

Géosciences de surface / Surface Geosciences
(Hydrologie–Hydrogéologie / Hydrology–Hydrogeology)

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 HSM 5564, BP 50, 33041 Bordeaux cedex, France

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

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

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

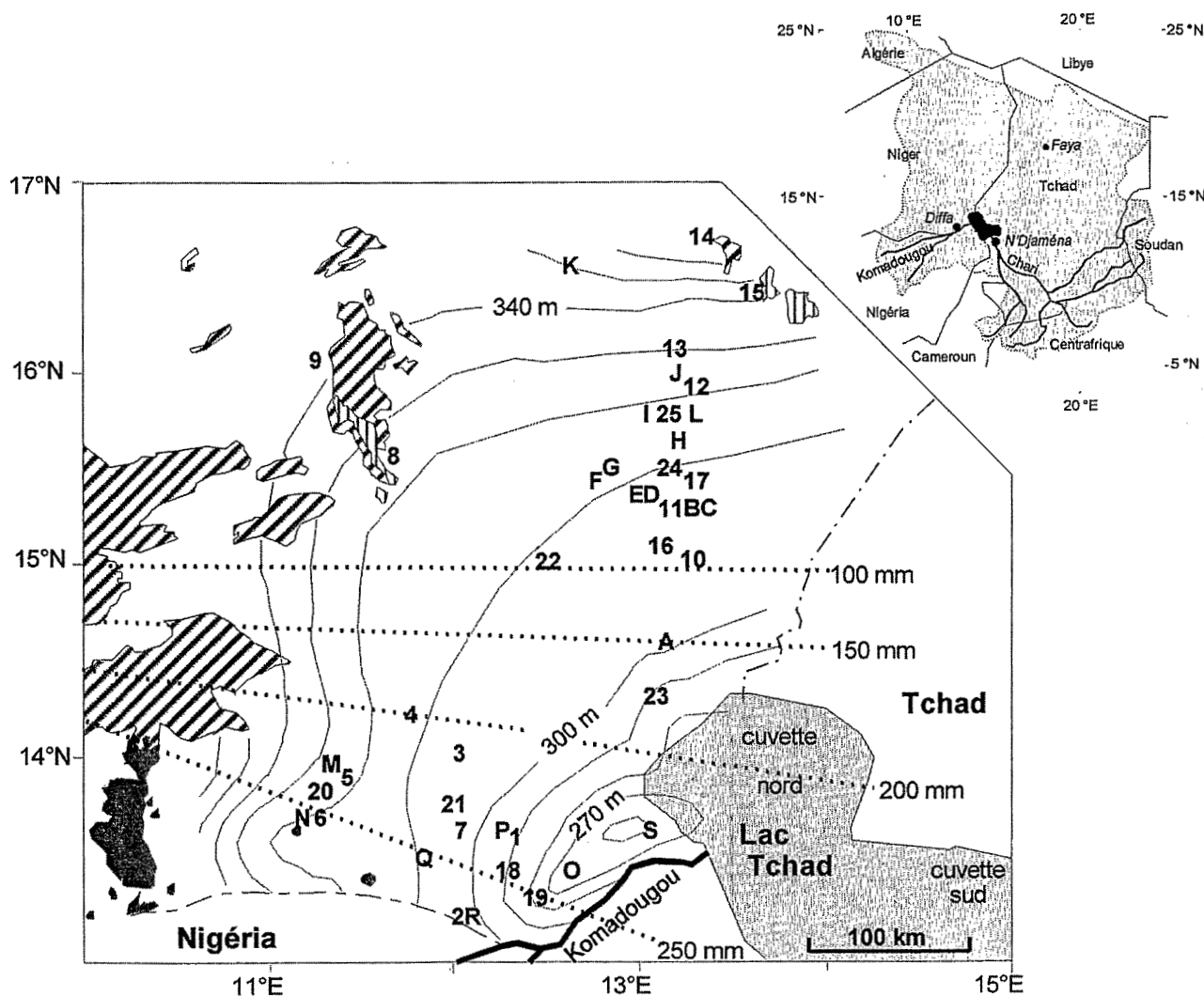


Figure 1. Géologie régionale (socle cristallin à l'ouest en plein, Crétacé en hachures inclinées et Continental terminal en hachures verticales, Quaternaire sans motif), courbes isopièzes tous les 10 m en trait plein, courbes isohyètes (moyenne 1981–1996) tous les 50 mm en pointillé et implantation des 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

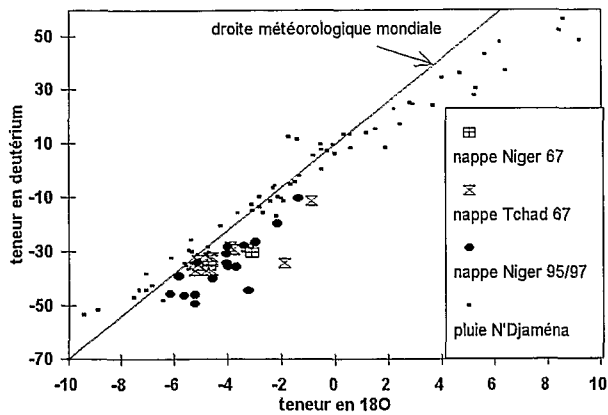


Figure 2. Teneur en ^{18}O et ^2H dans la nappe quaternaire et dans les précipitations à N'Djaména.

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

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 horizon-

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.

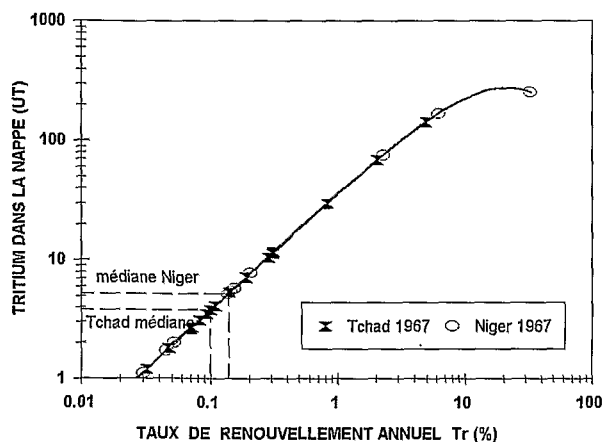


Figure 3. Teneurs en tritium de la nappe quaternaire en 1967 et 1968 et taux de renouvellement annuel, modélisés à partir de la chronique des pluies à N'Djaména, en supposant une infiltration constante.

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

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

