



COMMUNICATION

Représentativité de l'échantillonnage géochimique et hydrodynamique en nappe libre de milieu semi-aride (Reliability of geochemical and hydrodynamic sampling in a semi-arid water table)

G. FAVREAU^{1,2,*}, C. LEDUC¹ et C. MARLIN²¹Institut de Recherche pour le Développement, U.M.R. Hydrosociences Montpellier,
BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, France²Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique, Bât. 504, Université de Paris-Sud,
91405 Orsay cedex, France

RÉSUMÉ— Cette note évalue la représentativité de mesures piézométriques et géochimiques effectuées dans une nappe libre telle qu'on en rencontre fréquemment en Afrique. Ces remarques sont basées sur un suivi très détaillé de la nappe du Continental Terminal près de Niamey, Niger. Les fluctuations piézométriques naturelles sont saisonnières (de 0 à plus de 6 m en période d'infiltration) et interannuelles (pouvant dépasser 10 m de hausse en 40 ans). Les observations hydrodynamiques peuvent être perturbées par des inondations artificielles des points de mesure en saison des pluies (20% des ouvrages), et par des puisages induisant jusqu'à 2 m de rabattement. Les caractéristiques géochimiques peuvent varier selon la saison: modifications isotopiques et hausses de minéralisation près des zones d'infiltration, stabilité plus loin. Elles peuvent également varier artificiellement dans les puits du fait de leur large ouverture sur l'atmosphère. On peut ainsi aboutir à des hausses artificielles de la conductivité d'un facteur dix et à un rajeunissement des teneurs ¹⁴C de près de 20 pCm de l'eau des puits. En conclusion sont proposées quelques recommandations pour un échantillonnage représentatif des nappes libres de milieu semi-aride. © 2001 Elsevier Science Limited. All rights reserved.

ABSTRACT— This paper evaluates the reliability of the geochemical and hydrodynamic sampling in a phreatic aquifer of semi-arid Africa. These remarks are based on a dense network and on detailed data collected for about ten years in the Continental Terminal water table near Niamey, Niger. The natural potentiometric fluctuations are seasonal (up to 6 m during the rainy season) and interannual (up to 10 m since the 1960s). Hydrodynamic measurements can be disturbed by artificial flooding into the wells (20% of the network) and by domestic drawings (up to 2 m of lowering). Geochemical characteristics can vary seasonally: isotopic modifications and salinity increase near recharge areas, with more stability further away. They can also vary artificially in wells because of their large opening towards the open air. Artificial increases of salinity of one order of magnitude and contaminations of ¹⁴C activities of up to 20 pmC occur in some wells by atmospheric dust inputs or organic matter which has fallen into the well. In conclusion, some recommendations are given for a representative sampling in semi-arid phreatic aquifers. © 2001 Elsevier Science Limited. All rights reserved.

(Received 19/8/99: revised version received 18/4/00: accepted 23/5/00)

*Corresponding author
guillaume.favreau@mpl.ird.fr

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction

The detailed study covering an area of over 8000 km² of the Continental Terminal phreatic aquifer near Niamey, Niger is based on several thousand water table level measurements and several hundred chemical and isotopic samplings over ten years. It gives an idea of the different possible bias induced by isolated measurements, compared with a long-term, high-density survey. Therefore, doubts can be expressed concerning the sampling reliability of some hydrogeological studies in the Sahel, often based on scarce data, gathered with a low frequency of measurement and a large mesh in space.

The climate of the study area is semi-arid with a mean annual rainfall of 560 mm (June–September), an average annual temperature of 29°C and a potential evapotranspiration of 2700 mm a⁻¹. The phreatic aquifer is part of the Continental Terminal, a large formation which is mainly sandy to silty, dated from the Eocene to the Pliocene (Fig. 1). In this region, surface runoff concentrates into endoreic pools and, hence, infiltrates and creates a temporary groundwater mound. The depth to the water table varies between a few metres below dry valleys and 75 m below the lateritic plateaus. The groundwater salinity is weak, with a mean value of about 50 mg l⁻¹. The dominant ions are HCO₃⁻, NO₃⁻, Na⁺ and Ca²⁺, with pH values between 5.0 and 6.5. Based on tritium contents in groundwater, the mean renewal rate of the aquifer is estimated at about 0.5% per year (Leduc *et al.*, 1996).

Hydrodynamic sampling

Descriptions of the recharge process and estimates of the recharge rate by hydrodynamic measurements were given by Leduc *et al.* (1997). New data and others recently rediscovered improved the knowledge of the reliability of the measurements.

The first natural fluctuation of the water table is the temporary, highly variable, rise during the rainy season. The size of the mound mainly depends on the infiltrating volume (up to 100,000 m³ per year for some pools), the hydrodynamic characteristics (sharply changing in the continental sediments) and the distance to the infiltration source (up to a few kilometres). In two thirds of the network, this seasonal fluctuation is imperceptible. Elsewhere, it is often of the decimetric order but can reach up to 6 m (Fig. 2). A second natural fluctuation appears on a larger temporal scale: the aquifer shows a long-term rise due to recent land clearing of vegetation (Leduc and Loireau, 1997). Since the beginning of the 1960s, the groundwater level increase is 3 m on average and over 10 m in some places (Fig. 3).

However, in other places of the Sahel, decreases in groundwater reserves were noted for the past several decades. Moreover, observations can be disturbed by artificial variations caused by the flooding of wells during the rainy season (about 20% of the wells rise; up to 10 m) and by domestic drawing (up to 2 m: Fig. 4). In the study area, artificial variation of the water table can thus be higher than natural fluctuations. Therefore, it is not possible to suggest a unique frequency of measurements: in some places, an annual frequency seems sufficient; whereas near recharge areas, weekly measurements are necessary.

Geochemical sampling

A first geochemical description of the phreatic aquifer was done by Leduc and Taupin (1997). New data have improved the knowledge of the temporal variability of the groundwater geochemistry.

Natural fluctuations of the salinity (up to one order of magnitude) and changes in the isotopic contents (up to 1.0‰ versus VSMOW for δ¹⁸O) occur during recharge on about 10% of the points simultaneously with water table fluctuations (Fig. 2). Recent investigations show that water in the unsaturated zone is highly concentrated (50 mg l⁻¹ for chloride on average). The leaching of these saline waters by recharge events can explain the seasonal mineralisation increase. In some cases, the seasonal rise is of the same order of magnitude but with no seasonal fluctuation of the static level (Fig. 6). Field inquiries reveal that these fluctuations are probably due to temporary contamination when there is no drawing.

Reliability of the water sampled in wells was estimated during pumping tests (Fig. 5). A mean fall of electric conductivity of 50 μS cm⁻¹ was observed, when pH was stabilised between 5.0 and 5.5 and Eh between +400 and +500 mV. Chemical analyses show that the salinity decrease is mainly (90%) due to a lowering of the Ca²⁺ and HCO₃⁻ concentrations. Stable isotope contents of water (¹⁸O, ²H) remain constant and prove the unicity of the water mass pumped. In this aquifer, the initial excess of the salinity can only be due to artificial inputs by the large opening of the wells, particularly by dust infall (about 200 g m² a⁻¹ in southwest Niger: Drees *et al.*, 1993). During the tests, ¹⁴C activities decreased by 4.0 pmC (% modern C) at Banikane well and by nearly 20 pmC at Kafina. As the explanation of a CO₂ exchange with the atmosphere is not compatible with the δ¹³C evolution (Fig. 5), the organic matter, frequently observed as having fallen into the wells, is probably responsible for this initial ¹⁴C excess.

Conclusion: some recommendations

The impact of hydrodynamic perturbations on water table levels and the artificial contamination of the water sampled in wells is much higher than generally assumed. One of the most striking results of the survey was the high number of wells (20%) periodically encroached by artificial flooding. Geochemical and hydrodynamic data obtained in such cases are poorly, if at all, representative of the groundwater, even several months later. Elsewhere, and because wells are wide open to the elements, strict attention

must be paid to the renewal of the water column before sampling. This is particularly relevant for chemical parameters and for isotopic tracers of dissolved species, which can be strongly disturbed by atmospheric dust fall or by artificial organic input into the well.

In the changing environments of semi-arid Africa, detailed and accurate hydrogeological studies are more and more necessary for sustainable development. This would foster setting up long-term, representative surveys.

INTRODUCTION

La plupart des échantillonnages hydrodynamiques et géochimiques effectués au Sahel, comme probablement ailleurs en Afrique, sont réalisés lors de campagnes ponctuelles, très espacées dans le temps et dans l'espace. De ce fait, la représentativité des mesures et des prélèvements est plus souvent supposée que démontrée. Cela pose peu de problème de validité dans le cas des nappes homogènes accessibles par des forages bien crépinés, par exemple les nappes captives à faible transit. Il en va différemment pour les nappes libres, souvent captées par des puits villageois et donc davantage exposées aux influences extérieures, dont la sensibilité est encore accrue si la nappe est très peu minéralisée ou à temps de résidence court. Dans certains cas, les résultats obtenus à partir d'un échantillonnage aléatoire peuvent diverger de manière importante des valeurs typiques de la nappe et conduire à des erreurs d'interprétation sur l'hydrogéologie de ces aquifères.

Au sud-ouest du Niger, l'étude de la nappe libre du Continental Terminal près de Niamey (Fig. 1) a permis d'accumuler depuis 1991 des données exceptionnelles en quantité et en qualité (Leduc *et al.*, 1997). Plus de 250 chroniques piézométriques et physico-chimiques, des suivis chimiques et isotopiques aboutissent aujourd'hui à une connaissance fine des caractéristiques naturelles de la nappe et permettent donc d'évaluer précisément la représentativité des mesures ponctuelles.

Contexte hydrogéologique

Le secteur d'étude s'étend sur environ 8000 km² en rive gauche du fleuve Niger et présente l'aspect d'une succession monotone de plateaux latéritiques et de vallées ensablées. Le climat semi-aride se caractérise par une température moyenne proche de 29 °C et une évaporation potentielle de l'ordre de 2700 mm a⁻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. Pendant la saison des pluies, le ruissellement consécutif aux intenses précipitations se concentre dans les bas-fonds et crée des mares temporaires, dont la vidange rapide par infiltration représente l'essentiel de la recharge de la nappe (Desconnets *et al.*, 1997).

Le réservoir de la nappe libre appartient au Continental Terminal, formation détritique sablo-silteuse silicatée d'âge éocène à pliocène (Lang *et al.*, 1990). À l'ouest, le fleuve Niger entaille le socle précambrien et constitue une limite hydrogéologique nette du système; la nappe s'y déverse localement par des sources. Dans le secteur d'étude, la nappe libre présente des gradients hydrauliques faibles, de l'ordre de 0,5‰ et ne montre aucune direction d'écoulement privilégiée (Fig. 1). La minéralisation de la nappe est généralement faible, de l'ordre de 50 mg l⁻¹, avec des faciès le plus souvent bicarbonaté à nitraté, sodique ou calcique. La présence de tritium et les activités ¹⁴C élevées témoignent du renouvellement actuel de la nappe; à partir des teneurs en tritium, le taux de renouvellement médian a été estimé à 0,5% par an (Leduc *et al.*, 1996).

ÉCHANTILLONNAGE HYDRODYNAMIQUE

Depuis 1991, plus de 7000 mesures piézométriques ponctuelles ont été effectuées sur plus de 250 forages et puits ouverts. Des enregistreurs automatiques sont installés sur une dizaine de sites. Quelques chroniques ayant débuté dès le milieu des années 1980 (Schroeter, 1993) et des mesures ponctuelles depuis les années 1950 (Greigert, 1957; Boeckh, 1965) complètent ces informations.

Fluctuations piézométriques naturelles

La recharge de la nappe ne se fait pas de manière diffuse sur l'ensemble du paysage mais de manière discontinue par l'intermédiaire des mares de bas-fonds

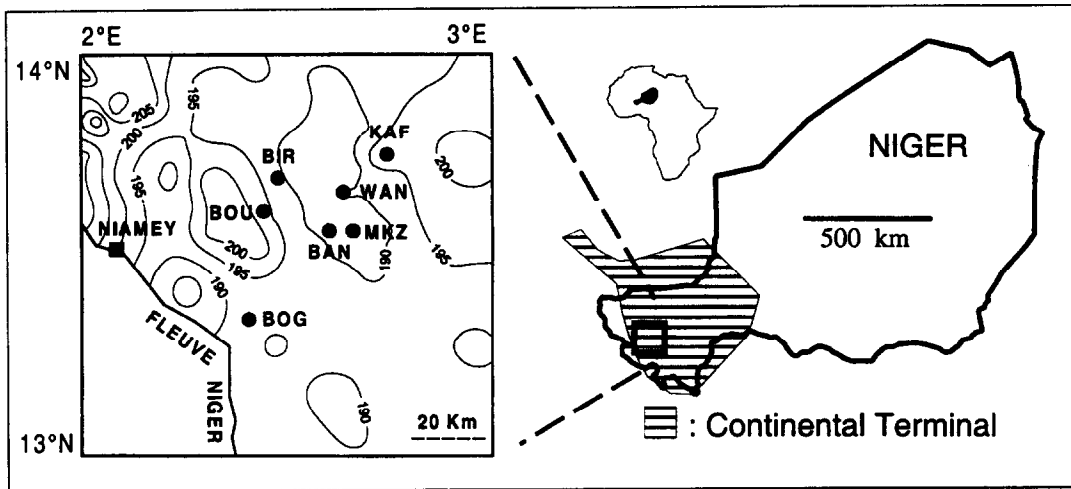


Figure 1. Carte piézométrique de la nappe libre (début 1998) et situation du secteur d'étude au sud-ouest du Niger. Localisation des points cités dans le texte: BAN: Banikane, BIR: Birni Kolondia, BOG: Boggol, BOU: Boundoubaré, KAF: Kafina, MKZ: Maourey Kouara Zéno, WAN: Wankama.

Figure 1. Potentiometric map of the water table (beginning of 1998) and location of the study area in southwest Niger. Sampling points referred to in the text: BAN: Banikane, BIR: Birni Kolondia, BOG: Boggol, BOU: Boundoubaré, KAF: Kafina, MKZ: Maourey Kouara Zéno, WAN: Wankama.

endoréiques. La hausse piézométrique pendant la saison des pluies dépend du volume de la recharge, des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère et de la distance entre le point d'observation et le lieu de recharge. Ceci se traduit par une variation non perceptible dans les deux tiers des ouvrages et souvent de l'ordre du décimètre pour les autres.

Le volume infiltré est très variable d'une année à l'autre, d'un bassin à l'autre. Dans le site de Maourey Kouara Zéno, une hausse de 6,1 m a été observée en 1998 (Fig. 2) alors que la fluctuation des autres années, toujours comprise entre 0,2 et 1,3 m est généralement dix fois plus faible. Les pluies exceptionnelles de 1998 sont la cause de cette recharge anormalement forte.

Les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère sont très variables dans l'espace du fait de la nature continentale (sables alluviaux, argiles palustres) des sédiments. Les pompages d'essai de la région indiquent des transmissivités variant de 3×10^{-4} à $3 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. À Wankama, une fluctuation saisonnière de 5 m près de la mare résulte d'une recharge annuelle d'environ 100.000 m^3 pour une transmissivité de $10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ et une porosité efficace de 5% (Favreau, 1996).

La distance entre la zone d'infiltration et le point de mesure varie de quelques mètres à plusieurs kilomètres et joue également un rôle dans l'importance des fluctuations piézométriques. À Wankama, le dôme piézométrique créé par l'infiltration atteint couramment 5 m de haut à 20 m de l'axe de la mare et encore 2 m de haut à 200 m.

À l'échelle interannuelle, la nappe libre du Continental Terminal connaît une hausse continue depuis plus de 40 ans provoquée par le déboisement et la mise en culture de la savane arborée originelle (Leduc et Loireau, 1997; Favreau et Leduc, 1998). La hausse médiane depuis le début des années 1960 est proche de 3 m mais certaines parties ont monté de plus de 10 m (Fig. 3). Dans le même temps, d'autres nappes sahéliennes ont vu leurs niveaux baisser, du fait du déficit pluviométrique des dernières décennies (Martin et Thiery, 1986; Biroué et Schneider, 1993). De telles évolutions contradictoires dans des

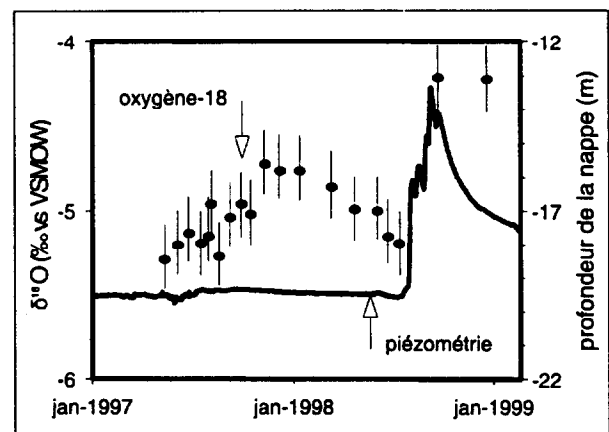


Figure 2. Piézométrie enregistrée et suivi des teneurs en ^{18}O de 1997 à début 1999 au puits de Maourey Kouara Zéno ($2^{\circ}39'04$, $13^{\circ}35'44$).

Figure 2. Recorded depth to the water table and monitoring of ^{18}O contents from 1997 to early 1999 in the Maourey Kouara Zéno well ($2^{\circ}39'04$, $13^{\circ}35'44$).

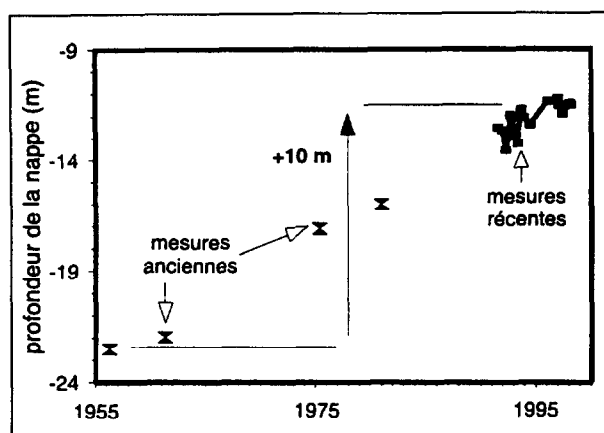


Figure 3. Hausse interannuelle de la nappe libre de 1956 à 1998 au puits de Boggol (2°23'92, 13°21'26).

Figure 3. Long-term water table rise between 1956 and 1998 measured in the Boggol well (2°23'92, 13°21'26).

milieux apparemment proches doivent inciter à la plus grande prudence dans l'interpolation de niveaux mesurés à des époques très différentes.

Perturbations artificielles du niveau statique

La première source d'erreur en piézométrie est constituée par des invasions d'eaux de ruissellement généralement courtes mais influentes qui touchent près de 20% des puits. En situation extrême, certains ouvrages peuvent rester submergés pendant toute la saison des pluies. La proximité d'un bas-fond n'est pas un critère de détermination du caractère inondable, plutôt dépendant du contexte micro-topographique et de la distance aux ravines de ruissellement. Les fluctuations mesurées sur ces points (parfois plus de 10 m) perdent alors toute signification. L'impact piézométrique de l'inondation disparaît généralement en quelques mois, mais des surcharges résiduelles de l'ordre du mètre par rapport au niveau statique réel peuvent subsister jusqu'en fin de saison sèche, conséquence du colmatage des ouvrages soumis à des inondations répétées.

L'autre source d'erreur en piézométrie est due au puisage. L'estimation de cette perturbation sur le niveau statique a été effectuée à partir d'enregistreurs piézométriques. L'exemple de Birni Kolondia sur la période 1995–1997 est particulièrement représentatif (Fig. 4). Les mesures bimensuelles pourraient suggérer un cycle saisonnier avec une hausse, attendue, de la nappe durant l'hivernage. Cependant, l'enregistrement en continu révèle que le niveau statique mesuré en fin de nuit ne bouge pas au cours de l'année; les niveaux les plus bas indiquent uniquement une sollicitation accrue du puits au cours de la saison sèche. Le rabattement mesuré à Birni Kolondia, de l'ordre de 2 m, est l'un des plus forts de la région.

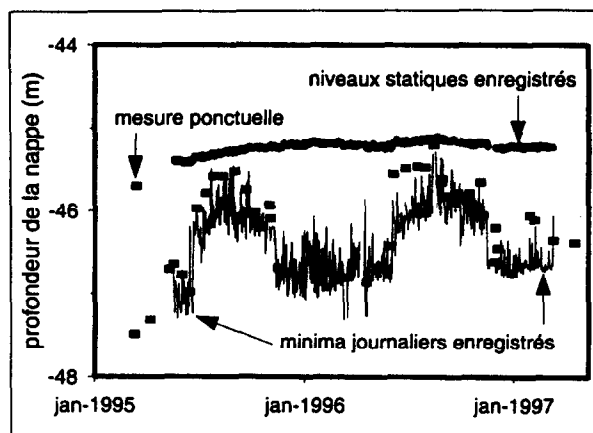


Figure 4. Enregistrement piézométrique et mesures ponctuelles de 1995 à début 1997 au puits de Birni Kolondia (2°27'73, 13°41'81).

Figure 4. Recorded depth to the water table (daily extreme values) and spot measurements from 1995 to early 1997 in the Birni Kolondia well (2°27'73, 13°41'81).

L'analyse hydrodynamique de la nappe libre du Continental Terminal montre qu'il existe une très grande diversité de situations, avec des hausses et des baisses artificielles souvent plus fortes que les éventuelles fluctuations naturelles. Dans un tel contexte, il n'est pas possible de définir une densité uniforme de mesure: en certains sites, une mesure annuelle peut suffire alors que d'autres nécessitent une fréquence hebdomadaire, notamment pendant l'hivernage.

ÉCHANTILLONNAGE GÉOCHIMIQUE

Les paramètres physico-chimiques sont également suivis depuis 1991. Après une première interprétation de l'hydrochimie (Leduc et Taupin, 1997) de nouveaux prélèvements ont complété les chroniques chimiques et isotopiques et permettent de mieux évaluer leur représentativité.

Les ions majeurs

Plus de 200 analyses d'ions majeurs provenant de puits ou de forages ont été effectuées. Elles complètent les chroniques physico-chimiques (température, conductivité électrique et pH, avec occasionnellement des mesures de l'alcalinité, du potentiel redox et de la teneur en O₂ dissous). La nappe libre du Continental Terminal apparaît peu minéralisée (généralement moins de 100 μS cm⁻¹), acide (pH entre 5,0 et 6,5) et les ions très largement dominants sont HCO₃⁻ et NO₃⁻, Na⁺ et Ca⁺. Les minéralisations plus élevées présentent des teneurs en NO₃⁻ anormalement fortes (jusqu'à 200 mg l⁻¹) et témoignent de contaminations locales.

Représentativité de l'échantillonnage effectué dans les puits

Dans une dizaine de sites il a été possible de comparer les caractéristiques chimiques de puits et de forages proches. Les pH en forage, compris entre 5,0 et 5,5, sont en moyenne inférieurs d'une unité pH à ceux des puits adjacents. Les conductivités électriques des puits sont systématiquement plus fortes, en médiane de $75 \mu\text{S cm}^{-1}$, que celles des forages. Une comparaison des analyses chimiques montre que plus de 75% de l'excès de minéralisation observé dans les puits est dû aux ions Ca^{2+} et HCO_3^- . Les suivis physico-chimiques réalisés pendant des pompages continus de plusieurs jours dans des puits villageois complètent ces observations (Fig. 5). Au cours du pompage, les conductivités électriques ont baissé en moyenne de $50 \mu\text{S cm}^{-1}$; le pH s'est stabilisé entre 5,0 et 5,5; le potentiel redox a augmenté vers des valeurs de +400 à +500 mV.

Plusieurs processus peuvent être envisagés pour expliquer les modifications de l'eau de la nappe dans les puits. Les interprétations hydrodynamiques et la constance en isotopes stables de la molécule d'eau montrent l'unicité et la non stratification de la masse d'eau sollicitée au cours du pompage. Le dégazage du CO_2 dissous dans l'aquifère (pCO_2 calculée de la nappe $\sim 10^{-2}$ atm, pour une pCO_2 de l'air proche de $10^{-3.5}$ atm) peut être invoqué dans l'évolution des paramètres physico-chimiques (déplacement des équilibres chimiques, hausse du pH). L'excès ionique avant pompage, en particulier en cations, ne peut cependant provenir que d'apports extérieurs via la large ouverture des puits, souvent proche de 2 m^2 . Au cours des pompages, la baisse de la minéralisation a été due à 90% aux ions Ca^{2+} et HCO_3^- , tandis que les concentrations en NO_3^- et en Cl^- sont restées constantes. Ces observations sont cohérentes avec la nature essentiellement carbonatée des dépôts solubles de l'harmattan (quelques % sur un dépôt total estimé à $200 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; Drees *et al.*, 1993). Les excès ioniques avant pompage correspondraient à des dépôts atmosphériques de plusieurs années, compatibles avec l'âge des puits; les poussières atmosphériques sont ainsi susceptibles d'expliquer en partie les conductivités et les pH plus élevés avant pompage. Une troisième source de perturbation possible est la dégradation de la matière organique piégée au fond des puits, avérée à la fois par les conditions plus réductrices avant pompage (Fig. 5) et par la persistance de pressions partielles en CO_2 de l'ordre de $10^{-2.5}$ atm, supérieures à celle de l'atmosphère. Les influences respectives de ces trois perturbations sur la physico-chimie sont contingentes et liées à la fréquence des puisages, à l'âge du puits, à l'importance du volume d'eau et à la quantité de matière organique allochtone dans le puits.

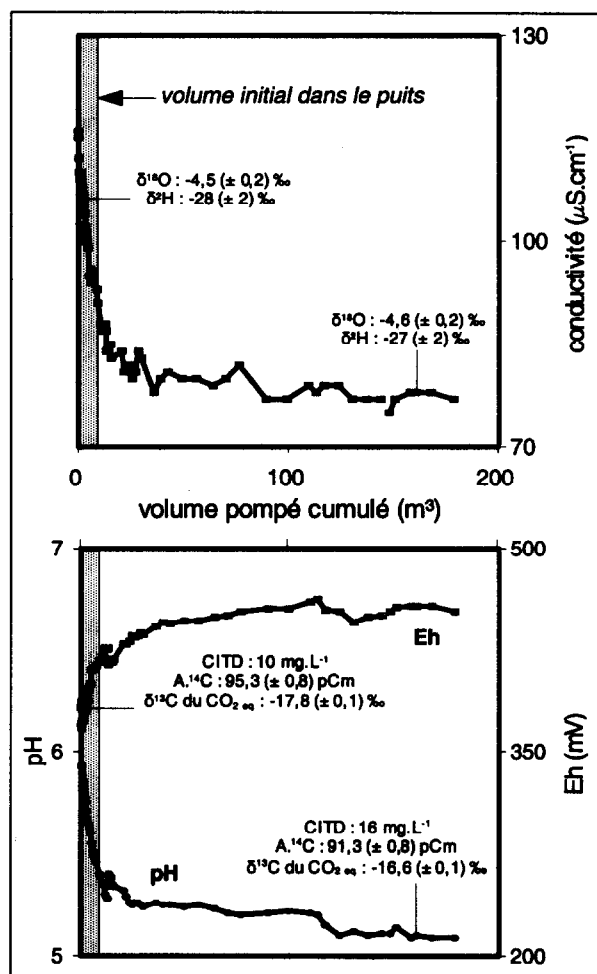


Figure 5. Évolutions physico-chimiques (conductivité électrique, pH et Eh) et isotopique (^{18}O , ^2H , ^{14}C , ^{13}C) durant l'essai de pompage de Banikane ($2^{\circ}37'49$, $13^{\circ}35'17$) en septembre 1997. Teneurs exprimées contre VSMOW pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$, contre VPDB pour $\delta^{13}\text{C}$.

Figure 5. Physico-chemical parameters (electric conductivity, pH and Eh) and isotopic contents (^{18}O , ^2H , ^{14}C , ^{13}C) during the pumping test at the Banikane well ($2^{\circ}37'49$, $13^{\circ}35'17$) in September, 1997. Isotopic contents expressed versus VSMOW for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ and versus VPDB for $\delta^{13}\text{C}$.

Les puits inondables montrent des teneurs en Cl^- et en NO_3^- supérieures à la moyenne et plus fortes que celles des forages et des puits adjacents (concentrations moyennes respectives des puits inondables de 10,9 et de 75,4 mg l^{-1} , pour des moyennes représentatives dans la nappe de 5,1 et de 23,6 mg l^{-1}). Bien que ces ions puissent avoir d'autres origines, l'entraînement des matières fécales souvent observées dans les puits inondés est la cause probable de ces concentrations plus élevées.

Fluctuations saisonnières de la minéralisation

La majeure partie des points observés montre une faible variabilité des paramètres physico-chimiques

au cours de l'année. Seuls 10% des puits présentent des fluctuations saisonnières significatives de la conductivité et ont fait l'objet d'un suivi des ions majeurs sur la période 1996–1997. Deux catégories peuvent être distinguées.

La première regroupe des puits à fluctuations saisonnières naturelles de la piézométrie, donc assez proches d'aires de recharge. L'augmentation simultanée du niveau statique et de la charge ionique est interprétée comme le signal d'une arrivée massive d'eau, minéralisée par mélange avec des solutions concentrées dans la zone vadose. Les premiers résultats de l'étude de la zone non saturée près des mares montrent des teneurs en chlorures de l'ordre de 50 mg l^{-1} en fin de saison sèche sur les six premiers mètres sous la surface du sol, soit un facteur de concentration d'environ 100 par rapport aux précipitations (Taupin *et al.*, 1997). En considérant une humidité pondérale en fin de saison sèche de 5%, une masse volumique apparente de $2,0 \text{ g cm}^{-3}$ (Plain, 1999), une épaisseur de zone non-saturée de 20 m pour une recharge moyenne de $1,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ sous les mares, le lessivage des solutions concentrées dans la zone non-saturée est suffisant pour rendre compte d'une augmentation d'un facteur dix de la minéralisation des eaux de recharge.

La deuxième catégorie rassemble des puits éloignés des zones d'infiltration, sollicités principalement en saison sèche et peu puisés ou même abandonnés en saison des pluies. L'augmentation de la minéralisation est variable selon les points et les années. Le puits traditionnel non cimenté de Boundoubaré (Fig. 6) est représentatif de cette catégorie. La hausse de la minéralisation, faible et essentiellement due aux ions Ca^{2+} et HCO_3^- en 1996, a été de l'ordre d'un facteur dix en 1997 où presque toutes les concentrations ont augmenté. Le faciès chimique est ainsi passé de bicarbonaté calcique à bicarbonaté potassique en quelques mois. Une telle différence interannuelle de comportement est difficile à expliquer, sauf par une pollution de l'ouvrage concomitante à l'absence de puisage. Comme déjà évoqué plus haut, cette pollution peut être éolienne (poussières), organique (e.g. débris végétaux) ou hydrique (submersion du puits).

Les isotopes de l'environnement

Les isotopes de la molécule d'eau

Près de 200 analyses des teneurs en ^{18}O , une centaine en ^2H et une cinquantaine en ^3H ont été effectuées sur le secteur d'étude. Les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ et en $\delta^2\text{H}$ sont typiquement comprises entre -6,0 et -2,0‰ contre VSMOW, et entre -40 et -15‰ contre VSMOW respectivement; les teneurs en tritium varient entre 0 et 20 UT (Leduc *et al.*, 1996; Leduc et Taupin, 1997).

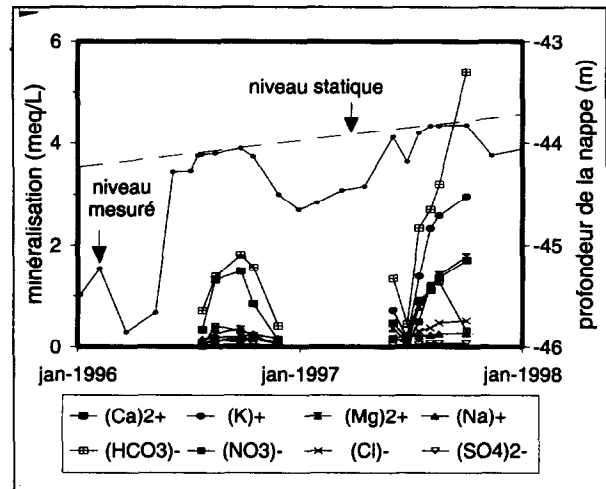


Figure 6. Fluctuations saisonnières en 1996 et 1997 du niveau piézométrique apparent et de la minéralisation de l'eau du puits de Boundoubaré ($2^{\circ}26'42$, $13^{\circ}37'79$).

Figure 6. Seasonal fluctuations in 1996 and 1997 of the apparent water table level and of the water salinity in the Boundoubaré well ($2^{\circ}26'42$, $13^{\circ}37'79$).

Les points sans fluctuation saisonnière du niveau statique montrent une constance des teneurs isotopiques, à l'exemple de Birni Kolondia où huit valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ sont comprises entre -5,2 et -4,8‰ contre VSMOW sur la période 1997–1998. Ces résultats s'accordent avec la stabilité des teneurs des sites sans fluctuation piézométrique saisonnière analysés à plusieurs reprises depuis 1991. De même, les échantillonnages en début et en fin d'essai de pompage n'ont montré aucune variation significative des teneurs en ^{18}O et en ^2H (Fig. 5).

En revanche, les points à fluctuations piézométriques peuvent connaître des variations isotopiques significatives, comme au puits de Maourey Kouara Zéno (Fig. 2), situé à moins de 100 m d'une aire de recharge. Peu sensible en 1997 où la pluviométrie a été faible (440 mm), la variation des teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ a atteint 1,0‰ au cours de la saison des pluies 1998 (630 mm), piézométriquement exceptionnelle. Ceci indique un transfert massif et rapide d'une eau de surface, plus enrichie que la teneur initiale de la nappe, vers l'aquifère.

Les puits régulièrement inondés présentent des teneurs systématiquement plus élevées en $\delta^{18}\text{O}$ et en $\delta^2\text{H}$, avec des enrichissements qui peuvent atteindre respectivement 3 et 12‰ contre VSMOW par rapport aux valeurs locales de la nappe obtenues sur des puits non inondables. Dans un milieu où l'infiltration s'effectue rapidement après la pluie, cet enrichissement peut s'expliquer par l'évaporation des eaux de submersion par contact prolongé avec l'atmosphère. En ^3H , les inondations récurrentes

ont provoqué l'apparition de teneurs typiques des pluies récentes (5–10 UT) dans des sites où les valeurs authentiques de la nappe sont faibles ou inférieures au seuil de détection (2 UT).

Le ^{14}C

Une soixantaine d'activités ^{14}C obtenues par méthode conventionnelle (Fontes, 1971) et par AMS (Hut *et al.*, 1986) du CNRS de Gif sur Yvette ont été déterminées sur des puits et forages de la nappe libre. Les teneurs représentatives varient entre 70 et 100 pCm (% de C moderne), les points éloignés des zones de recharge ayant logiquement les valeurs les plus faibles. Les points inondables ont des activités ^{14}C supérieures à 100 pCm, non représentatives de l'aquifère. En dehors de ces puits pollués par inondation, certains points présentent également des activités particulièrement élevées, dans des contextes où de forts renouvellements de l'aquifère sont improbables. Pour comprendre cette déviation, plusieurs prélèvements en début et en fin de pompage d'essai ont été effectués, comme à Banikane (Fig. 5). L'activité ^{14}C finale, représentative de la nappe, y apparaît significativement plus faible de 4,0 pCm que celle mesurée en début de pompage. En parallèle, le pH chute de près d'une unité et le Carbone Inorganique Total Dissous (CITD) augmente de 60% au cours du pompage, de 10 à 16 mg l⁻¹. Les teneurs mesurées du $\delta^{13}\text{C}$ du CITD évoluent de -16,4 à -17,6‰ contre VPDB (valeurs calculées de -17,8 à -16,6‰ contre VPDB pour le CO₂ équilibrant) et restent dans la gamme d'un gaz typique des sols régionaux. Les hypothèses précédemment envisagées pour l'évolution physico-chimique au cours du pompage restent valables pour l'interprétation de l'évolution des teneurs isotopiques du C.

Le dégazage de CO₂ est responsable du CITD plus faible dans le puits avant pompage. L'échange de CO₂ avec l'atmosphère (dont le $\delta^{13}\text{C}$ est proche de -7‰ contre VPDB) est cependant probablement négligeable, les teneurs en $\delta^{13}\text{C}$ du CO₂ équilibrant étant plus appauvries avant pompage (-17,8‰) que les teneurs représentatives de la nappe (-16,6‰ contre VPDB).

Au sud-ouest du Niger, l'origine des carbonates et leur teneur en $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ ne sont pas définies. Seule une origine des poussières locale, pédologique et en équilibre avec les teneurs modernes du sol pourrait contribuer au rajeunissement observé du CITD dans les puits.

L'oxydation de la matière organique des puits, aux teneurs en ^{14}C modernes et dont le ^{13}C a une origine identique (végétaux) à celle des sols régionaux, est avérée par les potentiels redox plus faibles avant

pompage et par le maintien de pCO₂ élevées dans les puits ouverts sur l'extérieur. Bien que non quantifiable par les traceurs utilisés, la dégradation de la matière organique est probablement la cause majeure de la hausse artificielle des teneurs en ^{14}C du CITD dans nos puits. Une situation extrême est celle du pompage du puits quasi-abandonné de Kafina: les paramètres physico-chimiques évoluent comme à Banikane (Fig. 5); les teneurs des isotopes de la molécule d'eau (^{18}O , ^2H et ^3H) ne varient pas; le $\delta^{13}\text{C}$ du CITD évolue de -14,9 à -17,8‰ contre VPDB (de -19,4 à -17,3‰ contre VPDB pour le CO₂ équilibrant) mais le CITD diminue de 23 à 16 mg l⁻¹ et l'activité en ^{14}C chute de 100,3 à 82,6 ± 0,7 pCm au cours du pompage. L'apport en C moderne dans le puits de Kafina est donc suffisant pour engendrer un excès initial en CITD et une valeur de l'activité ^{14}C supérieure de près de 20 pCm à la valeur représentative de la nappe. Dans les deux cas cités, en considérant une activité du contaminant de 113 pCm (moyenne troposphérique des dix dernières années), la teneur initiale dans le puits en CITD originaire de l'aquifère apparaît proche de 9 mg l⁻¹, le complément en C dissous provenant de l'importance plus ou moins grande de la contamination.

Ces explications de l'excès en ^{14}C dans les puits peu exploités (apport atmosphérique de poussières carbonatées, oxydation de la matière organique allochtone) demanderaient à être validées par d'autres mesures, comme des discriminations isotopiques des diverses sources de pollution.

CONCLUSION: QUELQUES RECOMMANDATIONS

Notre analyse confirme les propos déjà anciens de Payne (1981): "A critical appraisal of published studies suggests that proper and adequate sampling is perhaps one of the weakest points of a number of studies". En Afrique sub-saharienne, très peu d'ouvrages sont réservés à l'observation scientifique et l'échantillonnage hydrogéologique est le plus souvent effectué dans des puits villageois. Un des résultats les plus frappants de l'étude de la nappe libre du Continental Terminal près de Niamey est le nombre inattendu d'ouvrages (20%) soumis à des inondations récurrentes. Les données piézométriques et géochimiques qui en proviennent apparaissent peu ou non représentatives de la nappe libre, même plusieurs mois après l'inondation. L'échantillonnage doit donc se baser sur de rigoureuses enquêtes de terrain, et tout particulièrement au Sahel, en mutation environnementale constante depuis plusieurs décennies. En géochimie, une attention particulière doit être portée au renouvellement de la colonne

d'eau échantillonnée mais, faute de temps ou de moyen, cette précaution bien connue n'est que très rarement appliquée. Si cette négligence n'a pas de conséquence sur la représentativité des teneurs en isotopes de la molécule d'eau (^{18}O , ^2H , ^3H), il en va différemment pour les traceurs dissous (ions majeurs ou ^{14}C). Parce que les puits sahéliens sont largement ouverts sur l'atmosphère, certains prélèvements ne sont donc pas strictement indicatifs des caractéristiques réelles de la nappe; outre le fondamental renouvellement de l'eau du puits, la filtration *in situ* est importante. Au Sahel, la saison sèche est donc probablement la plus propice à un bon échantillonnage géochimique à cause des forts pompages. Pour la même raison, cette période connaît les plus forts rabattements et est la moins propice à une bonne campagne piézométrique. Des fluctuations naturelles de niveau de nappe et de chimie peuvent également intervenir pendant la période de recharge de l'aquifère. Instructives en elles-mêmes, ces fluctuations nécessitent pour pouvoir être intégrées dans l'espace un échantillonnage séquentiel, si possible complété par des enregistrements en continu.

Après la nécessaire période exploratoire des grands systèmes aquifères le temps est probablement venu d'effectuer des études hydrogéologiques plus systématiques et approfondies. Ceci implique, comme suggéré par Edmunds (1996), la mise en place rapide de suivis à long terme par les hydrogéologues africains, logiquement les plus à même d'assurer des échantillonnages de qualité.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Abdoulaye Koné (IRD-Niamey) et le CFTEA du Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement du Niger pour l'assistance technique lors des essais de pompage. Une partie des résultats de cette étude a bénéficié du soutien du Programme National français de Recherche en Hydrologie.

Editorial handling – B. Bonin and C. Renac

REFERENCES

Biroué, W.K., Schneider, J.L., 1993. Vers l'assèchement de la nappe phréatique au Sahel tchadien? Comptes Rendus Académie Sciences Paris II 317, 89–92.
Boeckh, E., 1965. Contribution à l'étude hydrogéologique de la zone sédentaire de la république du Niger. BFBH/BRGM, Paris, France, Rapport technique DAK65-A20, 112p.
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. Journal Hydrology 188–189, 155–178.

Drees, L.R., Manu, A., Wilding, L.P., 1993. Characteristics of aeolian dusts in Niger, West Africa. Geoderma 59, 213–233.
Edmunds, W.M., 1996. Geochemical framework for water quality studies in sub-Saharan Africa. Journal African Earth Sciences 22, 385–389.
Favreau, G., 1996. Modélisation locale de la recharge de la nappe phréatique sur le site de Wankama (sud-ouest du Niger). Mémoire de 3e cycle, Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique, Université de Paris-Sud, Orsay, France, 75p.
Favreau, G., Leduc, C., 1998. Fluctuations à long terme de la nappe phréatique du Continental Terminal près de Niamey (Niger) entre 1956 et 1997. In: Servat, E., Hughes, D., Fritsch, J.M., Hulme, M. (Eds.), Variabilité des Ressources en Eau en Afrique au XXème Siècle. AISH Publication 252, Wallingford, pp. 253–258.
Fontes, J.C., 1971. Un ensemble destiné à la mesure de l'activité du radiocarbone naturel par scintillation liquide. Revue Géographie Physique Géologie Dynamique 13, 67–86.
Greigert, J., 1957. Introduction à la connaissance hydrogéologique du bassin occidental du Niger (Rapport fin de campagne 1955–1956 troisième partie). Les principales nappes du bassin occidental du Niger. Direction Fédérale des Mines et de la Géologie, Dakar, Sénégal, Rapport technique, pp. 28–30.
Hut, G., Östlund, H.G., van der Borg, K., 1986. Fast and complete CO_2 -to-graphite conversion for ^{14}C accelerator mass spectrometry. Radiocarbon 28, 186–190.
Lang, J., Kogbe, C., Alidou, S., Alzouma, K.A., Bellion, G., Dubois, D., Durand, A., Guiraud, R., Houessou, A., de Klasz, I., Romann, E., Salard-Cheboldaeff, M., Trichet, J., 1990. The Continental Terminal in West Africa. Journal African Earth Sciences 10, 79–99.
Leduc, C., Bromley, J., Schroeter, P., 1997. Water table fluctuation and recharge in semi-arid climate: some results of the HAPEX-Sahel hydrodynamic survey (Niger). Journal Hydrology 188–189, 123–138.
Leduc, C., Loireau, M., 1997. Fluctuations piézométriques et évolution du couvert végétal en zone sahélienne (sud-ouest du Niger). In: Rosbjerg, D., Boutayeb, N.E., Gustard, A., Kundzewicz, Z.W., Rasmussen, P.F. (Eds.), Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty. AISH Publication 240, Wallingford, pp. 193–200.
Leduc, C., Taupin, J.D., 1997. Hydrochimie et recharge de la nappe phréatique du Continental Terminal (Niamey, Niger). In: Peters, N.E., Coudrain-Ribstein, A. (Eds.), Hydrochemistry. AISH Publication 244, Wallingford, pp. 235–243.
Leduc, C., Taupin, J.D., le Gal la Salle, C., 1996. Estimation de la recharge de la nappe phréatique du Continental Terminal (Niamey, Niger) à partir des teneurs en tritium. Comptes Rendus Académie Sciences Paris II 323, 599–605.
Martin, J., Thiery, D., 1986. Analyse d'une longue série piézométrique au Burkina-Faso. BRGM, Orléans, France, Note technique 86/14, 20p.
Payne, B.R., 1981. Practical applications of stable isotopes to hydrological problems. In: Gat, J.R., Gonfiantini, R. (Eds.), Stable Isotope Hydrology, Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. Technical Reports Series 210, AIEA, Vienna, pp. 303–334.
Plain, C., 1999. Essai de caractérisation de la zone non-saturée au nord-est de Niamey (Niger). Mémoire de 3ème cycle, Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique, Université de Paris-Sud, Orsay, France, 71p.

Schroeter, P., 1993. Les fluctuations des niveaux d'eau dans les nappes du Continental Terminal et de la formation du Tchad. Premières interprétations, période 1987-1993. Direction des Ressources en Eau du Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement, Niamey, Niger, Rapport technique, 17p.

Taupin, J.D., Gallaire, R., Arnaud, Y., 1997. Analyses isotopiques et chimiques des précipitations sahéliennes de la région de Niamey au Niger: implications climatologiques. In: Peters, N.E., Coudrain-Ribstein, A. (Eds.), Hydrochemistry. AISH Publication 244, Wallingford, pp. 151-162.