

Estimation de la recharge de la nappe quaternaire dans le Nord-Ouest du bassin du lac Tchad (Niger oriental) à partir de mesures isotopiques

Christian Leduc^{a*}, Stéphane Sabljak^{a,b}, Jean-Denis Taupin^c, Christelle Marlin^b, Guillaume Favreau^{a,b}

^aIRD, UMR HSM 5569, BP 5045, 34032 Montpellier cedex, France

^bLHGI, UMR 8616, université de Paris sud, 91405 Orsay cedex, France

^cIRD, UMR LTHE 5564, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9, France

Reçu le 20 décembre 1999 ; accepté le 4 janvier 2000

Présenté par Ghislain de Marsily.

Abstract – Recharge of the Quaternary water table in the northwestern Lake Chad basin (southeastern Niger) estimated from isotopes. The Quaternary water table is present over almost the whole Lake Chad basin. In its Niger part, where annual rainfall varies from 0 to 350 mm, radioactive isotopes (³H and ¹⁴C) are interpreted in terms of renewal rate; medians are 0.10 and 0.05 %, respectively, which means a recharge of about 2 or 3 mm·yr⁻¹. This very weak infiltration is compatible with the stable isotope contents (²H and ¹⁸O) in groundwater, which show a mixing of old and recent waters, infiltrated during the last humid period and the present drier times. © 2000 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Niger / Lake Chad basin / groundwater recharge / isotopes / water table

Résumé – La nappe contenue dans les sédiments quaternaires couvre la quasi-totalité du bassin du lac Tchad. Dans sa partie nigérienne, où les précipitations annuelles sont comprises entre 0 et 350 mm, l'interprétation des teneurs en isotopes radioactifs (³H et ¹⁴C) aboutit à des taux de renouvellement annuels médians de 0,10 et 0,05 % respectivement, soit environ 2 ou 3 mm·an⁻¹. Ces chiffres très faibles sont compatibles avec les teneurs en isotopes stables (²H et ¹⁸O) de la nappe, qui suggèrent un mélange d'eaux anciennes, infiltrées durant la dernière période humide, et d'eaux récentes, infiltrées sous un climat plus sec. © 2000 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Niger / bassin du lac Tchad / infiltration / isotopes / nappe

Abridged version

1. Introduction

In the Lake Chad basin, the Quaternary water table lies in thick and flat continental deposits of alluvial and eolian sediments, mainly sandy and silty. In its Niger part, which covers more than 200 000 km², the annual rainfall varies from a few millimetres in the Tenere desert, to 350 mm in the south. Most of the rain (between 70 and 95 % of the annual amount) falls in July and August. As everywhere in the Sahel, rainfall variability in time and space is high: the 1981–1996

rainfall in *figure 1* is significantly lower than the long-term average. Surface water is very limited: the northern pool of Lake Chad, generally dried up during the last decade; the Komadugu Yobe, a non-permanent river; a lot of small endoreic ponds.

The flow in the Quaternary aquifer is from its northern and western borders to the lake area, in the centre of the basin (*figure 1*). Water table gradients are very small. Close to Komadugu Yobe and the northern pool of the Lake Chad, in the Kadzell region, a large anomalous closed depression reaches 40 m of amplitude.

* Correspondance et tirés à part : leduc@mpl.ird.fr



44 81957

* 035001764

2. Stable isotope content

Because of the limited number of rain samples, we use the isotopic contents of rainfall in N'Djamena, 300 km away in the southeast [1], and also event measurements in our study area in 1988 and 1989 [10]. They vary from -10 to $+10$ ‰ for ^{18}O and from -65 to $+60$ ‰ for ^2H .

Isotopic values of the Quaternary aquifer come from old samples in Niger and Chad at the same latitude [7, 8] and recent measurements (*table I* and *figure 2*). They vary from -6.16 to $+4.40$ ‰ and from -49 to $+13$ ‰ for ^{18}O and ^2H , respectively. The slope of the line $\delta^2\text{H} = 5.1 \times \delta^{18}\text{O} - 12.8$, which fits with these values, differs from the meteorological line in N'Djamena, but is close to the slopes given by Taupin et al. [10] in the region. Besides values showing a present recharge, many other points have been subject to evaporation and their original waters, more negative than present rainfall, have probably infiltrated during the last humid period, between 4 000 and 2 000 years BP [11]. The groundwater is therefore a mixing of a recent infiltration, under dry condition, and of older recharge during more humid times.

3. Tritium content

For the rainfall, we used ^3H data in N'Djamena records between 1963 and 1978 and reconstitution from measurements in Ottawa prior to 1963, as usual in the northern hemisphere.

The only value in Komadugu Yobe [7], 141 T.U. in 1967, is similar to the rainfall value in N'Djamena at the same time. Inflow from the river to the Quaternary aquifer is then supposed to have the same tritium content as contemporaneous rainfall in N'Djamena.

The 15 measurements available in the Niger Quaternary aquifer [7, 8] vary from 0.4 to 256 T.U., with a median of 5.2; 21 others in Chad at the same latitude vary from 0.5 to 143 T.U. with a median of 3.8. The representativity of highest values is doubtful: they probably result from local bypasses of the surface runoff through imperfect wells. Without them, the total median is 3.5 T.U. That means that in 1967, after a decade of high and heavily tritiated rainfall, most of the Quaternary aquifer had only very little modern water.

With a simple model of perfect mixing [5], the median renewal rate is about 0.1 % per year in Niger (*figure 3*). Assuming a saturated thickness of 35 m and a possible porosity of 10 %, infiltration is about 3.5 mm per year. Sensitivity to natural groundwater flow from upstream is very weak. Recharge occurs only during the rainiest events, which could have a tritium content different from the monthly average but tests show a limited sensitivity of the model to this.

According to the perfect mixing model, the present median should be lower than 2 T.U. Because of such

small and non-interpretable values, new samples have not been taken.

4. Carbon 14 content

Old ^{14}C measurements in the Quaternary aquifer are few: five in Niger and five in Chad at the same latitude [7]. They vary from 89 to 146 pmc, with a median of 96. Nine recent values (*table I*) are between 11 and 98 pmc, with a median of 68. As for ^3H , the highest values (more than 120 pmc) are probably not representative: some of them could imply a heavy recharge in the dry north greater than in the more humid south. The conservation of the Fly camp sample (10.8 pmc) is doubtful.

Sabljak [9] demonstrates that ^{14}C activities can be used without correction, because of the lack of dissolution of carbonate in the aquifer. Using the same kind of model as for tritium, the annual renewal rate varies between 0 and 16 % (0.06 % in median, 1.7 % in mean). After taking out the doubtful values (the three highest and the lowest), the renewal rate varies from 0.02 to 1.05 %, with a median of 0.05 % and a mean of 0.17 %, which means a median annual infiltration around 2 mm, with the same saturated thickness and porosity as above.

5. Discussion

In semi-arid areas, depending on methods and regions, estimates of annual recharge vary greatly. Among others, Gieske et al. [4] report 9 to 22 mm per year in the Kalahari for an annual rainfall of 400 to 450 mm with chloride and tritium profiles; Aranyossy and Gaye [3] give 22 to 26 $\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ in Senegal for a 300 $\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ rainfall with tritium profiles; Leduc et al. [5] give 25 to 50 $\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ in western Niger for a 550 $\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ rainfall with hydrodynamic observations and tritium contents.

In southeastern Niger, our recharge estimates from ^3H and ^{14}C models are close: 0.10 and 0.05 % for respective median values (i.e., 1 000 and 2 000 years of median residence time in the aquifer). This agrees with a recharge younger than 4 000 years BP suggested by ^2H and ^{18}O . This value of a very few millimetres per year is near Allison and Hughes [2] in Australia, from 0.1 to 3 $\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ with chloride and tritium profiles.

An insufficient understanding of infiltration processes in the region could perhaps bias our estimate, based only on isotopic approaches, even corroborating. We have therefore also used water table observations. During the last decades, most of the groundwater levels in southeastern Niger had only very small fluctuations, in spite of the severe droughts in the Sahel in the mid 70s and 80s [6]. This confirms that the renewal rate is small. Moreover, a numerical modelling of the Quaternary aquifer gave an estimate of the annual recharge of the order of a millimetre, fitting well with isotopic interpretations and water level observations.

1. Introduction

La partie nigérienne du bassin du lac Tchad s'étend sur plus de 200 000 km². L'essentiel correspond à un vaste épandage continental, dont l'épaisseur atteint plusieurs milliers de mètres. À l'affleurement apparaissent presque exclusivement les sédiments quaternaires, alluviaux et éoliens, surtout sableux et sablo-argileux (figure 1).

Les précipitations annuelles varient entre 350 mm au sud et quelques millimètres dans le désert du Ténééré, au nord ; les dernières décennies (cf. isohyètes de la moyenne 1981–1996 sur la figure 1) ont été sensiblement plus sèches que la moyenne à long terme. Comme

partout au Sahel, durant la courte saison des pluies, qui va de juin à septembre, les pluies sont très irrégulièrement distribuées dans le temps et dans l'espace.

Le réseau hydrographique se limite à la cuvette nord du lac Tchad, très souvent complètement asséchée depuis une décennie, à une rivière non permanente, la Komadougou Yobé, et à de nombreuses petites mares occupant le fond de cuvettes endoréiques et pouvant être en équilibre avec la nappe phréatique.

Les écoulements dans la nappe quaternaire semblent converger depuis les bordures nord et ouest vers le centre du bassin, c'est-à-dire la zone du lac. Les gradients hydrauliques sont généralement faibles, de 0,1 à 2,5 ‰ [6, 9]. Dans le sud, bordée par la Komadougou Yobé et

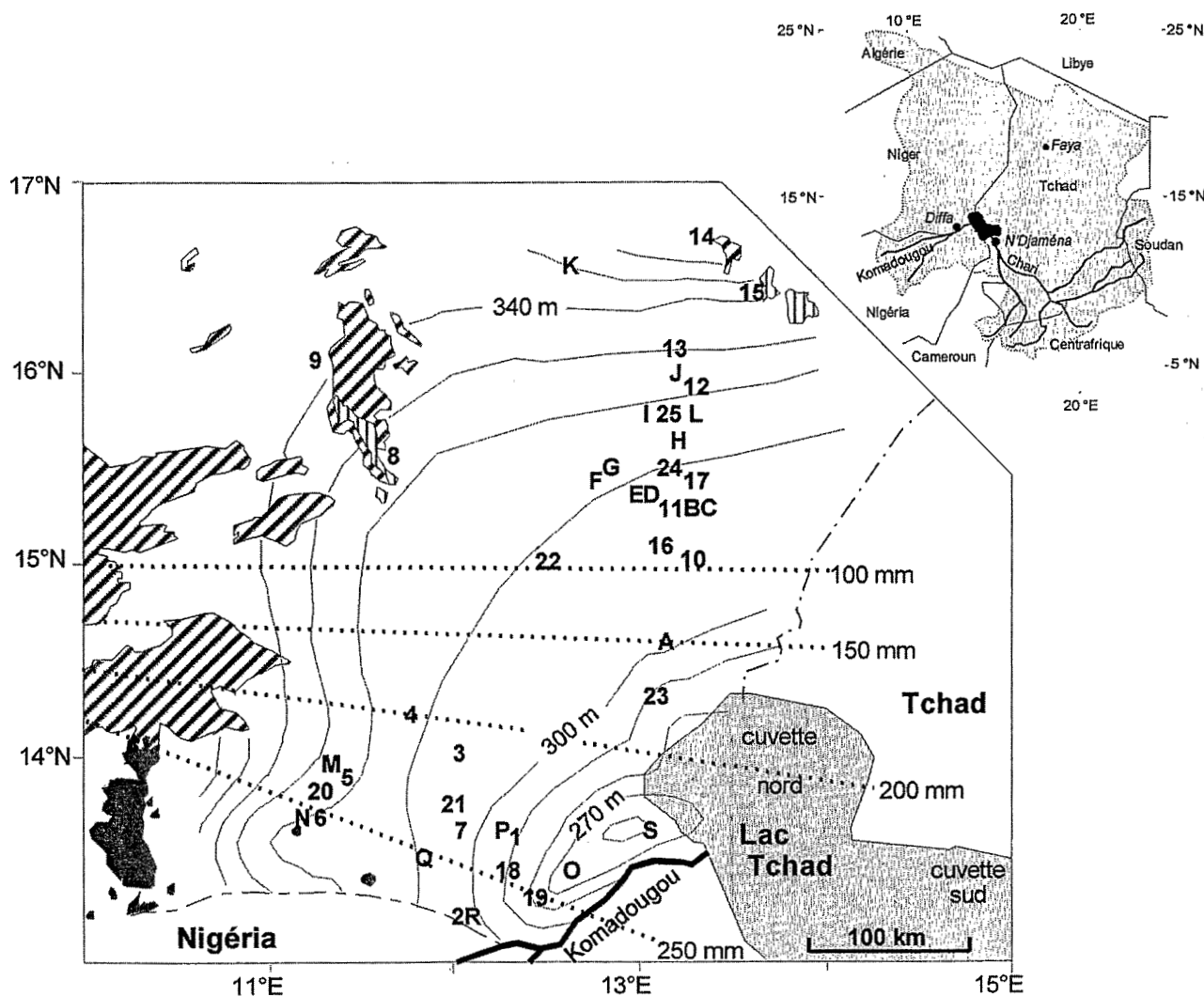


Figure 1. Géologie régionale (socle cristallin à l'ouest en plein, Crétacé en hachures inclinées et Continental terminal en hachures verticales, Quaternaire sans motif), courbes isopièzes tous les 10 m en trait plein, courbes isohyètes (moyenne 1981–1996) tous les 50 mm en pointillé et implantation des différents prélèvements récents (A à S du tableau I) et anciens (1 à 25 du tableau II).

Figure 1. Geological map (basement in solid, Cretaceous with transverse hatch, Continental Terminal with vertical hatch, Quaternary in white), water level isolines (solid line every 10 m), mean annual rainfall for 1981–1996 (dashed line every 50 mm) and places of recent sampling (A to S in table I) and of former sampling (1 to 25 in table II).

la cuvette nord du lac, se trouve la dépression piézométrique du Kadzell, dont le creux dépasse une quarantaine de mètres (*figure 1*). Pendant sa crue annuelle, la Komadougou Yobé alimente la nappe quaternaire immédiatement adjacente. Lorsqu'elle est en eau, la cuvette nord du lac draine les écoulements souterrains venant du nord, mais alimente la nappe en bordure du Kadzell. La nappe est rencontrée à des profondeurs variant de 1 à 55 m sous la surface du sol, supérieures à 10 m pour plus des deux tiers des ouvrages.

Dans un article précédent [5], des mesures de tritium étaient exploitées pour estimer la recharge dans une partie du grand bassin sédimentaire des Iullemeden, qui couvre l'Ouest du Niger. Le présent compte-rendu vient en écho pour l'autre grand bassin sédimentaire du pays, celui du lac Tchad, qui en occupe la partie orientale. Les résultats sont différents, alors que les environnements semblent assez similaires.

2. Les teneurs en isotopes stables

Pour connaître l'apport des précipitations, nous disposons d'une chronique mensuelle de l'AIEA à N'Djaména entre 1965 et 1978 [1] et de mesures événementielles en 1988 et 1989 à Zinder, Diffa, Gouré et N'Guigmi [10]. Ces teneurs ont varié entre -10 et $+10$ ‰ pour ^{18}O et entre -65 et $+60$ ‰ pour ^2H , avec des moyennes pondérées par la pluie de $-4,0$ ‰ pour ^{18}O et $-21,9$ ‰ pour ^2H à N'Djaména. Les pluies de N'Djaména s'alignent approximativement sur une droite $\delta^2\text{H} = 6,3 \times$

$\delta^{18}\text{O} + 4,2$; pour celles du Niger, les pentes de ces droites varient de 5,1 à 7,1. Cette variabilité importante de composition isotopique est commune à toutes les régions arides. Il faut donc être prudent en utilisant la série de N'Djaména, longue mais située à 300 km au sud-est de notre zone d'étude, dans une région plus humide, ou les rares mesures de 1988 et 1989. Actuellement, il n'est pas possible de quantifier la variation de teneur en isotopes stables de la pluie en fonction de la latitude dans notre zone d'étude.

Dans la nappe quaternaire, toutes les mesures disponibles au Niger et au Tchad entre 11°E et 16°E et 12°N et 16°N sont exploitées, soit les 17 sites de cette étude (*tableau 1*) et 49 sites plus anciens [8]. Les teneurs s'établissent entre $-6,16$ ‰ et $+4,4$ ‰ en ^{18}O et entre -49 et $+13$ ‰ en ^2H , avec des médianes de $-3,9$ ‰ et $-32,0$ ‰, respectivement (*figure 2*). Ces points sont distribués selon une droite $\delta^2\text{H} = 5,1 \times \delta^{18}\text{O} - 12,8$, dont la pente est proche de celles obtenues par Taupin et al. [10] dans la région, mais différente de celles des pluies de N'Djaména. Une infiltration actuelle de la pluie vers la nappe existe donc. Cependant, de nombreux points montrent un cachet évaporé, qui fait rechercher l'eau originelle vers des teneurs plus négatives que les pluies actuelles. Lors du dernier épisode humide, entre 4 000 et 2 000 BP, les teneurs isotopiques des précipitations étaient nettement plus négatives qu'aujourd'hui; l'écart est estimé à 5 ‰ vs. PDB en ^{18}O par Téhét et al. [11]. La nappe serait donc un mélange d'eaux récentes et anciennes. Par ailleurs, l'appauvrissement en isotopes

Tableau 1. Caractéristiques principales des prélèvements récents dans la nappe quaternaire au Niger : longitude, latitude, conductivité électrique in situ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), niveau statique (m), teneurs en isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ en ‰ vs. SMOW, A^{14}C en pCm et $\delta^{13}\text{C}$ en ‰ vs. PDB). L'incertitude est de 0,2 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ et de 2 ‰ pour $\delta^2\text{H}$.

Table 1. Main characteristics of recent samples from the Quaternary aquifer in Niger: longitude, latitude, electrical conductivity ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), depth to water level (m), isotopic contents ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in ‰ vs. SMOW, A^{14}C in pCm and $\delta^{13}\text{C}$ in ‰ vs. PDB). Uncertainty is 0.2 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$, 2 ‰ for $\delta^2\text{H}$.

		Longitude	Latitude	Conductivité électrique	NS	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	A^{14}C	^{13}C
A	95/1	13°08	14°40	225	-23,3	-5,83	-38,9		
B	Ngourti forage	13°12	15°20	409		-4,04	-34,1		
C	Ngourti puits	13°12	15°20	625	-10,4	-3,98	-35,4		
D	95/4	13°02	15°21	774	-12,3	-3,68	-35,5		
E	95/5	12°58	15°23	1 090	-11,9	-4,57	-39,8		
F	95/6	12°43	15°27	1 150	-10,6	-5,22	-49,2		
G	95/7	12°52	15°32	915	-9,6	-6,16	-45,6		
H	95/8	13°08	15°40	876	-7,2	-3,23	-44,2		
I	95/9	13°07	15°45	762	-8,4	-5,21	-46,0		
J	95/10	13°12	15°59	980	-10,2	-5,63	-46,1		
K	Madama	12°39	16°33	125	-55			64,6 ± 0,6	-4,69
L	Fly camp	13°08	15°48	79	-30			10,8 ± 0,2	-6,30
M	Bouti	11°20	13°59	1 240	-14,2	-2,97	-26,2	73,3 ± 0,4	-5,26
N	Goudoumaria	11°11	13°43	2 210	-5,4	-3,39	-27,6	98,4 ± 1,2	-11,33
O	Guel Tchaman	12°39	13°30	1 340	-44,5	-3,00	-26,8	62,7 ± 0,4	-10,59
P	Issari	12°17	13°38	210	-24,1	-4,04	-30,8	96,9 ± 0,8	-9,29
Q	Kélakam	11°44	13°33	380	-9,6	-4,00	-28,1	80,1 ± 1,3	-13,28
R	Maïné Soroa	12°01	13°13	530	-28,4	-5,12	-33,7	68,4 ± 1,0	-10,97
S	Toumour	13°07	13°40	3840	-26,1	-2,15	-19,5	65,3 ± 0,4	-6,29

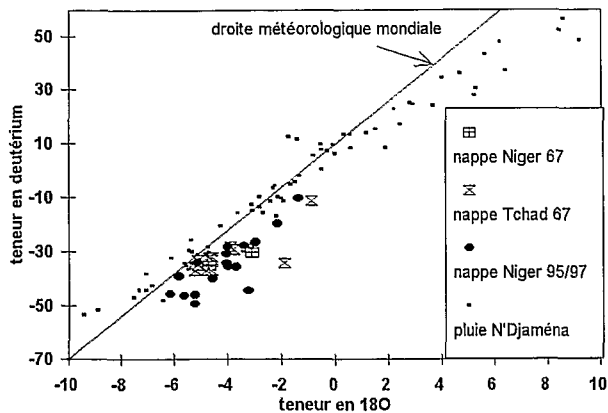


Figure 2. Teneur en ^{18}O et ^2H dans la nappe quaternaire et dans les précipitations à N'Djaména.

Figure 2. Isotopic content (^{18}O and ^2H) in the Quaternary water table and in the N'Djaména rainfall.

lourds des eaux souterraines du sud vers le nord témoignerait d'une moindre contribution des pluies actuelles à la recharge de la nappe au nord et donc la présence d'un stock d'eau globalement plus ancien.

3. Les teneurs en tritium

Les teneurs en ^3H de 1967–1968 sont interprétées en fonction du signal atmosphérique de l'époque. Comme pour les isotopes stables, nous utilisons en référence la chronique des moyennes mensuelles des teneurs en ^3H des pluies existant à N'Djaména pour la période 1963–1978 [1]. Entre 1966 et 1968, les mesures épisodiques à Faya-Largeau, 600 km plus au nord (moins de $20 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ de pluie), ne s'en écartent pas de plus de 14 %, soit 20 UT. Les valeurs de N'Djaména sont donc supposées représentatives des pluies régionales du Sud-Est nigérien. Les teneurs moyennes des précipitations antérieures à 1963 ont été reconstituées par corrélation avec les chroniques d'Ottawa [1], ainsi qu'il est couramment pratiqué dans l'hémisphère nord.

Il n'existe qu'une mesure de tritium dans la Komadougou Yobé [7] : en décembre 1967, la valeur de 141 UT est comparable à la moyenne pondérée par les précipitations à N'Djaména (156 UT en 1967). Les apports à la nappe quaternaire depuis le réseau hydrographique ont donc probablement une signature isotopique proche de celles des pluies synchrones à N'Djaména.

En 1967 et 1968, 15 prélèvements dans la nappe quaternaire au Niger ont été analysés par l'AIEA [7, 8]. Ils figurent dans le *tableau II*. Les teneurs en ^3H varient entre 0,4 et 256 UT, la médiane étant de 5,2 UT et trois valeurs sont exceptionnellement fortes (76, 168 et 256 UT). Les 21 mesures faites dans le même aquifère du côté tchadien, à distance modérée des points nigériens,

donnent des valeurs identiques (entre 0,5 et 143 UT, médiane de 3,8). À ce moment, les pluies à N'Djaména dépassent encore 120 UT, après avoir excédé 1 000 en 1963. Il est donc évident que la nappe du Quaternaire ne contenait, après une décennie de fortes précipitations au Sahel, qu'une très faible proportion d'eaux récentes, sauf en quelques puits exceptionnels, où une nette recharge « actuelle » avait eu lieu, mais ne concernait probablement que des surfaces infimes. La médiane « Niger + Tchad proche » est de 4,0 UT ; en retirant les valeurs supérieures à 100 UT, dont la représentativité est incertaine, cette médiane est de 3,5 UT. On constate ainsi que la médiane est une estimation beaucoup plus robuste que la moyenne dans le cas de données incertaines.

Nous exploitons ces données par un modèle simple qui semble adapté au mode de recharge des grands aquifères sahéliens [5]. La teneur moyenne en tritium dans la nappe au cours de l'année i est calculée par $An_i = (1 - Tr_i) An_{i-1} e^{-\ln 2/T} + Tr_i Ap_i$, avec Tr_i le taux de renouvellement de la nappe, An_{i-1} la teneur en tritium de la nappe l'année $i-1$, T la période du tritium (12,3 ans), Ap_i la teneur en tritium de la pluie de l'année i . Ce modèle prend en compte la décroissance radioactive du tritium et représente l'évolution annuelle de la composition isotopique en fonction des volumes et activités antérieures de l'aquifère et de la pluie infiltrée, jusqu'à la date de prélèvement, c'est-à-dire 1968. Il permet un calcul du taux annuel de renouvellement sur chaque volume élémentaire supposé homogène, de quelques kilomètres carrés de surface et de profondeur égale à l'épaisseur mouillée de l'aquifère. Du fait de leur faiblesse, la prise en compte ou non des transferts horizontaux ne modifie pas les résultats de manière significative. En retenant la totalité des échantillons, le taux de renouvellement médian de la nappe ainsi calculé est d'environ 0,1 % par an (*figure 3*), la moyenne étant de 1,4 %. En excluant les trois valeurs supérieures à 100 UT, la médiane est de 0,09 % et la moyenne de 0,25 %. En supposant une épaisseur saturée de 35 m et une possible porosité de 10 % pour l'aquifère, ceci aboutirait à une infiltration médiane d'environ $3,5 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$.

Nous n'avons pas effectué de prélèvements plus récemment. En effet, d'après le modèle de mélange parfait, la teneur médiane de la nappe en 1997 devrait être de 2 UT ; les valeurs actuelles seraient donc très peu différenciées et difficilement interprétables.

4. Les teneurs en carbone 14

Une étude approfondie des isotopes du carbone a permis d'écartier tout effet de vieillissement des eaux de la nappe quaternaire par la mise en solution d'une matrice carbonatée plus ancienne [9]. Les activités ^{14}C sont donc considérées comme représentatives de la recharge et utilisées sans correction.

Tableau II. Caractéristiques principales des prélèvements anciens dans la nappe quaternaire au Niger : longitude, latitude, conductivité électrique in situ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), niveau statique (m), teneurs en isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ en ‰ vs. SMOW, A^{14}C en pCm et $\delta^{13}\text{C}$ en ‰ vs. PDB, ^3H en UT). Données extraites de [7, 8].

Table II. Main characteristics of recent samples from the Quaternary aquifer in Niger: longitude, latitude, electrical conductivity ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), depth to water level (m), isotopic contents ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in ‰ vs SMOW, A^{14}C in pmc and $\delta^{13}\text{C}$ in ‰ vs PDB, ^3H in TU). From [7, 8].

	Longitude	Latitude	Conductivité électrique	NS	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	A^{14}C	^{13}C	^3H
1	12°18	13°39	236	-19	-6,92				0,4
2	12°02	13°13	1 143	-45	-4,55				0,8
3	12°00	14°04	3 106	-10,7	-6,02		125,1	-6,53	168
4	11°44	14°16	607	-6,6	-4,41				5,4
5	11°20	13°59	571	-16,2	-4,12		88,5	-7,55	75,6
6	11°12	13°13	183	-12	-4,31				0,8
7	12°02	13°45	325	-19,5	-4,99				1,1
8	11°31	15°38	377	-30	-5,48				7,8
9	11°15	16°06	631	-12	-8,59				2
10	13°18	15°03	180	-13,3	-5,20				1,7
11	13°12	15°19	520	-10,3	-4,41		92	-3,12	
12	13°12	15°59	324	-8,6	-6,26		100,8	-7,80	
13	13°13	16°09	507	-21,9	-6,02		146,1	-1,68	0,9
14	13°19	16°46	956	-2,8	-5,50	-47			5,2
15	13°43	16°32	2 320	-7,6	-5,10	-48			5,8
16	13°10	15°06	219	-18,7	-4,70	-35			5,7
17	13°22	15°25	939	-9,5	-3,10	-30			256
18	12°19	13°24	1 515	-36,9	-5,80				
19	12°27	13°18	223	-34,7	-3,31				
20	11°13	13°46	570	-10	-4,33				
21	12°01	13°46	1 040		-5,26				
22	12°31	15°01	476	-15,5	-5,18				
23	13°06	14°19	167	-6	-6,85				
24	13°10	15°30	913	-6,7	-5,70				
25	13°09	15°45	965	-5	-3,85				

Les mesures anciennes de ^{14}C dans la nappe quaternaire [7] sont peu nombreuses : seulement cinq valeurs au Niger, allant de 89 à 146 pCm (tableau II). En rajou-

tant cinq autres valeurs de la nappe au Tchad proche, les extrêmes sont de 59 et 146 pCm et la médiane de 96 pCm. Neuf analyses récentes complètent ces mesures (tableau I) : les valeurs s'étalent entre 11 et 98 pCm, leur médiane étant de 68 pCm. Les activités ^{14}C maximales mesurées en 1967 (146 et 125 pCm au Niger, 124 pCm au Tchad) semblent peu représentatives de la nappe phréatique, puisqu'elles impliqueraient une recharge dans le nord nettement supérieure à celle dans le sud ; elles sont probablement dues à des déversements artificiels dans les puits. Par ailleurs, il est probable que les conditions de prélèvement et de stockage ont modifié l'échantillon de Fly camp (« L » dans la figure 1), qui montre une valeur anormalement basse de 10,8 pCm.

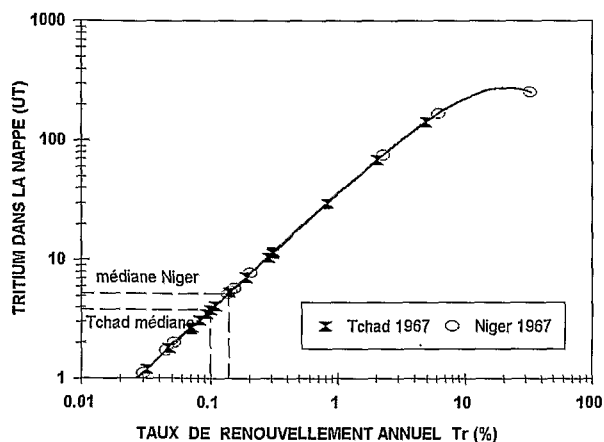


Figure 3. Teneurs en tritium de la nappe quaternaire en 1967 et 1968 et taux de renouvellement annuel, modélisés à partir de la chronique des pluies à N'Djaména, en supposant une infiltration constante.

Figure 3. Tritium contents in the Quaternary water table in 1967 and 1968 and annual renewal rates modelled from rainfall data in N'Djaména with the hypothesis of a constant infiltration.

Un modèle identique au modèle tritium est utilisé ici. Les données anciennes sont interprétées à la date de 1967, nos mesures récentes à la date de 1997. Les taux de renouvellement varient entre 0 et 16 %, avec une médiane de 0,06 % et une moyenne de 1,7 % (toutes données confondues). En retirant les trois mesures de 1967 dépassant 120 pCm et Fly Camp, le taux de renouvellement varie entre 0,02 et 1,05 %, avec une valeur médiane de 0,05 % et une moyenne de 0,17 %. Cette valeur médiane conduirait alors à une infiltration annuelle d'environ 2 mm, en reprenant les mêmes hypothèses de calcul qu'au paragraphe précédent.

5. Discussion

L'absence d'organisation géographique des isotopes radioactifs, par exemple selon les directions d'écoulement, confirme la faiblesse des transferts horizontaux et l'hétérogénéité des situations de recharge. La large gamme des valeurs de terrain et des reconstitutions par modèles rappelle également la très grande variabilité de l'infiltration dans cette région, comme dans toutes les zones semi-arides. Les taux de renouvellement obtenus pour le Niger sud-oriental à partir du modèle de ^3H ou du modèle de ^{14}C sont du même ordre de grandeur : 0,10 et 0,05 % pour les médianes respectives, soit des durées médianes de résidence dans l'aquifère de 1 000 et 2 000 ans. Ceci est cohérent avec les isotopes stables, qui indiquent un mélange d'eaux plus récentes et plus anciennes que 4 000 ans BP.

Dans d'autres zones semi-arides, diverses estimations de la recharge annuelle ont déjà été proposées, comme par exemple de 9 à 22 $\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$, pour des précipitations annuelles comprises entre 400 et 450 mm, d'après des profils de chlorure et de tritium dans le Kalahari [4], ou bien encore de 22 à 26 $\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$, pour une pluie annuelle d'environ 330 mm, d'après des profils de tritium au Sénégal [3]. Au Niger occidental, près de Niamey, l'infiltration atteignant la nappe varie entre 25 et

50 $\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$, pour une pluie annuelle d'environ 550 mm [5]. Cette variabilité est liée à la multiplicité des conditions topographiques, climatiques, biologiques. Les chiffres que nous proposons ici sont beaucoup plus faibles ; ils se rapprochent de ceux de Allison et Hughes [2] en Australie, d'après des profils de chlorure et de tritium : de 0,1 à 3 $\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$, pour une pluie annuelle de 335 mm.

Notre petit nombre d'analyses ne suffit certainement pas pour appréhender la totalité de la diversité hydrogéologique de la nappe quaternaire. C'est pourquoi nous avons également essayé de quantifier la recharge de cette région par d'autres approches. Les observations piézométriques faites depuis une dizaine d'années dans la partie nigérienne du bassin du lac Tchad montrent que la nappe quaternaire n'a évolué que très lentement, malgré les sécheresses sévères du milieu des années 70 et 80 [6]. Cette observation est cohérente avec le faible renouvellement tiré des interprétations isotopiques.

Enfin, une première modélisation numérique des écoulements souterrains a été réalisée [6]. Malgré la rareté et la très grande dispersion des données, le modèle mis au point en régime permanent reproduit bien la répartition des piézométries régionales. La recharge, c'est-à-dire le solde « infiltration de la pluie-évaporation » serait de l'ordre du $\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$.

Remerciements. Nous tenons à remercier Gilles Camson et Christian Ille pour les deux prélèvements de Madama et Fly Camp, ainsi que Ghislain de Marsily pour sa lecture critique du manuscrit.

References

- [1] AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique), Statistical treatment of data on environmental isotopes in precipitation, Rapport technique n° 331, Vienne, 1992, 781 p.
- [2] Allison G.B., Hughes M.W., The use of natural tracers as indicators of soil-water movement in a temperate semi-arid region, *J. Hydrol.* 60 (1983) 157–173.
- [3] Aranyosy J.-F., Gaye C.-B., La recherche du pic de tritium thermonucléaire en zone non saturée profonde sous climat semi-aride pour la mesure de la recharge des nappes : première application au Sahel, *C. R. Acad. Sci. Paris, série II* 315 (1992) 637–643.
- [4] Gieske A., Selaolo E.T., Beekman H.E., Tracer interpretation of moisture transport in a Kalahari sand profile, in : Adar E.M., Leibundgut C. (éds), Application of tracers in arid zone hydrology, AISH publ. n° 232, Wallingford, GB, 1995, pp. 373–382.
- [5] Leduc C., Taupin J.-D., Le Gal La Salle C., Estimation de la recharge de la nappe phréatique du Continental terminal (Niamey, Niger) à partir des teneurs en tritium, *C. R. Acad. Sci. Paris, série IIa* 323 (1996) 599–605.
- [6] Leduc C., Salifou O., Leblanc M., Évolution des ressources en eau dans le département de Diffa (bassin du lac Tchad, Sud-Est nigérien), in : Servat E., Hughes D., Fritsch J.M., Hulme M. (éds), Water resources variability in Africa during the XXth century, AISH publ. n° 252, 1998, Wallingford, GB, pp. 281–288.
- [7] PNUD-UNESCO-CBLT, Synthèse hydrologique du bassin du lac Tchad 1966–1970, Rapport technique Unesco, Paris, 1972, 218 p. + cartes.
- [8] PNUD-FAO-CBLT, Étude des ressources en eau du bassin du lac Tchad en vue d'un programme de développement. Tome I. Hydrogéologie, Rapport technique FAO, Rome, 1973, 95 p. + cartes.
- [9] Sabljak S., Hydrochimie et hydrodynamique de la nappe phréatique au Niger sud-oriental, mémoire de DEA, université de Paris-11-Orsay, France, 1998, 74 p. + annexes.
- [10] Taupin J.-D., Gallaire R., Fontes J.-C., Isotopic study of rainfall in the Sahelian zone (Niger) along two sections, east-west (Lake Chad-Niamey) and north-south (Agadez-Niamey), in : Adar E.M., Leibundgut C. (éds), Application of tracers in arid zone hydrology, AISH publ. n° 232, Wallingford, GB, 1995, pp. 285–292.
- [11] Théhet R., Gasse F., Durand A., Schroeter P., Fontes J.-C., Fluctuations climatiques du Tardiglaciaire à l'Actuel (Bougdouma, Niger méridional), *C. R. Acad. Sci. Paris, série II* 311 (1990) 253–258.

