ordre de quelques dizaines de mètres de large. L'influence de l'eau météorique se fait déjà sentir sur la nappe littorale. Très vite, cette contribution devient prédominante, au point de rendre indécélable la participation de l'eau du lac à la nappe phréatique.

L'ensemble du système repose sur une série de nappes communiquant entre elles et dont l'essentiel de la réserve provient d'une alimentation météorique, vraisemblablement fossile.

La partie supérieure de cette masse hydrique est actuellement réalimentée par les pluies. L'évaporation n'intervient pas après l'infiltration. Le rôle du couple « infiltration rapide — protection efficace contre l'évaporation », qui constitue la caractéristique des systèmes dunaires (24), est à nouveau mis en évidence.

Le remarquable processus de régulation saline du lac Tchad ne peut être expliqué par un simple écoulement régulier de solutions concentrées, à travers les rives nord-est vers l'intérieur des terres. Le phénomène est plus complexe et fait intervenir des quantités notables d'eau météorique infiltrée dans les dunes littorales.

Les études en cours vont devoir tenir compte d'une éventuelle mobilisation par les pluies des flaques concentrées ou des laisses salines, avec transit dans les dunes et prise en charge par la nappe phréatique avant la remontée au niveau des mèches évaporantes des fonds argileux des ouadis.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] TILHO (J.). — 1909. — « Documents scientifiques de la mission Tilho 1906-1909 ». Imp. nat., Paris, 3 t.
- [2] GUICHARD (E.). — 1957. — « Eaux du lac Tchad et des mares permanentes au Nord d'Ira ». Comm. Sc. du Logone et du Tchad. Sect. Ped. O.R.S.T.O.M., 26 p.
- [3] BOUCHARDEAU (A.) et LEFEVRE (R.). — 1957. — « Monographie du lac Tchad ». Serv. Hydrol. O.R.S.T.O.M., 112 p. 24 fig., 1 carte.
- [4] BOUCHARDEAU (A.). — 1958. — « Le Lac Tchad ». Serv. Hydrol. O.R.S.T.O.M., Paris *Annuaire Hydrol. de la France d'Outre-Mer*, année 1956, 9-26.
- [5] ROCHE (M. A.). — 1968. — « Évolution dans l'espace et le temps de la conductivité électrique des eaux du lac Tchad », d'après les résultats de 1908, 1957, 1962 à mars 1968. Rapport provisoire O.R.S.T.O.M. Fort-Lamy, 40 p., 20 fig.
- [6] SCHNEIDER (J. L.). — 1966. — « Carte hydrogéologique de reconnaissance au 1/500 000 »; feuilles Mao et Fort-Lamy; rapports de synthèse B.R.G.M.
- [7] SCHNEIDER (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.
- [8] DIELEMAN (P. J.) et RIDDER DE (N. A.). — 1963. — « Expertise sur les mouvements des eaux et du sel dans le polder de Bol Guini ». Inst. Internat. pour l'amélioration et la mise en valeur des terres de Wageningen (Hollande), juillet 1963, 52 p.
- [9] CHEVERRY (C.). — 1965. — « Essai de caractérisation des sols des polders de Bol (Rive du lac Tchad) ». Serv. Pedo. O.R.S.T.O.M., oct. 1965, 120 p.
- [10] FONTES (J. Ch) et MAGLIONE (G.). — en préparation. — « Études isotopiques des cuvettes évaporitiques au nord-est du lac Tchad (Kanem) ».
- [11] MAGLIONE (G.). — 1968. — « Présence de Gaylussite et de Trona dans les natronières du Kanem ». *Bull. Soc. Franc. Minéralo. Cristallogr.* (1968), 91, 388-395.
- [12] FONTES (J. Ch) et ROCHE (M. A.). — en préparation — « Essai de bilan isotopique des eaux du lac Tchad. ».
- [13] CRAIG (H.) et GORDON (L. I.). — « Isotopic oceanography ». — Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and marine atmosphere, *Spoleto Meeting on Nuclear Geology*, sous presse (1965).
- [14] GONFLANTINI (R.). — 1965. — « Effecti isotopici nell'evaporazione di acque salate », *Atti della Soc. Tosc. Sc. Nat. Serie A*, vol. 72.
- [15] FONTES (J. Ch) et GONFLANTINI (R.). — 1967. — « Comportement isotopique au cours de l'évaporation de deux bassins sahariens ». *Earth and Planet. Sc. Letters*, Vol. 3, n° 3, déc. 64, pp. 258-266 et vol. 3 (1967), 386.
- [16] BOUCHARDEAU (A.) CALLEDE (J.) et RIOU (Ch.). — 1954. — « Résultats récents des mesures d'évaporation au Tchad ». Serv. Hydrol. O.R.S.T.O.M., mars 1954, 17 p.
- [17] MUNNICH (K. O.), ROETHER (W.) and THILO (J.). — 1967. — « Dating of ground water with tritium and 14 C. Isotopes in Hydrology, *proceedings of a symposium*, Vienna, 14-18 nov. 1966, IAEA, 1967, 305-390.
- [18] WENDT (I.), STAHL (W.), GEYH (M.) and FAUTH (F.). — 1967. — « Model experiments for 14 C water age determinations ». *Ibid.*, 321-337.
- [19] TAMERS (M. A.). — 1967. — « Surface Water infiltration and ground water movement in arid zones of Venezuela ». *Ibid.*, 339-353.
- [20] VOGEL (J. C.). — 1967. — « Investigation of ground water flow with radiocarbon ». *Ibid.*, 355-369.
- [21] GISCHLER (C. E.). — 1967. — « Synthèse hydrologique du Bassin du Lac Tchad. *Nature et Ressources.*, Vol. III, n° 3, p. 10-16.
- [22] SERVANT (M.). — 1967. — « Nouvelles données stratigraphiques sur le Quaternaire supérieur et récent au nord-est du lac Tchad ». *Actes du 6^e Congrès Panafricain de Préhistoire et de l'étude du Quaternaire.* — Sous Presse.
- [23] SERVANT (M.), SERVANT (S.), DELIBRIAS (G.), FAURE (H.). — « Les formations lacustres des basses régions du Tchad au Quaternaire supérieur et récent ». Nouvelles données chronologiques, sédimentologiques, paléocéologiques. — En préparation.
- [24] ROCHE (M. A.). — 1967. — « L'eau dans la Haute Saoura - Sahara nord-occidental ». *Thèse de troisième cycle*, Paris, juin 1967, 295 p., 65 fig., 42 tabl., 20 photos.

TABLEAU I : Lac Tchad, rive nord-est. Hauteur, conductivité, température et composition isotopique des eaux.

Localité	Point d'eau	Date	Hauteur à l'échelle (cm)	C à 25 °C $\mu_s \cdot cm^{-1}$	t °C	$\delta^{18}O$ SMOW
Karé-Katia	Fond de bras, 6 m du bord	24-03-67	437	654	26,0	+ 11,0
		26-04-67	426	693	32,5	+ 11,5
		01-06-67	397	812	28,4	+ 14,4
		27-06-67	387	882	32,6	+ 12,3
		30-07-67	377	931	30,9	+ 15,8
		29-08-67	386	891	30,7	+ 8,9
		06-10-67	400	757	31,8	+ 9,1
		05-11-67	418	717	26,2	+ 11,9
		06-12-67	444	693	26,0	+ 10,7
		11-01-68	443	702	19,5	+ 14,3
		12-02-67	434	684	18,5	+ 11,2
		11-04-68	—	—	26,0	+ 14,5
		Baga-Sola	Port, 5 m du bord	08-04-67	—	171
21-05-67	—			187	—	+ 7,5
27-07-67	—			185	30,0	+ 5,9
26-09-67	—			181	30,7	+ 5,9
01-12-67	—			157	21,9	+ 5,0
12-12-67	—			185	24,3	+ 5,9
Bol	Embarcadère O.R.S.T.O.M., 200 m du bord	19-03-66	454	—	24,0	+ 5,6
		23-10-66	440	160	25,8	+ 5,2
		20-11-66	445	163	24,8	+ 5,6
		22-01-67	440	170	17,0	+ 6,1
		02-03-67	420	164	19,5	+ 6,4
		30-04-67	407	—	28,0	+ 7,1
		19-05-67	395	174	29,0	+ 6,9
		17-06-67	380	177	29,0	+ 5,0
		01-07-67	370	175	30,0	+ 7,5
		28-07-67	367	175	30,0	+ 6,3
		26-08-67	380	165	28,0	+ 4,6
		27-09-67	385	169	—	+ 4,3
		17-10-67	384	166	28,0	+ 3,8
		24-11-67	422	154	21,2	+ 4,9
04-01-68	435	152	20,9	+ 3,8		

TABLEAU II : Nappes littorales dunaires. Profondeur du niveau piézométrique, conductivité, température et composition isotopique des eaux.

Localité	Point d'eau	Date	Profondeur niveau piézomé- trique	C à 25 °C $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$	t° C	$\delta^{18}\text{O}$ SMOW
Karé-Katia	Nappe dunaire litto- rale (trou à la tarière à 3 m du bord du lac)	31-07-67	0,83	2 270	30,9	+ 8,9
		06-10-67	0,75	1 044	28,4	+ 9,1
		06-12-67	0,60	1 850	24,0	+ 11,6
		12-02-68	0,80	1 423	20,1	+ 11,3
		11-04-68	0,55	1.149	26,5	+ 11,8
Baga Sola	Pompe 1, à 15 m du bord du lac	21-05-67	—	246	—	+ 6,2
		5-08-67	—	267	26,8	+ 6,4
		26-09-67	—	353	27,9	+ 6,8
		01-12-67	—	280	27,8	+ 7,1
		12-12-67	—	275	28,2	+ 7,1
Bol	Pompe 3 à 30 m du bord du lac	19-05-67	—	273	—	+ 5,8
		28-07-67	—	338	28,0	+ 5,2
Bol	Pompe 1 à 80 m du bord du lac	06-06-67	—	541	28,6	+ 2,1
		06-08-67	—	382	28,7	+ 2,4
		27-09-67	—	567	28,5	+ 2,4
		24-11-67	—	580	27,8	+ 2,3

TABLEAU III : Nappes phréatiques du Kanem.

Localité	Point d'eau	Date	Profondeur du niveau piézomé- trique	C à 25 °C $\mu_s \cdot cm^{-1}$	t °C	$\delta^{18}O$ SMOW		
Djou	Puits de l'ouadi	26-04-67	0,59	970	27,2	— 5,4		
		3-06-67	0,77	1 065	27,2	— 2,7		
		29-06-67	0,78	989	—	— 4,0		
		29-08-67	—	1 073	—	— 3,4		
		06-10-67	0,55	1 042	27,0	+ 0,6		
		05-11-67	0,57	1 074	22,4	— 1,7		
		07-12-67	0,60	1 040	24,2	— 3,0		
		09-01-68	0,53	1 000	23,8	— 2,7		
		12-02-68	0,50	1 056	23,6	— 2,9		
		23-03-68	—	962	26,5	— 2,6		
		13-04-68	0,86	917	22,5	— 3,2		
		Aoussoudé	Puits de l'ouadi	26-04-67	2,79	560	22,5	— 5,3
03-06-67	2,80			475	28,0	— 5,3		
29-06-67	—			433	—	— 5,3		
31-07-67	2,79			442	27,0	— 5,2		
29-08-67	—			494	—	— 4,7		
06-10-67	2,94			458	27,3	— 4,9		
07-12-67	2,82			475	25,0	— 4,8		
12-02-68	3,04			440	28,4	— 4,9		
23-03-68	—			438	27,8	— 4,3		
13-04-68	2,92			445	25,2	— 4,9		
Kouffa-Kama	Puits de l'ouadi			03-06-67	2,05	1 307	27,3	— 2,3
				29-06-67	2,07	1 623	—	— 1,7
		31-07-67	2,10	1 347	29,4	— 1,7		
		29-08-67	—	1 444	—	— 0,5		
		08-10-67	2,10	1 314	27,2	+ 0,6		
		05-11-67	1,94	1 237	25,7	— 2,7		
		07-12-67	1,97	1 233	21,7	— 1,2		
		09-01-68	2,00	1 160	22,4	— 2,8		
		16-02-68	2,01	877	25,4	— 0,3		
		23-03-68	2,12	962	26,5	— 1,7		
		13-04-68	2,20	—	24,6	— 1,0		
		Bedara	Puits de l'ouadi	11-11-67	1,90	1 876	—	— 4,6
31-03-67	1,93			1 818	27,0	— 4,9		
04-06-67	—			1 814	29,8	— 6,1		
30-06-67	2,25			1 704	—	— 4,3		
04-08-67	1,95			1 741	29,9	— 5,0		
30-08-67	—			1 756	—	— 4,4		
06-11-67	2,16			1 831	27,8	— 4,2		
Andjia	Puits de l'ouadi			31-03-67	1,60	1 046	24,5	— 5,3
		04-06-67	1,55	1 071	29,6	— 6,0		
		30-06-67	—	1 464	—	— 4,6		
		04-08-67	1,57	861	—	— 5,5		
		30-08-67	—	—	—	— 5,5		
		08-10-67	1,44	1 261	28,7	— 4,7		
		06-11-67	1,47	1 029	25,3	— 4,6		

TABLEAU III (suite) : Nappes phréatiques du Kanem. Profondeur du niveau piézométrique, conductivité, température et composition isotopique des eaux.

Localité	Point d'eau	Date	Profondeur du niveau piézométrique	C à 25 °C $\mu_s \cdot cm^{-1}$	t° C	$\delta^{18}O$ SMOW	
Kaya	Puits de l'ouadi	31-03-67	0,85	2 976	22,3	— 5,2	
		04-06-67	0,82	3 835	28,8	— 3,6	
		30-06-67	—	3 787	—	— 3,4	
		28-07-67	0,70	—	28,8	— 5,0	
		30-08-67	—	4 105	—	— 4,5	
		09-10-67	0,70	4 461	27,5	— 3,6	
		06-11-67	0,75	4 420	27,2	— 3,8	
Daguil 4	Sources	21-05-67	—	378	—	— 5,5	
		27-07-67	—	336	29,9	— 6,8	
Polder de Bol-Guini	Source de Guini	19-05-67	—	2 811	—	+ 2,4	
		25-07-67	—	2 640	32,0	+ 2,6	
	Piézomètres	P 2 K	20-05-67	13,48	343	—	+ 4,6
		P 3 K	20-05-67	11,56	481	—	— 4,4
		T 1 L	20-05-67	1,47	447	—	— 3,8
		T 1 M	20-05-67	1,23	235	—	— 4,3
		P 7 K	20-05-67	1,29	1.145	—	+ 6,9
		Puits 7	20-05-67	5	824	—	+ 3,6
	P 12 L	20-05-67	—	509	—	— 4,1	
	Matafo Puits	21-10-66	1,2	209	26,8	— 5,0	
25-07-67		—	136	32,1	— 5,1		
23-09-67		1,4	139	26,5	— 5,1		
26-11-67		1,4	139	26,5	— 5,6		
Nié	Puits de l'ouadi	17-05-67	2,5	133	—	— 4,2	
		22-07-67	2,0	135	30,5	— 3,9	
		21-09-67	2,1	119	28,8	— 3,3	
		23-11-67	2,2	110	24,8	— 5,0	
Dolon	Puits de l'ouadi	22-07-67	—	1 038	27,4	— 3,5	
		20-09-67	2,3	3 380	—	— 4,1	
		23-11-67	2,4	1 170	23,9	— 3,9	
Doum-Doum	Puits de l'ouadi	17-05-67	2,0	618	—	— 4,2	