

107686

Estimation de la recharge de la nappe phréatique du Continental Terminal (Niamey, Niger) à partir des teneurs en tritium

Christian Leduc, Jean-Denis Taupin et Corinne Le Gal La Salle

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 323, série II a,
p. 599 à 605,
1996

Ch. L. et J.-D. T. :
ORSTOM, BP n° 5045,
34032 Montpellier CEDEX,
France ;

C. Le G. La S. :
Laboratoire d'Hydrologie
et de Géochimie Isotopique,
Université de Paris-Sud,
91405 Orsay CEDEX, France.

Résumé Dans l'environnement typiquement sahélien de la région de Niamey, la réalimentation de la nappe phréatique du Continental Terminal est essentiellement due à l'infiltration de la pluie concentrée dans les mares endoréiques temporaires. Les teneurs en tritium sont un bon indicateur de l'intensité de la recharge. Un modèle simple utilise une chronique reconstituée des teneurs de la pluie à Niamey depuis 40 ans et fournit les taux de renouvellement correspondant aux valeurs mesurées dans la nappe (25 mm/an). Ces résultats sont cohérents avec ceux de l'approche hydrodynamique.

Mots-clés : Niger, Sahel, Infiltration, Tritium, Modèle analytique, Nappe phréatique.

Abstract Recharge of the Continental Terminal water-table (Niamey, Niger) estimated from tritium measurements and modelling

As often in the Sahelian belt, recharge of the Continental Terminal water table near Niamey, Niger, is essentially due to rainfall infiltration through numerous temporary pools. Tritium content in rain over the past 40 years is reconstructed and used by a simple model to calculate the groundwater renewal rate according to measurements throughout the aquifer. This isotopic estimate (25 mm per year) is close to the hydrodynamical estimate.

Keywords: Niger, Sahel, Groundwater recharge, Tritium, Analytical modelling, Water-table.

**Abridged
English
Version**

THE hydrogeological part of the Hapex-Sahel project (Goutorbe *et al.*, 1994) aims to understand the infiltration processes and to evaluate the phreatic aquifer recharge in the Niamey degree square (2-3°E, 13-14°N). The Continental Terminal sediments are a late Tertiary sequence of sands and silts, sometimes sandstones, with lateritic intercalations. In this typically Sahelian region (average annual rainfall for 1921-1992 is 573 mm in Niamey), most of the water infiltrates from the temporary drainage network, endoreic pools and streams. The median depth to the water table is 35 m but it varies between nearly 0 m, in a very large fossil valley at the eastern border of the degree square, and 75 m, beneath the laterite plateaux (fig. 2). Two estimates of the annual ground-

water recharge are based on a long-term hydrodynamic survey throughout the whole degree square (50 mm in 1992) and on the water budget of representative pools in the central zone (75 mm in 1992, 65 mm in 1993) (Leduc and Desconnets, 1994; Desconnets, 1994 ; Leduc *et al.*, 1996). A third evaluation, based on the tritium content, is detailed hereafter.

Because of the lack of regular sampling in Niamey, the evolution of the rain tritium content is reconstructed by correlation with IAEA data (IAEA, 1992) in stations which are close (Bamako, N'Djamena 1963-1979) or have long records (Ottawa, 1953-1987). Some very recent punctual measurements have been added (8.9 TU for the whole rainy season in 1989 according to Girard, 1993, 5.4 and

Note

présentée par
Georges Pedro.

remise le 22 janvier 1996,
acceptée après révision
le 3 juin 1996.



6.7 TU for the periods from 25/7/94 to 11/8/94 and from 12/8/94 to 20/9/94 respectively) but the 1980-1990 period remains the most uncertain (fig. 3).

Because of the small annual recharge in Sahelian countries, tritium is still usable as indicator of water age as much in the unsaturated zone (e.g. Aranyossi and Gaye, 1992) as in the saturated zone. In the Continental Terminal aquifer, tritium from 21 wells or boreholes has been analysed: it varies from 0.8 to 20 TU (median value is 4 TU) and confirms the large heterogeneity of the groundwater recharge (fig. 1). Neither depth to the water table nor annual water table rise is correlated with tritium content.

A simple model is used to simulate the aquifer tritium content depending on a renewal rate, which is fixed or varies according to the annual rainfall :

$$An_i = (1 - Tr_i) * An_{i-1} * e^{-Ln2/T} + Tr_i * Ap_i$$

with An_i the tritium content in aquifer during year i , T the tritium half life (12.3 years), Ap_i the rain tritium content during year i and Tr_i the renewal rate for the year i $Tr_i = Tr_* (P_i/P_m)^{1.5}$, with Tr_* the long-term mean renewal rate, P_i the annual rainfall of the year i , P_m the long-term mean annual rainfall (570 mm). This last empirical relationship gives a Tr_i for the rainiest year four times more important than the Tr_i of the driest year between 1953 and 1994.

The total amount of groundwater remains constant. The model does not take into account the spatial rainfall variability nor horizontal groundwater flow. These conditions are realistic: the fall of the water table due to the droughts during the 1970s and 1980s or its rise over the past 10 years is small in compari-

son with the thickness of the saturated zone; the extreme heterogeneity of rainfall in a given year, as demonstrated by Taupin *et al.* (1993), disappears when working on a decade scale; the steadiness of a piezometric depression (central zone below 190 m in figure 1) reveals the weakness of lateral water transfers.

Sensitivity analysis shows a stable shape of the simulated curve and very limited variation for extreme values of the renewal rate (fig. 4). The rainfall weighting intensifies the impact of the 1960s which were both rainy and heavily loaded with tritium. If Ap_i increases by 20% for the period 1979-1993, An_{1994} increases only by 0.1 to 0.5 TU for Tr lower than 2%.

Tritium content lower than 5 TU implies a weak renewal rate (less than 0.5%) when the highest value (20 TU) requires a renewal rate of about 5%. Therefore, it exists in the degree square areas with an infiltration at least ten times higher than others. Such heterogeneity recalls hydrodynamic variability: annual amplitude of the water table is between 0 and 9 m (median about 0.5 m).

Given a saturated thickness of 30 m and an effective porosity of 15%, the median value for recharge is about 25 mm per year. This estimate is consistent with the previous calculations, even if it is lower: the water budget of several pools in the centre of the degree square gives a median recharge of about 75 mm in 1992 and 65 mm in 1993; a calculation based on water table fluctuation gives an infiltration of about 50 mm in 1992. This difference can be explained by the difference in the time scale: the water budget of the pools is strictly annual, the piezometric fluctuation results from both annual infiltration and long term evolution, isotopes have been mixed for some decades.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre du projet Hapex-Sahel (présentation générale par Goutorbe *et al.*, 1994), les investigations hydrogéologiques menées depuis 1991 ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de la nappe phréatique dans la région de Niamey (Niger) et notamment les processus de réali-

mentation durant la courte saison des pluies. La zone étudiée, de 2 à 3° Est et de 13 à 14° Nord, est constituée par une succession de dépôts horizontaux sableux, limoneux et argileux, parfois grésifiés et armés par des horizons latéritiques plus ou moins épais et indurés. Cet ensemble, daté du Continental Terminal, a une épaisseur faible à l'Ouest, voire nulle le long du fleuve Niger qui coule

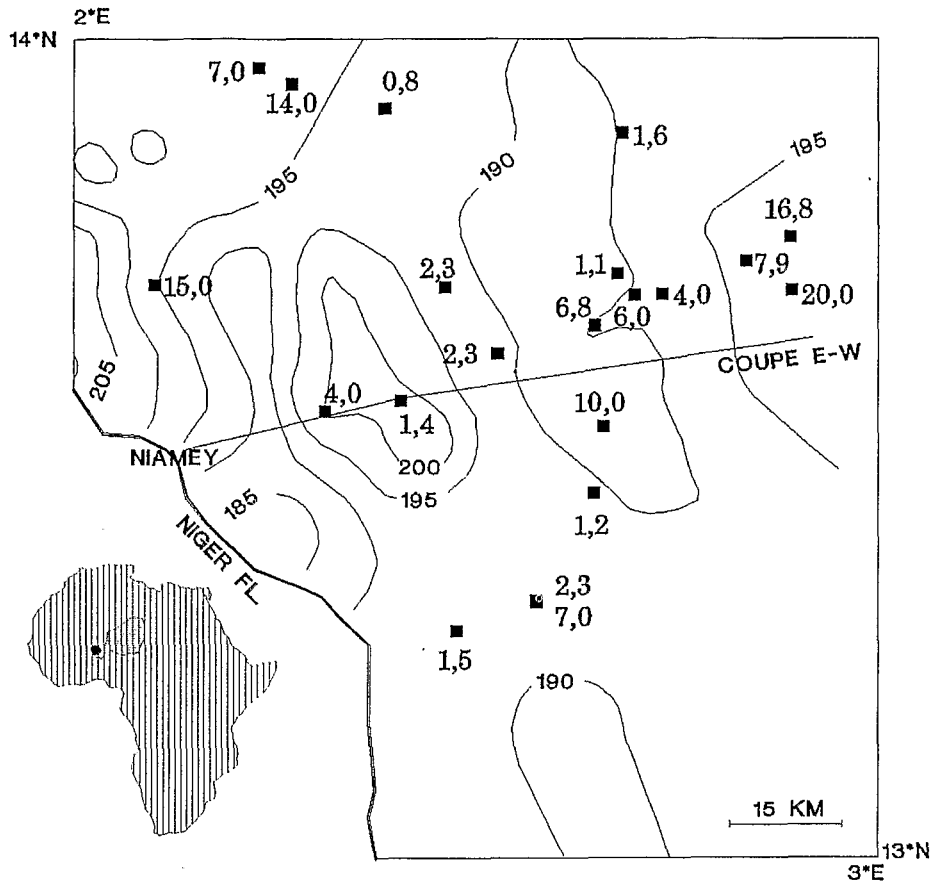


Fig. 1 Nappe phréatique du degré de Niamey : carte piézométrique de juin 1994 (isopièzes tous les 5 m), teneurs en tritium (en UT) et trace de la coupe E-W.

Water-table in the Niamey degree square: state in June 1994 (curve every 5 m), tritium content (in TU) and location of the east-west cross-section.

directement sur le substratum métamorphique, et s'accroissant progressivement vers l'Est, où le socle est à plus de 150 m de profondeur. La nappe est à une profondeur variant entre presque 0 m (en bordure orientale du degré carré dans le dallol Bosso, très grande vallée fossile) et 75 m (sous les plateaux latéritiques) ; la médiane est de 35 m (fig. 2). Le gradient hydraulique est variable, souvent très faible (parfois moins de 4.10^{-4}). Il n'y a pas de direction privilégiée des écoulements ; les principales exportations d'eau en dehors du degré carré de Niamey se produisent vers le SE ou par des sources se déversant vers le fleuve Niger. Pour une description détaillée de l'hydrodynamique de la nappe phréatique et des processus de sa recharge, on se reportera, entre autres, à Leduc *et al.* (1996) et Desconnets *et al.* (1996).

Grâce à la faiblesse de l'infiltration en zone sahélienne, il est encore possible d'uti-

liser le tritium comme indicateur de l'âge des eaux, aussi bien en zone non saturée (par exemple Aranyossi et Gaye, 1992) que dans la nappe phréatique. Dans la région de Niamey, les teneurs en tritium de la nappe phréatique font apparaître une importante hétérogénéité (fig. 1), témoignage de l'hétérogénéité de la recharge, et permettent une estimation du taux de renouvellement, à comparer avec les calculs basés sur les observations hydrodynamiques.

2. LES TENEURS EN TRITIUM DES PLUIES ET DE LA NAPPE

Il n'existe pas de mesure régulière des teneurs en tritium de la pluie au Niger. Une chronique a donc été reconstituée (fig. 3) par corrélation avec les moyennes annuelles pondérées des stations proches (Bamako au Mali et N'Djamena au Tchad pour la période 1963-1979) ou disposant de séries longues

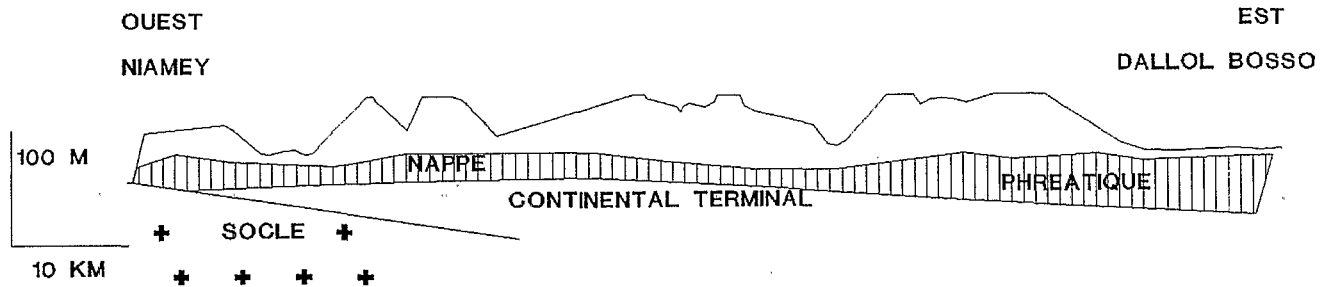


Fig. 2 Coupe E-W du Continental Terminal (mur et niveau piézométrique de la nappe phréatique).

East-west section in the Continental Terminal (water table and aquifer bottom).

(Ottawa au Canada entre 1953 et 1994). Ces valeurs sont extraites de AIEA, 1992. Pour les années précédant 1953, un bruit de fond uniforme de 5 UT a été retenu. La forme de la décroissance depuis 1980, principale incertitude de la reconstitution, est calée sur des prélèvements isolés dans la région de Niamey (8,9 UT pour l'année 1989 d'après Girard, 1993 ; 5,4 et 6,7 UT pour les périodes du 25/7 au 11/8/94 et du 12/8 au 20/9/94) et tient compte des évolutions récentes observées dans le Sud algérien ou à Addis Abeba. L'impact de ces incertitudes sur les résultats du modèle sera discuté plus bas.

Les teneurs en tritium de la nappe phréatique varient entre 0,8 et 20 UT ; la médiane est de 4 UT et 40 % des mesures sont inférieures à 2,5. Une telle dispersion montre l'hétérogénéité du renouvellement de la nappe dans le degré carré de Niamey. Il n'y a pas de relation évidente entre teneur en tritium et profondeur de la nappe ou fluctuation piézométrique annuelle. Les trois mesures disponibles dans le dallo Bossou, en bordure orientale du degré carré où l'eau est très proche de la surface, sont toutes beaucoup plus fortes que la médiane ; cela confirme la singularité hydrochimique de ce secteur, sans qu'une explication précise ne puisse être proposée.

3. LE MODÈLE D'ÉVOLUTION DU TRITIUM DANS LA NAPPE

La teneur moyenne en tritium dans la nappe au cours de l'année i est calculée par :

$$An_i = (1 - Tr_i) * An_{i-1} * e^{-Ln2/T} + Tr_i * Ap_i$$

avec Tr_i le taux de renouvellement de la nappe pour l'année i , An_{i-1} la teneur en tri-

tium de la nappe l'année $i-1$, T la période du tritium (12,3 ans), Ap_i la teneur en tritium de la pluie l'année i .

Le modèle suppose un faciès isotopique homogène sur toute l'épaisseur de la nappe ainsi qu'un stockage constant, c'est-à-dire un départ d'eau exactement compensé par une infiltration de pluie. Cette seconde hypothèse est maintenue pendant les années 70 et 80, où la baisse piézométrique provoquée par les multiples sécheresses est restée globalement faible au regard de l'épaisseur mouillée de l'aquifère. Par contre, le taux de renouvellement de la nappe Tr_i est variable selon les années pour tenir compte des fluctuations climatiques, puisque les années sèches participent bien moins à la recharge que les années normales ou excédentaires. La formule empirique retenue le fait dépendre de façon exponentielle de l'écart à la moyenne de la pluie annuelle à Niamey : $Tr_i = Tr_r * (Pi/Pm)^{1,5}$, avec Tr_r le taux de renouvellement de référence (moyenne des Tr_i sur la totalité de la période modélisée), Pi la pluviosité totale de l'année i , Pm la pluviosité moyenne annuelle (570 mm). Cette correction donne un Tr_i de l'année la plus pluvieuse, quatre fois plus fort que celui de l'année la plus sèche, pour la période 1953-1994.

Dans la figure 4, qui présente la teneur en tritium de la nappe en 1994 en fonction de Tr variant entre 0,25 et 30 %, la courbe « pondération n° 1 » montre les résultats de ce modèle. La coïncidence de pluviosité élevée et de forte activité radioactive au début des années 60 explique que le modèle fournisse des teneurs actuelles en tritium dans la nappe, plus fortes que le même modèle sans pondération des pluies ; cette augmentation n'est pas sensible pour les valeurs extrêmes de Tr .

Différents tests de sensibilité ont été effectués. La valeur précise de l'activité en ^3H avant le début des essais nucléaires a peu d'importance : une augmentation de l'activité avant 1953, 20 UT au lieu de 5 (ces deux valeurs sont les extrêmes couramment citées dans la littérature), provoque un accroissement en 1994 inférieur ou égal à 0,3 UT, nul si le taux de renouvellement de référence dépasse 8 %. Une variation d'un cinquième de l'activité de 1963, l'année la plus riche en ^3H , amène une variation maximale dans l'aquifère de 0,6 UT (pour un renouvellement de 1 à 4 %). Une augmentation de 20 % de la teneur en ^3H de la pluie sur la période 1979-1993, dont la reconstitution est la plus hypothétique, induit une variation de 0,1 à 1,1 UT, supérieure à 0,5 UT pour les Tr dépassant 2 %.

Un deuxième type de pondération par les pluies a été testé : on remplace Tr_* $(P_i/P_m)^{1,5}$ par $Tr_* (P_i - P_s)/(P_m - P_s)$, avec P_s le seuil de pluie annuelle en dessous duquel l'infiltration serait nulle, estimé empiriquement à la station de Wankama à 320 mm. Cette correction accentue l'amplitude des Tr_* . On obtient alors une augmentation de 0,1 à 1,2 UT, maximale pour des Tr de référence entre 4 et 10 %.

Dans la figure 4, la courbe « pondération n° 2 » cumule les augmentations de teneur en tritium en 1994 dans la nappe, dues à ce deuxième type de pondération et à une augmentation de 20 % des activités des pluies de la période 1979-1993. La courbe « sans pondération » présente les résultats en prenant un Tr_i invariant sur toute la période, donc égal au Tr de référence.

Pour les faibles taux de renouvellement, le modèle apparaît donc assez peu sensible aux incertitudes sur les conditions initiales ou hypothèses de calcul (reconstitution des chroniques de tritium dans la pluie à Niamey, part de l'infiltration dans la pluie annuelle).

4. DISCUSSION

Les études récentes sur les pluies sahéliennes, par exemple Taupin *et al.* (1993), ont souligné leur très forte variabilité dans le

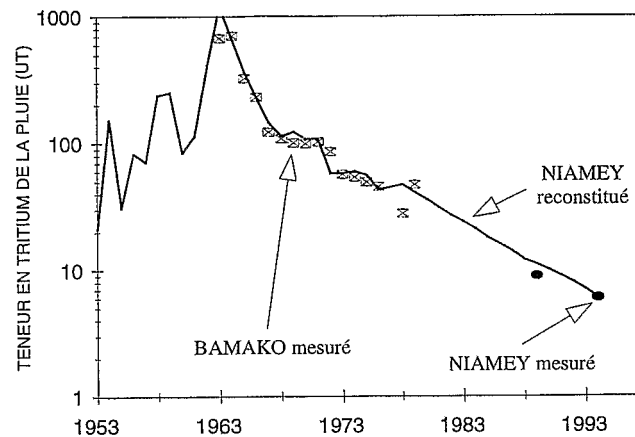


Fig. 3 Reconstitution des teneurs en tritium des pluies à Niamey.

Reconstructed rainfall tritium content in Niamey.

temps et l'espace, comme l'illustrent une pluviosité annuelle variant du simple au double sur 30 km en 1991 dans le Sud de la zone Hapex-Sahel, ou bien encore les totaux extrêmes à Niamey de 281 mm en 1915 et 939 mm en 1909. Idéalement, il faudrait connaître la distribution et l'intensité des pluies sur la totalité du degré carré depuis une quarantaine d'années, alors qu'on ne dispose pour les années anciennes que des mesures à Niamey et dans quelques postes en bordure du domaine d'étude. Cependant, la faiblesse des données peut être contournée, du fait de l'existence d'un lissage sur le long terme.

L'hypothèse de mélange immédiat de l'infiltration annuelle avec la masse d'eau déjà présente dans l'aquifère est justifiée par le type de réalimentation observé dans cette région. L'infiltration diffuse au travers d'une forte épaisseur de sol non-saturé est négligeable ; l'essentiel de la recharge de la nappe se produit par concentration des eaux de ruissellement dans les mares endoréiques ou les rares cours d'eau temporaires, puis infiltration très rapide au travers des berges non colmatées (Desconnets, 1994 ; Leduc *et al.*, 1996).

L'hypothèse d'homogénéité verticale du faciès isotopique de la nappe est justifiée par un indice d'absence ou de faiblesse de stratification dans la nappe : la concordance entre les analyses de tritium, provenant en quasi-totalité de puits qui n'exploitent que la partie superficielle de la nappe, et les analyses de ^{14}C , provenant presque exclusivement de

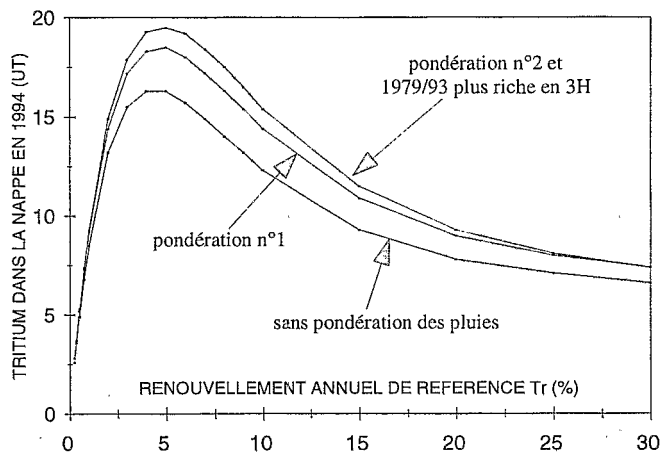


Fig. 4 Teneur en tritium de la nappe en 1994 en fonction du taux de renouvellement moyen.

Tritium content in the aquifer in 1994 depending on the mean renewal rate.

forages captant le milieu et la base de la nappe (ces dernières analyses seront détaillées dans une communication à venir).

Le modèle ne prend pas en compte les transferts horizontaux et les perturbations que pourraient provoquer des zones voisines à recharge sensiblement différente. Les observations hydrodynamiques justifient cette simplification : ainsi, la persistance de la dépression piézométrique fermée du degré carré (niveau inférieur à 190 m sur la carte 1) ne peut être expliquée que par un terme infiltration-évaporation négatif et une faiblesse des apports latéraux.

Dans tous les cas testés, la forme de la courbe modélisée (fig. 4) est inchangée et la sensibilité est généralement maximale pour des valeurs moyennes de Tr (2 à 8 %). Malgré les diverses incertitudes, le modèle est donc parfaitement exploitable. La principale leçon est la présence d'une forte hétérogénéité de l'infiltration, puisque les teneurs inférieures à 5 UT, soit la moitié des analyses, ne sont explicables que par des Tr très faibles (moins de 0,5 %), alors que la valeur la plus forte, 20 UT, implique un Tr d'environ 5 %. Il y a donc au moins un facteur 10 entre les Tr extrêmes.

Les teneurs comprises entre 5 et 10 UT correspondent, soit à des Tr faibles (0,5 à 1 %), soit à des Tr très forts (plus de 15 %). Au vu des observations piézométriques, de forts Tr ne seraient acceptables que ponctuellement et à proximité immédiate d'une mare ou d'un cours d'eau temporaire. Dans l'ensemble, les Tr ainsi calculés indiquent

donc un renouvellement faible de l'aquifère. Si l'on retient un Tr de 0,5 % (correspondant à la teneur médiane de 4 UT dans la nappe), une épaisseur mouillée de 30 m et une porosité utile de 15 %, on obtient une infiltration annuelle de 22,5 mm.

Le paysage des environs de Niamey est constitué d'une multitude de bassins versants superficiels endoréiques de petite taille (quelques kilomètres carrés). Malgré une apparente uniformité géologique, morphologique et hydrologique à grande échelle, la diversité des Tr s'explique par la variété des situations locales (changement de faciès des sédiments continentaux, occupation des sols par exemple). La dispersion des teneurs en 3H rappelle celle de la fluctuation piézométrique saisonnière dans les 250 puits régulièrement suivis (de 0 à 9 m avec une médiane d'environ 0,5 m) ; la hausse de la nappe en un point dépend d'abord des caractéristiques hydrodynamiques locales, ensuite de la distribution des pluies (plus significative que le total annuel). Le phénomène d'infiltration existe même pendant des années sèches de moins de 400 mm.

Le bilan hydrologique de quelques mares de la zone centrale du degré carré (Desconnets, 1994) aboutit à une recharge médiane d'environ 75 mm en 1992 et 65 mm en 1993, sans tenir compte de la distribution réelle des différents types de mares dans le paysage et des zones ne débouchant pas sur une mare. Dans la même zone, avec une porosité moyenne de 15 %, l'infiltration calculée à partir des fluctuations piézométriques (Leduc et Desconnets, 1994) est de 50 mm pour la pluvieuse année 1992 (670 mm au lieu de 570 mm en moyenne interannuelle), beaucoup plus faible pour 1993.

La différence entre ces trois estimations de la recharge annuelle peut s'expliquer notamment par la différence d'échelle d'observation temporelle : le bilan hydrologique est strictement annuel ; le mouvement piézométrique est la résultante d'une fluctuation annuelle et d'une évolution à moyen terme ; les isotopes sont le résultat d'un mélange sur quelques dizaines d'années, au cours desquelles les sécheresses répétées et la dégradation du couvert végétal ont large-

ment perturbé l'équilibre des ressources en eau souterraines. La comparaison entre les trois méthodes est donc handicapée par le manque d'observations des mares ou de la nappe sur une longue période. Les résultats sont cependant tout à fait cohérents.

5. CONCLUSION

Dans la nappe phréatique du Continental Terminal de la région de Niamey, la très forte hétérogénéité observée dans le comportement hydrodynamique et la composition chimique se retrouve également

dans la teneur en tritium (0,8 à 20 UT). D'après le modèle simple proposé, il existe au moins un facteur 10 entre les taux de renouvellement extrêmes (0,5 à 5 %).

La valeur médiane d'infiltration proposée pour la région de Niamey est d'environ 25 mm par an, donc légèrement plus faible mais cohérente avec les calculs par d'autres méthodes (bilan hydrologique, fluctuation piézométrique). Ce décalage s'explique par une échelle de temps différente dans les analyses. Ces résultats sont du même ordre de grandeur que les estimations proposées ailleurs en zone sahélienne en utilisant des approches variées.

Remerciements. Nous tenons à remercier le Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique de l'Université de Paris-sud, sous la direction de J.C. Fontes et G.M. Zuppi, et L. Araguas de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique à Vienne.

AIEA (Agence Internationale de l'Énergie Atomique), 1992. Statistical treatment of data on environmental isotopes in precipitation, Rapport technique n° 331, Vienne, 781 p.

ARANYOSSY, J.F. et GAYE, C.B., 1992. 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*, 315, série II, p. 637-643.

DESCONNETS, J.C., 1994. Caractérisation hydrologique de quelques systèmes endoréiques en milieu sahélien (degré carré d'Hapex-Sahel, Niger), *Thèse*, USTL Montpellier, 326 p.

DESCONNETS, J.C., TAUPIN, J.D., LEBEL, T. et LEDUC, C., 1996. Hydrology of the Hapex-Sahel central super-site: water drainage and aquifer recharge through the pool systems, *Journal of Hydrology*, (à paraître).

GIRARD, P., 1993. Techniques isotopiques (^{15}N , ^{18}O) appliquées à l'étude des nappes des altérites et du socle fracturé de l'Ouest africain. Étude de cas : l'Ouest du Niger, *Mémoire de doctorat*, Université du Québec à Montréal, 141 p.

GOUTORBE, J.P., LEBEL, T., TINGA, A., BESSEMOULIN, P., BROUWER, J., DOLMAN, A.J., ENGMAN, E.T., GASH, J.H.C., HOEPPFNER, M., KABAT, P., KERR, Y.H., MONTENY, B., PRINCE, S., SAID, F., SELLERS, P. et WALLACE, J.S., 1994. Hapex-Sahel: a large scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid tropics, *Ann. Geophysicae* 12, p. 53-64.

LEDUC, C. et DESCONNETS, J.C., 1994. Variability of groundwater recharge in Sahelian climate: piezometric survey of the Continental Terminal aquifer near Niamey (Niger). In : SOVERI, J. et SUOKKO, T., éd., *Future groundwater resources at risk*, IAHS Publ. n° 222, p. 505-511.

LEDUC, C., BROMLEY, J. et SCHROETER, P., 1996. Water table fluctuation and recharge in semi-arid climate: some results of the Hapex-Sahel hydrodynamic survey (Niger), *Journal of Hydrology* (à paraître).

TAUPIN, J.D., AMANI, A. et LEBEL, T., 1993. Small scale spatial variability of the annual rainfall in the Sahel. In : BOLLE, H. J., FEDDES, R. A. et KALMA, J., éd., *Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales*, IAHS Publ. 212, p. 593-602.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES