

Le déboisement : origine d'une hausse durable de la recharge et des nitrates en aquifère libre semi-aride (Sahel, Niger)

Deforestation, groundwater recharge and the origin of nitrate in a regional semiarid aquifer (Sahel, Niger)

Guillaume FAVREAU

UMR Hydrosociences – MSE, IRD (Institut de Recherche pour le Développement), 911 Avenue Agropolis, B.P. 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France
Tél. (33) 4 67 14 90 12 Fax (33) 4 67 14 47 74 E-mail guillaume.favreau@msem.univ-montp2.fr

Résumé

Au sud-ouest du Niger, un suivi de la nappe libre sur 8 000 km² a révélé une hausse de la piézométrie de 0,20 m.an⁻¹ sur la dernière décennie, et de plus de 3 m depuis les années 1950 (+10 % des réserves de l'aquifère). Cette hausse, en contradiction avec les sécheresses récentes au Sahel, apparaît corrélée avec le déboisement intense observé sur la zone d'étude. À partir de données radio-isotopiques (³H, ¹⁴C), l'augmentation de la recharge est estimée d'un facteur 10, de moins de 5 mm.an⁻¹ en 1950-1960 à plus de 20 mm.an⁻¹ aujourd'hui. En parallèle, 25 % des sites échantillonnés présentent des teneurs en nitrate supérieures aux normes OMS (44 mg.L⁻¹). L'origine de ces nitrates a été déterminée par analyse du δ¹⁵N. Les valeurs obtenues (80 % entre +2 et +8 ‰ vs air) sont typiques des sols semi-arides mais largement inférieures à la gamme des déjections naturelles (> +10 ‰). En l'absence d'usage d'engrais, ces données suggèrent qu'une rupture du cycle de l'azote des sols déboisés est à l'origine des fortes teneurs en nitrate de la nappe.

Mots-clés : Niger ; nappe libre ; recharge naturelle ; nitrates ; changement global ; milieu semi-aride.

Abstract

To the south west of Niger, a record of the free-water table over 8000 km² revealed a 0.20 m.yr⁻¹ rise of the piezometry during the last decade, and of more than 3 m since the 1950s (+ 10% of the aquifer reserves). This increase, in contradiction with the recent droughts in Sahel, seems to correlate with intense deforestation observed in the study area. From radio-isotopic data (³H, ¹⁴C) the recharge increase is estimated a factor 10, from less than 5 mm.yr⁻¹ in 1950-1960 to more than 20 mm.yr⁻¹ at present. At the same time, 25 % of the sites sampled have nitrate contents above the HWO norms (44 mg.L⁻¹). The origin of these nitrates has been determined by analysis of the δ¹⁵N. The values (80 % between + 2 and + 8 ‰ Vs air) are typical of semiarid soils but largely lower than the range of natural ejecta (> + 10 ‰). When no fertiliser is used, these data suggest a rupture of the soil nitrogen cycle in deforested areas is the origin of high nitrate contents of the water table.

Key words: Niger; free-water table; natural recharge; nitrates; global change; semiarid environment.

1. INTRODUCTION

L'évolution des ressources en eau est liée aux fluctuations climatiques, mais aussi aux changements de l'environnement, l'importance relative de ces deux facteurs dépendant de l'échelle de temps considérée. Au Sahel sub-saharien comme ailleurs en Afrique, les dernières décennies ont été marquées par des sécheresses récurrentes et par un rapide accroissement de la population, ces deux facteurs ayant une influence marquée sur l'environnement. Notre étude de la nappe phréatique près de Niamey (Fig. 1) est basée sur un grand nombre de données hydrodynamiques (piézométrie) et géochimiques (isotopes). L'estimation de la recharge de la nappe

1. INTRODUCTION

The water resources evolution is related to climate fluctuations, and environmental changes too. The relative importance of these two factors depends on the time scale considered. In the sub-saharan Sahel like elsewhere in Africa, previous decades have been marked by recurring droughts and a rapid population increase; these two factors strongly influence the environment.

Our study of the groundwater table near Niamey (Fig. 1) is based on a large number of hydrodynamic (piezometry) and geochemical (isotopes) data. The object of this article is the estimation of the water table recharge and its evolution over the last decades; in

et de son évolution sur les dernières décennies constitue l'objet de cet article ; en complément est abordé un nouveau développement de nos recherches, concernant l'origine de fortes teneurs en nitrates de la nappe.

addition a new development of our research concerning the origin of high nitrate contents of the water table is discussed.

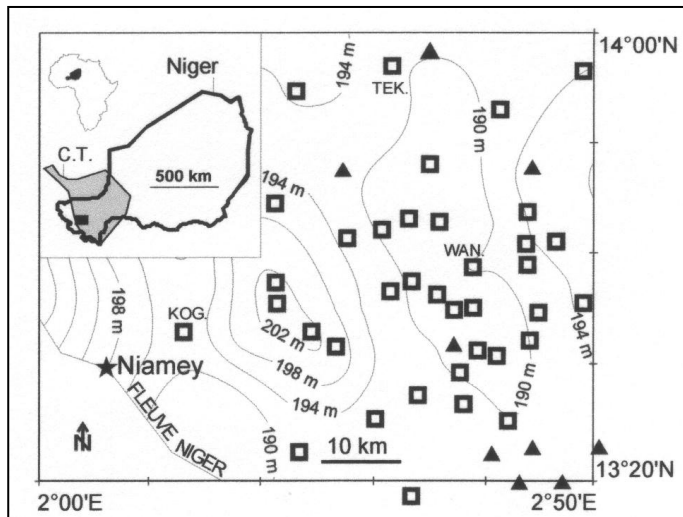


Fig. 1 – Localisation de la zone d'étude et délimitation des affleurements du Continental Terminal (CT, en encart) et carte piézométrique en 1998 de la nappe libre.

Puits (□) et forages (▲) échantillonnés. WAN : Wankama (cf. Fig. 2). KOG : Kogorou ; TEK: Teko Baba Kouara (cf. Fig. 3).

Fig. 1 – Location of the study zone and delimitation of the Continental Terminal (CT, in the insert) outcrops and 1998 piezometric map of the free-water table.

Wells (□) and bore holes (▲) sampled. WAN: Wankama (see Fig. 2). KOG: Kogorou; TEK: Teko Baba Kouara (see Fig. 3).

2. LE MILIEU D'ÉTUDE

La zone d'étude se situe en limite sud-ouest de l'aquifère du Continental Terminal, une formation sédimentaire tertiaire qui s'étend sur 150 000 km² au Niger (Fig. 1). Le fleuve Niger, seul cours d'eau permanent, érode le socle et constitue l'exutoire naturel de la nappe. Le paysage présente l'aspect d'une succession monotone de plateaux latéritiques et de vallées ensablées, le dénivelé n'excédant pas 100 m ; la végétation naturelle consiste en une savane boisée, mais la plupart du paysage est aujourd'hui une mosaïque de jachère et de champs de mil. Le climat, semi-aride, se caractérise par une température moyenne de 29°C et une évapotranspiration potentielle de 2700 mm.an⁻¹ ; la courte saison des pluies cumule entre juin et septembre 90 % des 560 mm de pluie annuelle. Le réseau hydrographique s'organise autour d'une multitude de petits bassins versants endoréiques, de l'ordre du km² (Desconnets *et al.*, 1997). Pendant la saison des pluies, le ruissellement consécutif aux intenses précipitations se concentre dans des bas-fonds et crée des mares temporaires, toujours en position perchée par rapport à la nappe ; la vidange rapide de ces mares par infiltration représente l'essentiel de la recharge de la nappe (Fig. 2).

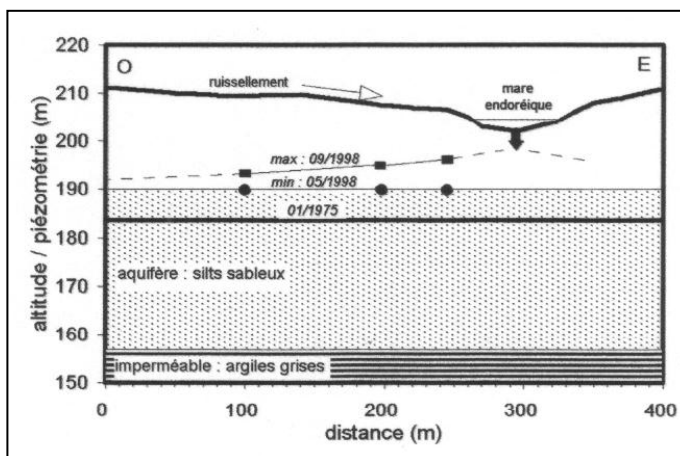
2. STUDY ENVIRONMENT

The studied area is situated at the south west boundary of the Continental Terminal aquifer, a Tertiary sedimentary formation that covers 150,000 km² in Niger (Fig. 1). The river Niger, the only permanent watercourse, erodes the basement and constitutes the natural outlet of the water table.

*The landscape looks like a featureless succession of lateritic plateaux and infilled valleys. The relief does not exceed 100 m. The natural vegetation comprises forested savannah, but most of the landscape is now a mosaic of fallows and millet fields. The semiarid climate is characterised by a mean temperature of 29°C and a potential evapotranspiration of 2700 mm.yr⁻¹. The short rainy season accumulates 90 % of the 560 mm of annual rain between June and September. The river pattern is organised around multiple endorheic catchment areas, of the order of the km² (Desconnets *et al.*, 1997). During the rainy season, the runoff following the intense precipitation is concentrated in depressions and creates temporary ponds, always higher compared to the water table. The rapid drainage of these ponds by infiltration represents the essential recharge of the water table (Fig. 2).*

Fig. 2 – Coupe de la recharge à partir de la mare endoréique de Wankama (localisation Fig. 1). Enregistrements du dôme piézométrique saisonnier (1998) et augmentation des réserves de l'aquifère depuis 01/1975.

Fig. 2 – Recharge section from Wankana endorheic pond (location Fig. 1). Records of the seasonal piezometric dome (1998) and increase of the aquifer reserves since 01/1975.



A l'échelle de la zone d'étude, les gradients hydrauliques de la nappe sont faibles (<1‰) et il n'existe pas de direction d'écoulement privilégiée. La profondeur moyenne de la nappe est proche de 35 m, pour une épaisseur saturée moyenne de 30 m. La géochimie de la nappe est simple (Favreau, 2000) : la température moyenne est de l'ordre de 30°C, l'eau de la nappe est acide (pH entre 5.0 et 6.0), et circule en milieu oxydant (Eh entre +300 et +500 mV). La masse dissoute totale est faible (médiane de 50 mg.L⁻¹), de faciès nitraté à bicarbonaté, sodique à calcique, en accord avec la nature silicatée et dépourvue de carbonate de l'aquifère. Deux aquifères captifs existent en profondeur dans le bassin mais les données hydrodynamiques et géochimiques n'indiquent aucune drainance avec la nappe libre étudiée.

3. HYDRODYNAMIQUE

Depuis 1991, plus de 15 000 mesures piézométriques ponctuelles ont été effectuées sur près de 150 puits ou piézomètres, à une fréquence bimensuelle ou mensuelle ; sept enregistreurs complètent le réseau. La représentativité des mesures a été discutée in Favreau *et al.* (2000) ; l'influence des puisages sur le niveau statique n'excède pas 2,5 m tandis que les fluctuations naturelles de la nappe peuvent atteindre 6 m d'amplitude (e.g. Fig. 2). La seconde partie des données consiste en une centaine de mesures datant des années 1950-60 (e.g. Boeckh, 1965). La principale difficulté concernant ces mesures consiste à les connecter aux chroniques actuelles. Les dates exactes et la localisation des ouvrages ont été vérifiées dans les fiches de visite originales archivées au Ministère de l'Hydraulique du Niger. Certaines incertitudes possibles, comme des changements dans la hauteur du référentiel, ont été vérifiées par des enquêtes de terrain.

At the studied area scale, the hydraulic gradients of the water table are low (<1 ‰) and there is no preferred flow direction. The average water table depth is about 35 m, for an average saturated thickness of 30 m. The water table geochemistry is simple (Favreau, 2000): the mean temperature is about 30°C, the water is acid (pH between 5.0 and 6.0), and circulates in oxidising environment (Eh between +300 and +500 mV). The total dissolved mass is low (median is 50 mg.L⁻¹) and its facies can be nitrated to bicarbonated or sodic to calcic and agrees with the silicated nature of the aquifer without any carbonates. Two confined aquifers exist at depth in the basin but the hydrodynamic and geochemical data do not indicate any drainage of the free-water table studied.

3. HYDRODYNAMICS

Since 1991, more than 15,000 piezometric point measurements have been taken at about 150 wells or piezometers on a monthly to bi-monthly basis. Seven recorders complete the network. The measurement representativeness has been discussed in Favreau *et al.* (2000). The effect of drawing water on the standing water level does not exceed 2.5 m whereas the magnitude of the water table natural fluctuations can reach 6 m (e.g. Fig. 2). The second part of the data comprises about a hundred measurements from 1950-60 (e.g. Boeckh, 1965). The main difficulty concerning these measurements is to relate them to the present data. The exact dates and locations of the works have been checked in the original records archived at the Hydraulics Ministry of Niger. Some possible uncertainties, such as changes in the referential height, have been verified during on-site surveys.

31. Hausse du niveau de la nappe

La comparaison des mesures anciennes et des chroniques récentes montre une hausse systématique du niveau de la nappe (Fig. 3), de 1 à 12 m selon les sites. La hausse moyenne du niveau de la nappe atteint 3,5 m en 1998 (Fig. 4-c), soit une hausse des réserves de l'aquifère de plus de 10 %. Au cours des années 1980-1990, la hausse piézométrique, localement comprise entre 0,05 et 0,45 m.an⁻¹ (moyenne de 0,20 m.an⁻¹) s'est accélérée (e.g. Fig. 3). L'intensité de la hausse interannuelle n'apparaît pas liée à la proximité d'une zone de recharge ni à la cote piézométrique, mais plutôt à la porosité et/ou à la transmissivité de l'aquifère (Leduc *et al.*, 2001).

31. Water table level rise

The comparison of old measurements and recent data shows a systematic rise of the water table level (Fig. 3) from 1 to 12 m according to the site. The average water table rise was 3.5 m in 1998 (Fig. 4-c), representing a 10 % + increase in the aquifer. During the period 1980-1990, the piezometric increase, locally between 0.05 and 0.45 m.yr⁻¹ (with a mean of 0.20 m.yr⁻¹), has accelerated (e.g. Fig. 3). The intensity of the inter-annual increase doesn't seem related to the closeness of a recharge zone or to the piezometric reading, but rather to the porosity and/or the aquifer transmissivity (Leduc *et al.*, 2001).

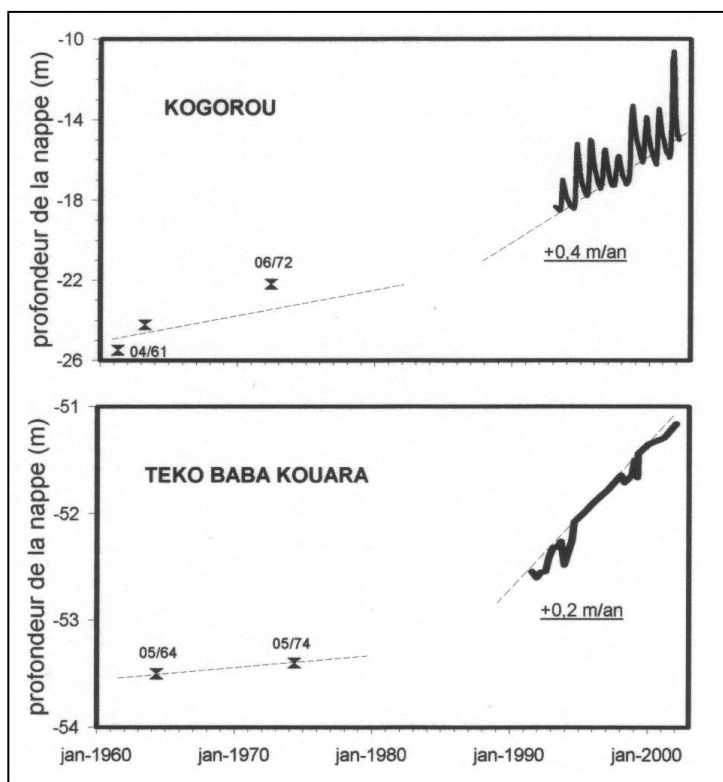


Fig. 3 – Exemples de fluctuations piézométriques de la nappe libre depuis 1960 : mesures aux puits de Kogorou et Teko Baba Kouara (localisations Fig. 1).

Fig. 3 – Examples of the free-water table piezometric fluctuations since 1960: measurements at Kogorou and Teko Baba Kouara wells (locations Fig. 1).

Certaines explications de la hausse de la nappe peuvent être exclues. Contrairement à d'autres milieux sahéliens (e.g. Valenza *et al.*, 2000), il n'existe pas de recharge artificielle due à l'irrigation. Les flux non maîtrisés de forages artésiens sont rares et la hausse de la nappe a souvent débuté avant leur foration. Une décroissance des pompages doit aussi être écartée, en raison de la croissance démographique importante (+4 %.an⁻¹ depuis 1950). Une première explication pourrait résider dans les fluctuations pluviométriques. Cependant, la chute de pluviométrie de 20 % entre les décennies 1950-1970 et 1970-1980 (Fig. 4-a) s'accompagne au contraire d'une hausse piézométrique.

Some explanations for the increase of the water table can be excluded. Unlike other sahelian environments (e.g. Valenza *et al.*, 2000), there is no artificial recharge due to irrigation. The artesian bore hole uncontrolled fluxes are rare and the increase of the water table often started before they were drilled. A decrease of the pumpages must also be excluded, because of the important demographic increase (+ 4 %.yr⁻¹ since 1950). A first explanation could come from the pluviometric fluctuations. However, the 20 % decrease in pluviometry between 1950-1970 and 1970-1980 (Fig. 4-a) is accompanied by a piezometric increase.

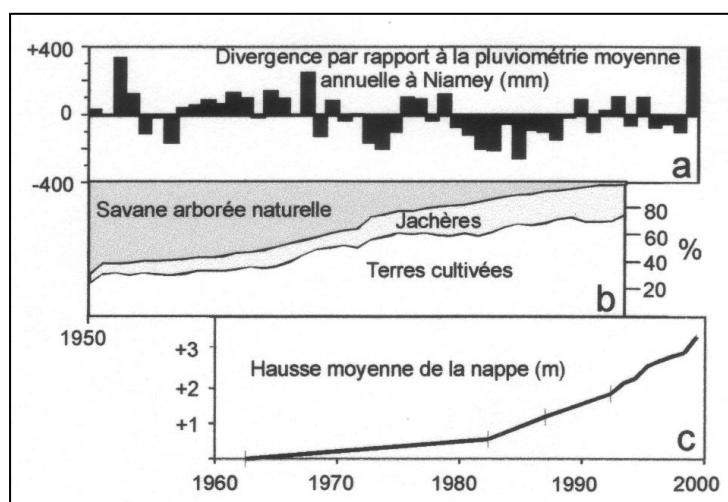


Fig. 4 – Evolutions comparées depuis 1950-60 de la pluviométrie (4-a ; moyenne de 567 mm.an⁻¹), de l'occupation des sols (4-b ; hors plateaux latéritiques, soit 75 % du paysage) et du niveau moyen de la nappe libre (4-c ; calculés sur plus de 50 points).

Fig. 4 – Pluviometry (4-a ; average of 567 mm.yr⁻¹), zoning regulations (4-b ; except lateritic plateaux, i.e. 75 % of the landscape) and free-water table mean level (4-c ; calculated from more than 50 points) compared trends since 1950-60.

Une deuxième explication réside dans le changement observé du couvert végétal. Depuis 1950, le déboisement s'est accéléré (Fig. 4-b) : la part des champs cultivés et des jachères est passée de 27 % à près de 100 % des terres cultivables et la savane arborée naturelle a quasiment disparu (Loireau, 1998). Une conséquence directe est la réduction des prélèvements racinaires dans la nappe ; cependant, en raison de l'épaisseur de la zone non-saturée (35 m en moyenne), l'impact de cette réduction sur le bilan de la nappe est probablement négligeable. Parce que la recharge est principalement indirecte, l'hypothèse la plus crédible est que le déboisement a augmenté le ruissellement et donc le volume d'eau de surface accumulé dans les bas-fonds endoréiques, et a donc accru la recharge indirecte à la nappe (Leduc *et al.*, 2001). De telles augmentations du ruissellement et de l'érosion suite au déboisement sont notées ailleurs au Sahel (e.g. Valentin, 1994).

32. Estimations hydrodynamiques de la recharge

Une première estimation de la recharge actuelle est fournie par la hausse moyenne de la nappe sur la dernière décennie. En estimant la porosité totale de l'ordre de 10 à 25 %, la hausse moyenne interannuelle de 0,20 m.an⁻¹ traduit un excès de recharge de 20 à 50 mm.an⁻¹. Ces chiffres sont en accord avec des estimations antérieures basées sur le bilan hydrologique de petits bassins endoréiques de la zone d'étude, où la recharge de la nappe est estimée de 10 à 80 mm.an⁻¹ en fonction des années et des bassins considérés.

L'existence d'une dépression piézométrique naturelle au centre de la zone d'étude (Fig. 1, équipotentielle 190 m) permet une deuxième estimation des flux de recharge. Au Sahel, les dépressions piézométriques sont des structures fréquentes, généralement expliquées par un bilan de l'aquifère localement déficitaire, i.e. une re-

A second explanation is found in the change of the vegetation cover. Since 1950, deforestation accelerated (Fig. 4-b): the proportion of cultivated fields and fallows increased from 27 % to about 100 % of the arable land and the natural wooded savannah almost disappeared (Loireau, 1998). A direct consequence is the reduction of the root sampling from the water table. However, because of the thickness of the non-saturated zone (35 m in average), the impact of this reduction on the water table balance is negligible. Since the recharge is mostly indirect, the most likely hypothesis is that deforestation increased the runoff as well as the surface water volume accumulated in the endorheic depressions, therefore increasing the indirect recharge (Leduc *et al.*, 2001). Such increase of runoff and erosion following deforestation are found elsewhere in Sahel (e.g. Valentin, 1994).

32. Recharge hydrodynamic estimates

A first estimate of the present recharge is given by the mean water table rise over the last decade. Assuming the total porosity is about 10 to 25 %, the mean inter-annual increase of 0.20 m.yr⁻¹ shows an excess recharge from 20 to 50 mm.yr⁻¹.

These figures agree with previous estimates based on the hydrological balance of the studied area small endorheic basins where the water table recharge is estimated from 10 to 80 mm.yr⁻¹ depending on the year and basins considered.

The existing natural piezometric depression in the middle of the studied area (Fig. 1, 190 m equipotential) allows a second estimate of the recharge flux. In Sahel, the piezometric depressions are common structures, generally explained by a local deficit (exfiltration exceeds recharge) in the aquifer balance. At the studied area, the

charge plus faible que l'exfiltration. Sur la zone d'étude, la dépression piézométrique est actuellement en hausse (Favreau *et al.*, 2002-b) mais était proche de l'équilibre – comme l'ensemble de la nappe – dans les années 1960 (Fig. 4-c). Une modélisation numérique en régime permanent suggère que la recharge régionale était alors de l'ordre de 1 à 5 mm.an⁻¹, d'un ordre de grandeur inférieur aux estimations de la recharge actuelle.

4. GÉOCHIMIE ISOTOPIQUE

Une trentaine d'échantillons d'eau ont été prélevés dans des puits et forages de 1993 à 1998 pour analyse radio-isotopique du tritium (³H, période 12,43 ans) et du Carbone Inorganique Dissous (¹⁴C, période 5730 ans). En 2001, une mission complémentaire a été réalisée pour analyse du δ¹⁵N des nitrates dissous d'une vingtaine d'échantillons de la nappe. Pour les puits ouverts sur l'atmosphère, le volume de la colonne d'eau a été renouvelé trois fois avant échantillonnage pour obtenir une eau représentative de l'aquifère (Favreau *et al.*, 2000).

41. Estimations radio-isotopiques de la recharge (³H, ¹⁴C)

Sur la zone d'étude, les teneurs en tritium sont faibles (<5 UT) et inférieures au seuil de détection dans 60 % des cas. En prenant en compte l'ensemble des analyses, la moyenne des teneurs est inférieure à 2,1 UT. Les activités en ¹⁴C des eaux de la nappe varient de 60,4 à 97,1 pCm (% de carbone moderne), pour une valeur moyenne de 83,4 pCm. En raison de l'origine pédologique du CID (absence totale de carbonate dans l'aquifère), les activités ¹⁴C sont considérées représentatives du temps de résidence dans l'aquifère. Pour ces deux traceurs, il n'existe aucune différence statistique entre les valeurs obtenues sur des puits (premiers mètres saturés de l'aquifère) ou des forages (crépinés à différentes profondeurs sous le niveau statique) ; cette observation est en accord avec le processus de recharge localisé et massif, identifié par hydrodynamique (Fig. 2). En conséquence, le taux de renouvellement de l'aquifère est estimé à l'aide d'un modèle analytique simple, supposant un bon mélange vertical des eaux de la nappe (Favreau *et al.*, 2002-a) :

$$\frac{d}{dt}(CV) = R.C_r - Q.C - \lambda.C.V$$

où C l'activité radio-isotopique (³H ou ¹⁴C) mesurée dans la nappe, V est le volume saturé de l'aquifère (L³), R et Q respectivement la recharge et la décharge de l'aquifère (L³.T⁻¹), Cr la concentration atmosphérique

piezometric depression is now increasing (Favreau et al., 2002-b) but was close to equilibrium – as the whole of the water table – in the 1960s (Fig. 4-c). Numerical modelling, in steady-state regime conditions, suggests that the regional recharge was then of the order of 1 to 5 mm.yr⁻¹, one order of magnitude lower than the present recharge estimates.

4. ISOTOPIC GEOCHEMISTRY

About thirty water samples were taken from wells and bore holes from 1993 to 1998 for radio-isotopic analysis of tritium (³H, 12.43 years period) and Dissolved Organic Carbon (¹⁴C, 5730 years period). In 2001, a complementary mission was done for analysis of the dissolved nitrates δ¹⁵N in about twenty water table samples. For the open wells, the water column volume was renewed three times before sampling in order to obtain water representative of the aquifer (Favreau et al., 2000).

41. Recharge radio-isotopic estimates (³H, ¹⁴C)

At the study zone, the tritium ratios are low (< 5 UT) and below the detection limit in 60 % of the cases. Taking into account the whole of the analyses, the mean ratio is lower than 2.1 UT. The water ¹⁴C activities vary between 60.4 and 97.1 pmC (% of modern carbon), for an average value of 83.4 pmC. Because of the pedologic origin of the DOC (total absence of carbonate in the aquifer), the ¹⁴C activities are considered to be representative of the residence times in the aquifer. For these two tracers, there is no statistical difference between the values obtained from wells (first saturated meters of the aquifer) or bore holes (at different depths below the standing level). This observation agrees with the hydrodynamically identified regional and localised recharge process (Fig. 2).

As a consequence, the aquifer renewal rate is estimated using a simple analytical model, assuming good vertical mixing of the water table (Favreau et al., 2002-a):

where the radio-isotope activity, C (³H or ¹⁴C), is measured in the water table, V is the saturated volume of the aquifer (L³), R and Q are the aquifer recharge and discharge respectively (L³.T⁻¹); Cr represents the tracer

du traceur, et λ la constante de décroissance radio-isotopique ($5,58.10^{-2}.an^{-1}$ pour 3H , $1,21.10^{-4}.an^{-1}$ pour ^{14}C).

Une explication détaillée du modèle, ainsi que la description des chroniques atmosphériques (Cr) en 3H et ^{14}C reconstituées pour le Niger sont disponibles in Favreau *et al.* (2002-a).

Une première approche utilisée pour estimer le taux de renouvellement de l'aquifère est de considérer chaque point analytique séparément. Pour un modèle d'augmentation des réserves de 10 % depuis 1950, les couples $^3H/^{14}C$ indiquent une gamme de taux de renouvellement comprise entre 0,02 % et 0,20 %.

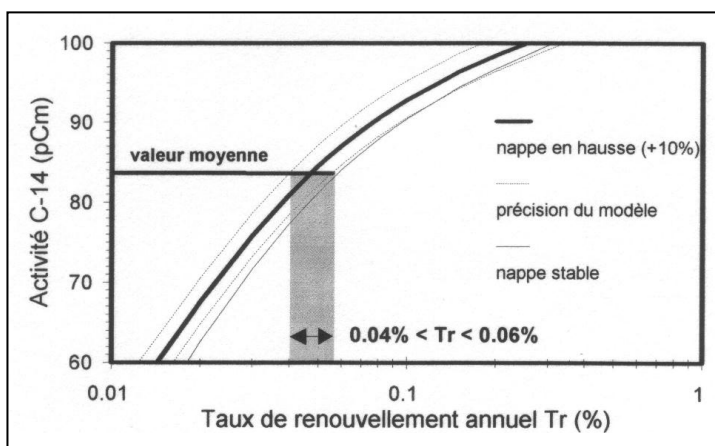
atmospheric concentration, and λ is the radio-isotope decrease constant ($5.58.10^{-2}.yr^{-1}$ for 3H , $1.21.10^{-4}.yr^{-1}$ for ^{14}C).

A detailed explanation of the model as well as the description of the 3H and ^{14}C atmospheric records (Cr) reconstituted for Niger are available in Favreau *et al.* (2002-a).

A first approach to estimate the aquifer renewal rate is to consider each analytical point separately. The model suggests that for a 10 % increase of the reserves since 1950, the $^3H/^{14}C$ couples show a renewal rate range between 0.02 % and 0.20 %.

Fig. 5 – Taux de renouvellement annuel moyen de l'aquifère déduit de l'activité moyenne en ^{14}C de la nappe, modélisé à partir d'une chronique atmosphérique en ^{14}C reconstituée au Niger et pour une augmentation des réserves de l'aquifère de 10 % depuis 1950.

Fig. 5 – Mean aquifer annual renewal rate inferred from the mean water table ^{14}C activity, modelled from a reconstituted atmospheric ^{14}C record in Niger and for a 10 % increase of the aquifer reserves since 1950.



Une deuxième approche consiste à prendre en compte les paramètres moyens de l'aquifère pour déterminer un taux de renouvellement régional, représentatif de l'ensemble de l'aquifère.

Pour un modèle de hausse des réserves de 10 % depuis 1950, le taux de renouvellement en 1950 est proche de 0,05 % pour la moyenne des activités ^{14}C (Fig. 5) et inférieure à 0,20 % pour la moyenne des teneurs en tritium (<2,1 UT). Les résultats obtenus par la méthode du 3H apparaissent très sensibles aux incertitudes du modèle (chronique atmosphérique, hausse de la nappe) et ne fournissent qu'une limite supérieure au taux de renouvellement de l'aquifère. En raison de sa période plus élevée (5730 ans), le ^{14}C fournit des estimations plus précises, avec une gamme du taux de renouvellement annuel entre 0,04 et 0,06 % pour la moyenne des teneurs de la nappe (Fig. 5). Pour les paramètres représentatifs de l'aquifère (épaisseur saturée de 30 m, porosité totale estimée de 10 à 25 %), cette gamme de taux de renouvellement équivaut à un taux de recharge en 1950 de 0,9 à 6,0 $mm.an^{-1}$. Pour les mêmes paramètres, la hausse récente de la nappe (0,20 $m.an^{-1}$) équivaut à une recharge d'au moins

A second approach considers looking at the mean aquifer parameters to determine a regional renewal rate that would represent the whole aquifer.

For a model considering a 10 % increase in the reserves since 1950, the renewal rate in 1950 is about 0.05 % for the average ^{14}C activity (Fig. 5) and lower than 0.20 % for the average tritium ratios (< 2.1 UT). The results obtained by the 3H method seem very sensitive to uncertainties in the model (atmospheric records, water table increase) and only give an upper limit of the aquifer renewal rates. Because of its longer period (5730 years), ^{14}C gives more precise estimates, with annual renewal rates ranging from 0.04 to 0.06 % for the average water table content (Fig. 5). If aquifer parameters (30 m saturated thickness, total porosity estimated from 10 to 25 %) are considered, this range of renewal rates corresponds to a recharge rate of 0.9 - 6.0 $mm.yr^{-1}$ in 1950. For the same parameters, the recent water table rise (0.20 $mm.yr^{-1}$) corresponds to a minimum recharge of 20 $mm.yr^{-1}$.

This difference is interpreted as a quantification of

20 mm.an⁻¹. Cette différence est interprétée comme une quantification de l'augmentation de la recharge de la nappe en réponse au déboisement.

42. Origine des nitrates (¹⁵N)

En parallèle à l'augmentation de la recharge, près de 25 % des sites échantillonnés pour analyse chimique montrent des teneurs en nitrate (NO₃⁻) supérieures à la norme OMS (44 mg.L⁻¹). Ces teneurs ont initialement été interprétées – comme souvent au Sahel – en termes de pollution anthropique. Cependant, l'usage des latrines est limité sur la zone d'étude (< 20 % des foyers) et l'usage d'engrais est quasi-inexistant. D'autres causes aux fortes teneurs en nitrate de la nappe doivent donc être recherchées.

Un premier indice tient dans la répartition spatiale des teneurs en nitrate de la nappe. Les points échantillonnés à proximité des aires de recharge (e.g. Fig. 2) montrent des teneurs élevées (médiane de 45 mg.L⁻¹), d'un ordre de grandeur supérieur aux points situés à distance (médiane de 5 mg.L⁻¹). La pollution des puits ne peut être tenue pour responsable de cette différence : l'entretien et l'usage des puits sont partout plus ou moins les mêmes. Un second indice tient dans l'existence de fortes fluctuations saisonnières des teneurs en nitrates de la nappe, concomitantes aux variations naturelles de la piézométrie, à proximité immédiate de mares endoréiques. De telles fluctuations, qui n'apparaissent pas dans la chimie des mares (Favreau, 2000) sont interprétées comme la conséquence du lessivage massif de l'azote des sols par les eaux d'infiltration (Elbaz-Poulichet *et al.*, 2002).

the water table recharge increase in response to deforestation.

42. Nitrates (¹⁵N) origin

Along with the recharge increase, about 25 % of the sample sites have nitrate (NO₃⁻) ratios higher than the HWO norm (44 mg.L⁻¹). These ratios are initially interpreted – as often in Sahel – in terms of anthropogenic pollution. However, the use of toilets is limited in the studied area (< 20 % of the homes) and almost no fertilisers are used. Other causes for the high nitrate contents of the water table have to be explored.

*A first approximation lies in the spatial repartition of the water table nitrate contents. The points sampled near recharge areas (e.g. Fig. 2) have high contents (median of 45 mg.L⁻¹), one order of magnitude higher than the distal points (median of 5mg.L⁻¹). Well pollution can not explain this difference: their maintenance and use are more or less the same everywhere. A second indication is found in the great seasonal fluctuations of the water table nitrate contents, corresponding to natural variations in piezometry, close to the endorheic ponds. Such fluctuations, that do not appear in the ponds' chemistry (Favreau, 2000), are interpreted as a consequence of the regional N leaching from soils through infiltration (Elbaz-Poulichet *et al.*, 2002).*

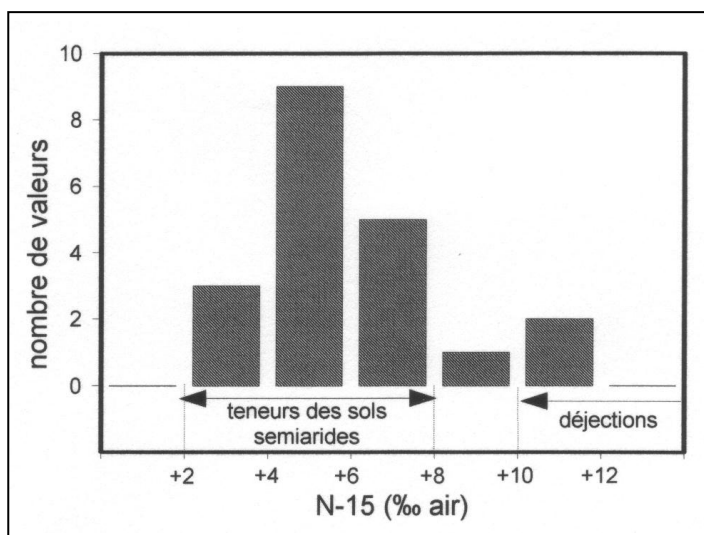


Fig. 6 – Histogramme des analyses δ¹⁵N des nitrates dissous dans la nappe pour 20 échantillons représentatifs de l'aquifère (2001).

Fig. 6 – Histogram of the water table dissolved nitrates δ¹⁵N analyses of 20 samples representing the aquifer (2001).

Pour tester cette hypothèse d'une origine pédologique des nitrates, l'analyse des teneurs en azote-15 ($\delta^{15}\text{N}$) d'une vingtaine de sites aux teneurs en NO_3^- comprises entre 0,5 et 150 mg.L^{-1} a été effectuée. Les teneurs élevées en oxygène dissous (> 50 % sat.) de l'eau de la nappe permettent de négliger l'impact de la dénitrification dans l'interprétation des résultats isotopiques. Les teneurs extrêmes mesurées sont de +2,1 et +11,7 ‰ vs air avec 80 % des valeurs comprises entre +4 et +8 ‰ (Fig. 6). Cette gamme est typique des sols semi-arides naturels (e.g. au Texas, +2 à +8 ‰, in Kreitler et Jones, 1975) mais largement inférieure à celle des déjections naturelles (e.g. à Niamey, +12 à +18 ‰, Girard et Hillaire-Marcel, 1997). Dans un milieu dépourvu d'engrais azoté industriel, ces analyses du $\delta^{15}\text{N}$ des nitrates de la nappe suggèrent donc, pour la première fois au Sahel, l'existence d'un impact anthropique indirect – le déboisement – comme origine vraisemblable à de fortes teneurs en nitrates en aquifère libre.

5. CONCLUSION

Au sud-ouest semi-aride du Niger, la surprenante hausse à long terme de la nappe phréatique traduit l'influence prépondérante, pour la recharge, d'une modification de l'environnement sur la variabilité climatique. La déforestation rapide a engendré une augmentation durable de la recharge, de l'ordre du mm.an^{-1} dans les années 1950-60 sous savane arborée dominante, à plus de 20 mm.an^{-1} actuellement. En corollaire, la rupture du cycle de l'azote dans les sols des bas-fonds endoréiques déboisés est à l'origine de teneurs élevées en nitrate dans la nappe. Ailleurs dans le monde, de telles estimations du changement des flux de recharge suite au déboisement n'ont été étudiées à notre connaissance qu'en Australie semi-aride (e.g. Allison *et al.*, 1990). Cependant, parce que (i) notre site d'étude au Niger est représentatif de beaucoup de milieux semi-arides, (ii) la déforestation est une constante au Sahel, de telles modifications qualitatives et quantitatives de la recharge consécutives au déboisement doivent être des processus fréquents, même s'ils ne sont pas encore bien documentés. Dans l'optique du développement durable, une meilleure connaissance de ce type de processus est éminemment souhaitable.

Remerciements

Cette étude a bénéficié du soutien du Programme National français de Recherche en Hydrologie. □

In order to test this hypothesis of a nitrates' pedologic origin, the analysis of the N-15 ($\delta^{15}\text{N}$) ratios of about twenty sites with contents ranging from 0.5 to 150 mg.L^{-1} has been done. The high dissolved oxygen content (> 50% sat.) of the water table removes the impact of denitrification with respect to the interpretation of isotopic results. The extreme measured contents are +2.1 and +11.7 ‰ Vs air with 80 % of the values between +4 and +8 ‰ (Fig. 6). This range is characteristic of natural semiarid soils (e.g. in Texas, +2 to +8 ‰, in Kreitler and Jones, 1975) but largely lower than those of natural ejecta (e.g. in Niamey, +12 to +18 ‰, Girard and Hillaire-Marcel, 1997). In an industrial N-fertiliser free environment, these $\delta^{15}\text{N}$ analyses of water table nitrates suggest that, for the first time in Sahel, an indirect anthropogenic impact – deforestation – exists and could be responsible for high nitrate contents in the free-water table.

5. CONCLUSION

*In the semiarid regions, south west of Niger, the surprising long-term rise of the water table shows the preponderant influence, in terms of recharge, of an environmental change on the climate variability. Rapid deforestation lead to a sustainable rise in recharge, from about 1 mm.yr^{-1} in 1950-60 under dominant wooded savannah to more than 20 mm.yr^{-1} at present. As a consequence, the rupture of the soil nitrogen cycle in the deforested endorheic depressions is the origin of the water table high nitrate contents. Elsewhere in the world, such estimates of the recharge fluxes following deforestation have only been studied, to our knowledge, in semiarid Australia (e.g. Allison *et al.*, 1990). However, because (i) our study site in Niger is representative of many semiarid environments, (ii) deforestation is a constant in Sahel, such qualitative and quantitative recharge changes following deforestation must be frequent processes, even if they are not yet well documented. In a sustainable development perspective, a better knowledge of this type of processes is highly desirable.*

Acknowledgements

This study was supported by the French Hydrology Research National Program. □

Références bibliographiques

- Allison G.B., Cook P.G., Barnett S.R., Walker G.R., Jolly I.D., Hughes M.W. (1990) - Land clearance and river salinisation in the western Murray Basin, Australia. - *J. Hydrol.*, vol. 119, n° 1/4, p. 1-20.
- Boeckh E. (1965) - Contribution à l'étude hydrogéologique de la zone sédentaire de la république du Niger. - Rapport technique, BRGM/BFBH, DAK65-A20, Dakar, Sénégal.
- Desconnets J.-C., Taupin J.-D., Lebel T., Leduc C. (1997) - Hydrology of the Hapex-Sahel Central Super-Site: surface water drainage and aquifer recharge through the pool systems. - *J. Hydrol.*, vol. 188-189, n° 1/4, p. 155-178.
- Elbaz-Poulichet F., Favreau G., Leduc C., Seidel J.-L. (2002) - Major ion chemistry of groundwaters in the Continental Terminal water table of southwestern Niger (Africa). - *Appl. Geochem.*, vol. 17, n° 10, p. 1343-1349.
- Favreau G. (2000) - Caractérisation et modélisation d'une nappe phréatique en hausse au Sahel : dynamique et géochimie de la dépression piézométrique naturelle du kori de Dantiandou (sud-ouest du Niger). - Ph.D. thesis, Univ. Paris-Sud, Orsay, France, 292 p.
- Favreau G., Leduc C., Marlin C. (2000) - Représentativité de l'échantillonnage géochimique et hydrodynamique en nappe libre de milieu semi-aride. - *J. Afr. Earth Sci.*, vol. 31, n° 3/4, p. 669-678.
- Favreau G., Leduc C., Marlin C., Dray M., Taupin J.-D., Massault M., Le Gal La salle C., Babic M. (2002-a) - Estimate of recharge of a rising water table in semiarid Niger from ^3H and ^{14}C modeling. - *Ground Water*, vol. 40, n° 2, p. 144-151.
- Favreau G., Leduc C., Marlin C., Guéro A. (2002-b) - Une dépression piézométrique naturelle en hausse au Sahel (Sud-Ouest du Niger). - *C. R. Geoscience*, t. 334, n° 6, p. 395-401.
- Girard P., Hillaire-Marcel C. (1997) - Determining the source of nitrate pollution in the Niger discontinuous aquifers using the natural $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ratios. - *J. Hydrol.*, vol. 199, n° 3/4, p. 239-251.
- Kreitler C.W., Jones D.C. (1975) - Natural soil nitrate: The cause of the nitrate contamination of ground water in Runnels County, Texas. - *Ground Water*, vol. 13, n° 1, p. 53-62.
- Leduc C., Favreau G., Schroeter P. (2001) - Long-term rise in a Sahelian water-table: the Continental Terminal in South-West Niger. - *J. Hydrol.*, vol. 243, n° 1/2, p. 43-54.
- Loireau M. (1998) - Espaces - Ressources - Usages : Spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien. - Ph. D. Thesis, Université de Montpellier III, France.
- Valentin C. (1994) - Sécheresse et érosion au Sahel. - *Sécheresse*, vol. 5, n° 3, p. 191-198.
- Valenza A., Grillot J.-C., Dazy J. (2000) - Influence of groundwater on the degradation of irrigated soils in a semi-arid region, the inner delta of the Niger River, Mali. - *Hydrogeol. J.*, vol. 8, n° 4, p. 417-429.

Exposition "LES TRIBULATIONS D'UNE GOUTTE D'EAU"

DAKAR, 10-23 MAI 2003



Dans le cadre de la quinzaine scientifique organisée par l'Association SCIENTIFIKA de Dakar (Sénégal) avec l'appui de la coopération française, une exposition se tiendra à la Maison de la Culture Dousta Seck de Dakar, du 10 au 23 mai 2003 sur le thème de l'eau.

Cette exposition créée par le CCSTI (Centre de Culture scientifique, technique et industrielle) Provence-Méditerranée retrace les tribulations d'une goutte d'eau, avec la particularité que le visiteur est la goutte d'eau qui parcourt tout au long

de 17 bornes chacune des étapes possibles du cycle de l'eau.

Autour de cette quinzaine, toujours autour du thème de l'eau, des conférences-débats seront organisées à l'intention de la population dakaroise et en particulier des collégiens, lycéens et étudiants.

Après Dakar, l'exposition "les tribulations d'une goutte d'eau" prendra le chemin des autres pays de la sous-région.

