

Étude de la pollution de l'eau souterraine de la ville de Niamey, Niger.

J.-P. Chippaux (1, 2, 7), S. Houssier (3, 4), P. Gross (2), C. Bouvier (5) & F. Brissaud (6)

1. Centre de recherche sur les méningites et les schistosomoses, centre collaborateur OMS pour la recherche et la lutte contre les schistosomoses, CERMES, B. P. 10887, Niamey, Niger

2. Institut de recherche pour le développement (IRD, anciennement ORSTOM), B.P. 11416, Niamey, Niger

3. Coopération française, SCAC Ambassade de France, Niamey, Niger

4. Coopération française, Ministère de l'hydraulique, Niamey, Niger

5. Institut de recherche pour le développement (IRD), Montpellier, France

6. Hydrosociétés Montpellier, Université de Montpellier 2, France

7. Adresse actuelle : IRD, B.P. 1386, Dakar, Sénégal (chippaux@ird.sn)

Manuscrit n°2322. "Santé publique". Reçu le 2 mai 2001. Accepté le 12 mars 2002.

Summary: Groundwater pollution in Niamey, Niger.

We conducted a study on chemical and bacteriological groundwater pollution in Niamey, a Sahelian city of some 700 000 inhabitants. A total of 22 wells and 24 bore-holes were selected on a geological and socio-economic basis. The superficial aquifers, located on each bank of the River Niger and connected to the wells, presented high levels of oxidizable nitrogen and bacteriological pollution (coliform and faecal Streptococcus) which make the water unfit for human consumption. The deep aquifer, which supplies pumps, was also polluted but to a lesser degree. Faecal pollution increased after the rainy season. The lack of sanitation in Niamey and the seepage of polluted matters from the superficial layers could explain this pollution. Eventually, the use of the groundwater could increase and constitute a major health risk for the majority of the inhabitants of Niamey.

Résumé :

La pollution chimique et bactériologique des nappes d'eau souterraines de la ville de Niamey, ville sahélienne de 700000 habitants, a été étudiée. La nappe superficielle, accessible par les puits, présente une forte pollution azotée et une pollution bactériologique (coliformes et streptocoques fécaux) qui rendent l'eau impropre à la consommation. La nappe profonde, qui approvisionne les forages, est également polluée chimiquement (azote oxydable) et bactériologiquement (streptocoques fécaux) mais à un degré moindre. La pollution fécale augmente après la saison des pluies. L'origine des pollutions peut être attribuée à diverses causes: défaut d'assainissement et de collecte des ordures ménagères, transfert de polluants à partir des couches superficielles, conditions de puisage et structure des installations. À terme, l'utilisation de la nappe phréatique pourrait s'accroître et constituer un risque sanitaire important pour une majorité des habitants de Niamey.

water pollution
drinking water
sanitation
Niamey
Niger
Sub-Saharan Africa

pollution des eaux
eau potable
assainissement
Niamey
Niger
Afrique intertropicale

Introduction

La croissance démographique brutale que connaissent les pays en développement et leurs conditions économiques difficiles entraînent une urbanisation anarchique difficilement contrôlable. Niamey, ville sahélienne dont la population a été multipliée par 20 au cours de ces quarante dernières années, n'échappe pas à ce constat. L'équipement hydraulique, malgré plusieurs campagnes de forage, n'a pas suivi l'extension de la ville ni l'augmentation rapide de la population.

Entre 1984 et 1997, plusieurs enquêtes ponctuelles font état de pollutions chimiques et/ou bactériologiques (1). Toutefois, la diversité des protocoles utilisés, ainsi que le choix habituellement non motivé des sites prélevés, ne permettent pas de préciser l'importance de la pollution ni d'en déterminer l'origine, ce qui empêche de proposer des solutions à ce problème majeur. Nous avons entrepris un suivi longitudinal d'une sélection de puits et de forages représentatifs des différents quartiers de Niamey tenant compte de la qualité du sous-sol ainsi que de la situation socio-économique de la ville. Ce sont

les résultats de ces prospections, menées entre août 1998 et décembre 1999, que nous présentons ici avec, comme principal objectif, de documenter les causes de la pollution pour trouver son origine et y remédier.

Matériel et méthode

Présentation de la zone d'étude

Niamey, capitale du Niger, est situé sur les rives du fleuve Niger qui sépare la ville en deux parties inégales, la partie située sur la rive gauche, au nord de la ville, étant la plus étendue. La pluviométrie moyenne est de 564 mm de précipitations (1905-1994), avec une variabilité inter-annuelle relativement importante (précipitations de 319 mm et 978 mm en 1984 et 1998 respectivement pour deux valeurs extrêmes). La saison des pluies s'étend de fin juin à début octobre (2).

Niamey couvre une superficie de 115 km² et s'étend sur les deux rives du fleuve dont la cote moyenne se situe à environ 180 mètres. La ville est divisée en 5 districts, eux-mêmes

Tableau I.

Teneur moyenne en coliformes totaux (CT) et streptocoques fécaux (SF) de l'eau des puits échantillonnés (concentrations moyennes pour 100 ml d'eau).
Mean of total coliforms (CT) and faecal Streptococcus concentrations in water of selected wells (per 100 mL).

		campagne 1	campagne 2	campagne 3
nappe de la plaine (r. droite)	CT avant vidange	28320	13260	25060
	CT après vidange	42313	24868	47460
	SF avant vidange	29000	12064	14850
	SF après vidange	43860	25872	27820
nappe du plateau (r. gauche)	CT avant vidange	18989	13587	19796
	CT après vidange	14330	14630	29365
	SF avant vidange	23808	10596	11723
	SF après vidange	20229	11262	12208

distribués en quartiers dont les limites traditionnelles et administratives ne se recouvrent pas strictement.

La partie située sur la rive gauche, la plus ancienne, est construite sur un plateau de terrains sédimentaires du Continental terminal qui surplombe la vallée fluviale. Ce plateau est légèrement ondulé, d'altitude moyenne 220 m, et traversé par une rivière intermittente, le Gounti Yéna, qui draine les quartiers centraux. La rive droite s'est développée après la construction du pont reliant les deux rives en 1972. La ville s'est bâtie sur la plaine alluviale, inondable en saison des pluies, qui a remplacé la couverture sédimentaire du Continental terminal (2). Les altitudes varient entre 180 et 185 m.

On peut distinguer schématiquement trois types d'aquifères dans la région de Niamey (1, 2, 5; fig. 1) :

- l'aquifère lié au Continental terminal, sur la rive gauche: il est constitué par les strates poreuses et perméables des parties sableuses sur le plateau altéritique du Continental terminal, qui présente des épaisseurs pouvant atteindre 50 m. Le niveau statique de la nappe se situe à 210 m d'altitude sur le plateau (soit à une profondeur moyenne d'environ 10 mètres) avant une décroissance en arrivant au niveau de la vallée du fleuve; cet aquifère est alimenté par la percolation des eaux pluviales;
- l'aquifère lié aux alluvions du fleuve, sur la rive droite: cet ensemble sédimentaire ne dépasse pas 15 m d'épaisseur. Le niveau statique de la nappe se situe à 180 m d'altitude (soit à une profondeur moyenne de moins de 5m). Cet aquifère est alimenté essentiellement par le fleuve;
- l'aquifère lié au socle précambrien: constitué de terrains métamorphiques et magmatiques, le socle affleure en bordure du fleuve. L'aquifère est constitué des zones altérées au contact du *substratum* (pouvant atteindre 40 m en certains endroits) ou plus en profondeur en fonction du réseau de fractures et de la nature de la roche. On estime que l'aquifère profond est en communication avec les aquifères superficiels.

Choix des sites de prélèvement

La plupart des 1500 puits et les 200 forages de Niamey ont été recensés et géoréférencés. Une première sélection de 23 puits

Figure 1.

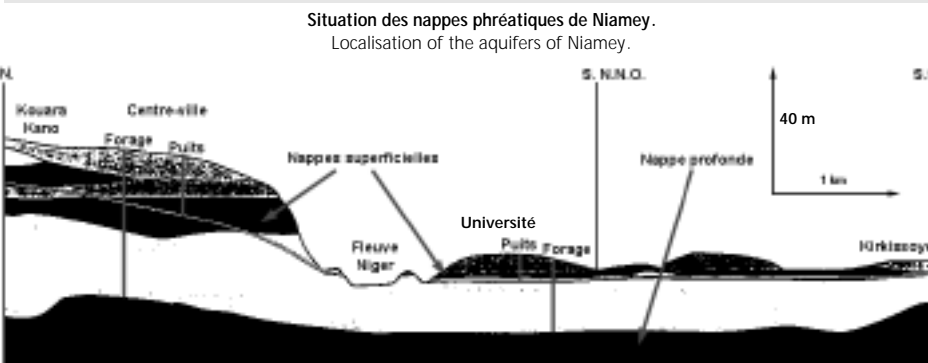
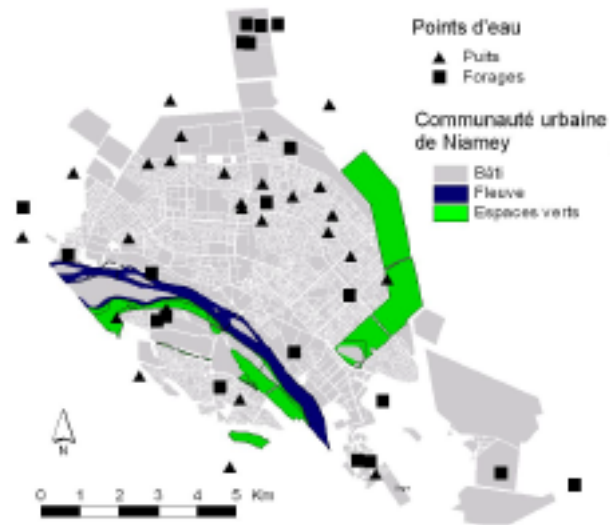


Figure 2.

Localisation des prélèvements effectués à Niamey.
Localisation of the samples performed in Niamey.



(18 en rive gauche et 5 en rive droite) et de 8 forages (tous en rive gauche) s'est fondée sur des critères géologiques, par rapport aux formations du sous-sol de Niamey, et sur une répartition représentative des caractères socio-économiques de la ville, basée sur les aménagements urbains et l'ancienneté des constructions. Leur prospection s'est déroulée tous les deux mois, entre août 1998 et janvier 1999. Une seconde série de cinq campagnes de prélèvements, entre février et décembre 1999, a été menée uniquement sur les forages intéressant la nappe profonde et a concerné 25 forages (18 en rive gauche et 7 en rive droite) incluant les 8 ouvrages suivis lors de la première série de campagnes de prélèvements (fig. 2). Certains sites ont été abandonnés au cours du suivi pour des raisons techniques: altération de la structure rendant difficile le prélèvement, refus de l'accès par le propriétaire ou panne du matériel d'exhaure. Lorsque cela était possible, un ouvrage voisin, aussi semblable que possible du premier, a été utilisé en remplacement.

Modalités de prélèvements

Les prélèvements ont été effectués à l'aide de bouteilles préalablement autoclavées. Les échantillons ont été conservés en glacière réfrigérée pendant le transport jusqu'au laboratoire où les analyses ont été aussitôt effectuées. Certains paramètres ont été mesurés *in situ*: pH, conductivité et O₂ dissous. Le niveau dynamique de la nappe a été mesuré à chaque prélèvement.

Après un premier prélèvement effectué le matin, les puits ont été traités par chloration l'après-midi afin d'éliminer toute trace de contamination de l'eau, des parois et de l'environnement immédiat du milieu poreux. Le lendemain, une

double vidange rapide du puits a été obtenue grâce à une pompe puissante, de façon à obtenir un remplissage du puits avec de l'eau provenant de la nappe et exempt de l'oxydant chimique résiduel. Un nouveau prélèvement d'eau a été alors pratiqué dans les mêmes conditions techniques que le premier. Avant chaque prélèvement au niveau des pompes, les robinets ont été stérilisés par brûlage.

Les analyses pratiquées avant et après chloration et vidange des puits apportent donc une double information :

- dans un premier temps, avant vidange, elles caractérisent l'état de l'eau contenue dans le puits qui a pu être contaminée par les utilisateurs du puits ou, accidentellement, par des éléments extérieurs à l'aquifère (vent, animaux, etc.);
- après vidange, elles évaluent le degré de pollution de la nappe phréatique. En effet, l'appel d'eau brutal provoqué par la vidange aspire l'eau de l'aquifère qui sera analysée avant d'avoir pu être souillée par des agents extérieurs, la chloration ayant auparavant décontaminé les parois de l'ouvrage.

Analyses chimiques et bactériologiques

Les formes azotées ont été estimées par mesure des nitrates (NO_3^-), par réduction au cadmium, des nitrites (NO_2^-), par diazotation, et de l'azote total par oxydation à l'aide du persulfate à chaud, en milieu basique, puis dosage des nitrates par réaction en milieu acide sur l'acide chromotopique. La teneur en azote Kjeldahl est déduite de la concentration en azote total par soustraction des formes minérales NO_3^- et NO_2^- . Les mesures sont effectuées par colorimétrie à l'aide d'un spectrophotomètre Hach DR 2010.

Le potassium, le magnésium, le calcium, les chlorures, les sulfates et les phosphates ont été dosés par colorimétrie à l'aide d'un spectrophotomètre Hach DR 2010.

Les paramètres microbiologiques ont été déterminés en filtrant des aliquotes homogènes de 100 ml dilués dans de l'eau stérile de façon à obtenir un nombre d'unités formant colonie (UFC) compris entre 30 et 300. Le taux de dilution a été calculé empiriquement au cours des campagnes de prélèvements. Chaque aliquote a été filtrée sur une membrane dont le diamètre des pores était de 0,45 μm . Les membranes ont ensuite été placées sur des milieux sélectifs pendant 24 heures à 37 °C. Les colonies ont été dénombrées selon une grille fournie par le fabricant. Nous avons utilisé les milieux suivants : NKS Standard, NKS Endo et NKS Azide (Sartorius, Paris) qui permettent de dénombrer respectivement les germes totaux, les coliformes totaux et les streptocoques fécaux.

Résultats

Aquifère superficiel du plateau (rive gauche)

La profondeur des puits varie entre 10 et 23 m (moyenne 16m). La teneur en nitrates augmente sensiblement au cours

Tableau II.

Teneur moyenne, après chloration, en azote, nitrates et nitrites des 17 puits sur les 23 échantillonnés ayant bénéficié d'au moins 4 prélèvements (en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$).
Mean of nitrogen, nitrate and nitrite concentrations after chlorinating the 17 out of the 23 sampled wells, on the basis of at least 4 samples ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$).

quartiers	azote Kjeldahl	nitrates	nitrites
valeur limite UE	1	50	0,1
valeur indicative OMS	-	50	3
rive droite			
Gaweye	50,3	20,7	0,107
Lamordé	5,5	5,3	0,044
Mosquée	14,8	7,7	0,016
Sagua	4,9	8,9	0,076
rive gauche			
Bagdad	5,8	11,7	0,016
Bandabari	5,4	12,9	0,026
Bandabari 2	4,8	8,4	0,011
Bani Fandou 2	0,8	0,9	0,004
Bar Souvenir	60,0	34,1	0,057
Boubiel 1	0,6	1,7	0,024
Boubiel 2	0,8	1,7	0,007
CEG 10	10,3	15,8	0,020
Goudel	3,7	3,5	0,094
Kalley Est	27,6	23,9	0,023
Kouara Me	9,5	14,1	0,010
Lazaret	0,8	0,8	0,005
Ryadh	2,8	4,4	0,016

de la saison sèche mais reste en deçà des normes habituellement admises. En revanche, la teneur en azote oxydable, c'est-à-dire azote organique + $\text{N}\cdot\text{NH}_4$, évolue peu au cours de l'année, mais elle dépasse fréquemment la norme et est même préoccupante dans le tiers des points d'eau (tableau II).

La conductivité moyenne reste constante au cours des saisons (environ 300 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et sensiblement supérieure à celle des eaux naturelles. L'alcalinité est faible. Il y a peu de sulfates; le calcium et le magnésium sont compris respectivement entre 10 et 35 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ et entre 1 et 40 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Les concentrations en chlorures et en potassium sont beaucoup plus hétérogènes.

Tous les puits présentent une pollution bactériologique d'origine fécale : la présence constante de coliformes et de streptocoques fécaux ne semble pas suivre une variation saisonnière nette. Certains points d'eau renferment une concentration franchement inquiétante d'agents microbiens d'origine fécale (tableau I). La comparaison des résultats avant et après chloration et vidange des puits ne montre pas de différence, ce qui indique que la contamination mesurée est celle de la nappe, et non celle induite localement par les conditions d'exploitation et par l'occupation du sol à proximité immédiate des puits.

Aquifère superficiel de la plaine alluvionnaire (rive droite)

Les puits de cette zone ont une profondeur qui varie entre 6 et 14 m (moyenne 11 m). La teneur en nitrates augmente en saison sèche mais reste inférieure aux normes. L'azote Kjeldahl est constamment au-dessus de la norme de l'Union Européenne (1 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$). La teneur en nitrites reste en deçà des limites admises par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et celles de l'Union européenne (tableau II).

La conductivité est comprise entre 400 et 2400 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Le pH est voisin de la neutralité et les eaux sont relativement bien oxygénées. Le calcium varie entre 40 et 100 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ et le magnésium entre 10 et 80 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Ces eaux sont généralement très riches en sulfates (jusqu'à 115 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) et en chlorures (plus de 130 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ dans la plupart des puits).

Tous les puits sont contaminés par des agents d'origine fécale. Leur concentration peut être considérable et dépasser 5000UFC pour 100 ml d'eau (tableau I). Contrairement à ce que l'on observe en rive gauche, la comparaison des résultats avant et après chloration et vidange des puits montre en moyenne une augmentation importante du nombre d'agents présents dans les échantillons, quelle que soit la saison du prélèvement (tableau I). Le même phénomène s'observe pour la conductivité électrique. Les pompes modifient l'organisation des écoulements dans l'aquifère en faisant converger vers le puits les eaux de son environnement. L'augmentation, à la suite de la vidange des puits, de la contamination bactérienne et de la conductivité traduit donc probablement la présence de sources de contamination proches : effluents de latrines, lixiviats de dépôts d'ordures... Le niveau général de contamination est alors celui qui est mesuré avant chloration et vidange : il est élevé, équivalent à celui de la nappe en rive gauche, et montre que la nappe elle-même est polluée par d'autres facteurs plus généraux.

Aquifère profond du socle cristallin

En profondeur, la qualité de la nappe a été analysée à partir des forages des rives gauche et droite, dont les profondeurs sont de l'ordre respectivement de 70 m en moyenne et de 50 m. La concentration en nitrates et en nitrites reste dans les limites de potabilité avec une très faible variation saisonnière. En

Tableau III.

Teneur moyenne en azote, nitrates et nitrites des 20 forages sur les 25 échantillons ayant bénéficié d'au moins 4 prélèvements (en mg.l⁻¹).
Mean of nitrogen, nitrate and nitrite concentrations after chlorinating the 20 out of 25 sampled bore-holes, on the basis of at least 4 samples (mg.l⁻¹).

quartiers	azote Kjeldahl	nitrates	nitrites
rive droite			
Nogaré	8,1	2,8	0,609
Sagua	11,0	4,7	0,102
rive gauche			
Aviation (1)	2,3	0,4	0,009
Aviation (2)	1,0	0,5	0,011
Lazaret	1,4	0,7	0,010
Saga (1)	7,9	2,3	0,159
Boukoki I	1,4	0,2	0,024
Tourakou	8,6	4,6	0,043
Yantala	16,2	7,3	0,067
Goudel (1)	5,2	0,8	0,149
Goudel (2)	8,6	2,4	0,213
Sabon Gari	1,1	0,3	0,005
Gamkallé	21,1	7,3	0,100
Saga (2)	2,6	0,72	0,031
Foulan kouara (1)	9	2,3	0,064
Foulan kouara (2)	0,8	0,5	0,010
Foulan kouara (3)	0,3	0,4	0,007
Couronne Nord	0,8	0,9	0,019
Tafa Kouara (1)	13,8	1,1	0,112
Tafa Kouara (2)	1,8	1,5	0,020

revanche, l'azote oxydable dépasse ces seuils dans 60 à 90 % des échantillons; la teneur en azote oxydable est, toutefois, loin d'atteindre le niveau des nappes en surface (tableau III).

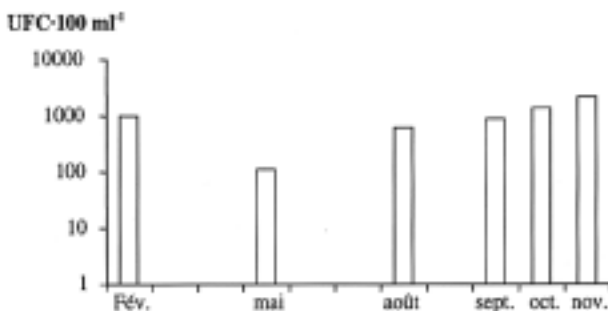
La conductivité est comprise entre 300 et 800 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Le pH est stable dans le temps et l'espace et proche de la neutralité. Les concentrations en calcium sont homogènes et avoisinent 26 mg.l⁻¹. Le taux de magnésium fluctue entre 12 et 35 mg.l⁻¹. Les teneurs en sulfates oscillent entre 10 et 150 mg.l⁻¹ et celles des chlorures sont toujours inférieures à 25 mg.l⁻¹.

Il y a une grande stabilité chimique, en dehors des sulfates, à la fois dans le temps et l'espace.

La contamination fécale est avérée par la présence de streptocoques fécaux, même si le nombre d'agents reste très inférieur dans les eaux de forage par rapport à ce qui est observé au niveau des puits. On observe une augmentation nette de la pollution générale, particulièrement fécale, après la saison des pluies, au moment des hautes eaux et avant la baisse de celles-ci au cours de la saison sèche (fig. 3).

Figure 3.

Evolution saisonnière du nombre de streptocoques fécaux dans les eaux de forage en 1999.
Seasonal variation of the number of faecal streptococci observed in bore-holes in 1999.



Discussion

Plus de 70 % de la population de Niamey (700 000 habitants) est actuellement approvisionnée en eau par les puits et forages des nappes souterraines (1). La protection de la qualité de ces eaux est donc un objectif prioritaire.

Nos résultats confirment la pollution générale des nappes souterraines de Niamey, à des degrés divers, en fonction de la localisation et de la profondeur des aquifères. Les 18 puits de

la rive gauche renseignent sur le niveau superficiel de l'aquifère du plateau, les 5 puits de la rive droite concernent le niveau superficiel de l'aquifère de la plaine alluvionnaire. Les 25 forages informent sur la qualité des eaux de la nappe profonde du socle cristallin. La surveillance longitudinale confirme la stabilité saisonnière du phénomène. La distribution des sites permet de valider nos observations sur l'ensemble de la ville.

La pollution azotée est moindre que lors des études précédentes, ce qui peut être en rapport avec notre technique de prélèvement, notamment la chloration des puits. Il n'en demeure pas moins que l'azote Kjeldahl dépasse fortement les normes européennes et celles de l'OMS dans 13 puits sur 17 et 17 forages sur 20. Les teneurs en nitrates n'excèdent jamais le seuil et celles des nitrites sont supérieures dans 1 puits sur 17 et 6 forages sur 20. La pollution bactériologique est largement confirmée dans la plupart des puits ou forages.

Les mesures de conductivité électrique, de concentration en chlorures et en azote, des teneurs en bactéries, pratiquées avant et après chloration et vidange des puits, montrent que la pollution touche la nappe phréatique superficielle sur les deux rives (tableau I) et ne peut être seulement imputée à une contamination locale des eaux des puits liée aux conditions d'exploitation. Les facteurs de pollution découlent donc de problèmes majeurs et tiennent essentiellement au manque de salubrité. Ils sont très probablement liés à l'absence de dispositif d'assainissement approprié à la protection des eaux souterraines et au défaut de collecte des ordures ménagères. En matière d'assainissement individuel, les équipements correspondent dans la grande majorité des cas à des latrines et puisards très mal entretenus et proches de la nappe. La gestion des ordures ménagères est rudimentaire: les 264 bennes mobiles servant à la collecte des ordures ménagères ne sont pas réparties au prorata de la densité de population; le ramassage n'est pas assez fréquent pour empêcher la décomposition sur place des ordures. De plus, ces dernières servent à combler les voies ravinées par le ruissellement des eaux de pluies. Plus d'un millier de dépotoirs sauvages se sont ainsi créés au cours des années (6).

Si les origines potentielles de la pollution des nappes superficielles sont bien identifiées, il reste cependant difficile d'en comprendre les mécanismes de transfert. BOUVIER *et al.* (3) ont montré que la vitesse d'infiltration à la surface du sol est faible, de l'ordre de 5 mm.h⁻¹, du fait de la présence généralisée de croûtes superficielles dans les premiers centimètres du sol. Ceci limite *a priori* la recharge directe verticale de la nappe par les eaux pluviales. De fait, LEDUC *et al.* (7) estiment que la recharge de la nappe s'effectue à partir de zones d'accumulation d'eau très localisées, notamment par les mares de surface, alimentées par les eaux de ruissellement consécutives aux pluies (4). Dans ce cadre d'hypothèses cohérentes, les échanges verticaux entre nappe et surface paraissent limités, et les polluants entraînés par les eaux pluviales transitent probablement par les mares et diverses collections d'eau pouvant se former en saison des pluies. La concentration en surface des polluants peut d'ailleurs représenter un avantage pour leur traitement, par rapport à une source diffuse. Pour les eaux usées collectées par les puisards, les valeurs de percolation peuvent être sensiblement différentes de celles du niveau superficiel. Dans ce cas, l'hypothèse d'un transfert vertical est très vraisemblable. Il est probable que les eaux ménagères et les eaux vannes s'infiltrant dans le sol parviennent à la nappe phréatique sans avoir pu bénéficier d'une filtration efficace, et occasionnent une multitude de pollutions ponctuelles.

La pollution des niveaux superficiels des nappes ne se limite pas à une pollution bactériologique. Les métaux lourds ne sont pas concernés, en raison du manque d'industries à Niamey. En revanche, la présence d'azote doit être soulignée. Une origine géologique est exclue. Cette pollution azotée peut provenir soit des fertilisants utilisés dans les périmètres irrigués et les plantations maraîchères installées le long du fleuve et en périphérie de la ville, soit d'une contamination par les matières organiques humaines et animales infiltrées. La quantité de fertilisants utilisés par les agriculteurs de la ville de Niamey est relativement faible, ce qui conduit à privilégier la seconde hypothèse sauf, peut-être, pour certains puits de la rive gauche. La forte contamination d'origine fécale s'accompagne très naturellement d'une pollution azotée, que l'on voit bien à travers les teneurs en azote organique. Une fois dans le milieu souterrain et en conditions oxydantes, l'azote se nitrifie. Il est très vraisemblable que l'azote ammoniacal stocké dans le sol par adsorption pendant la saison des pluies s'oxyde au fur et à mesure de la baisse du niveau piézométrique et de la progression de la zone non saturée en saison sèche. L'azote nitrique étant une forme très mobile – au contraire de N-NH₄ – il se retrouve rapidement dans la nappe.

La pollution bactériologique de la nappe profonde est plus inquiétante car elle pourrait signifier une insalubrité générale des eaux souterraines de la ville. Il reste cependant difficile de préciser l'origine et le caractère généralisé de cette pollution. Elle pourrait être due à la percolation verticale des polluants contenus dans les niveaux superficiels. Les observations d'HOUSIER (6), montrant l'influence de pompages en profondeur sur le niveau piézométrique de la nappe superficielle, confirment l'existence d'échanges verticaux entre les aquifères superficiels et profonds.

La contamination pourrait, pour partie, provenir des défauts d'installation de pompage. Cette supposition est renforcée, d'une part, par de grandes différences observées le même jour entre deux forages voisins et, d'autre part, par les variations importantes enregistrées sur le même forage lors de deux prélèvements différents. Ainsi pourrait s'expliquer l'augmentation du nombre d'agents bactériens après une utilisation peu intense du forage par les usagers, ce qui réduit le renouvellement de l'eau des tubages. Là encore, afin de mieux préciser les sources de pollution et les aménagements à promouvoir, il est recommandé d'étudier soigneusement les transferts de l'eau et des polluants dans la zone saturée.

Conclusion

Différentes enquêtes menées depuis 1987 avaient déjà souligné la pollution des nappes souterraines de la ville de Niamey avec, pour conséquence, des risques sanitaires inquiétants. Mais il était difficile d'évaluer l'importance en raison des différences méthodologiques observées. Notre étude permet, de ce point de vue, de préciser l'importance de la pollution et ses origines potentielles.

Les nappes superficielles, accessibles par les puits, apparaissent fortement contaminées par des matières organiques d'origine humaines et animales. Cette pollution trouve très probablement ses origines dans l'insuffisance des infrastructures d'assainissement et de collecte des ordures ménagères. L'éventualité d'une pollution bactériologique de la nappe profonde doit être envisagée sérieusement, surtout si l'on propose une exploitation systématique de cette ressource naturelle en eau. En effet, une ponction intense et régulière du contenu de la nappe profonde pourrait augmenter significativement la circulation des eaux souterraines, par appel d'eau, et aggraver la contamination de la nappe profonde par les polluants de surface. Par ailleurs, des essais sont actuellement en cours, visant à améliorer l'entretien des ouvrages hydrauliques afin de réduire leur contamination bactériologique et déterminer si celle-ci concerne ponctuellement les installations ou, plus généralement, la nappe en profondeur.

Les études doivent se poursuivre pour surveiller l'évolution de la pollution de la nappe, notamment en profondeur. Les modes de transfert de l'eau et des polluants dans la zone non saturée d'une part, dans la nappe d'autre part, doivent maintenant être impérativement caractérisés afin de hiérarchiser les différents facteurs de pollution et prendre les mesures conservatoires appropriées.

Remerciements

Ce travail a été financé conjointement par l'IRD et la Coopération française. Nous exprimons notre gratitude à MM. Roland LOUVEL et Olivier FAUGERE (SCAC, Ambassade de France à Niamey) et M. Christian LEDUC (IRD, Montpellier) pour leur soutien constant lors de l'élaboration et la réalisation de ce travail. Nous remercions également MM. Daniel COURET et Sylvain THERY pour leur aide technique.

Références bibliographiques

1. BECHLER-CARMAUX N, MIETTON M & LAMOTTE M - Le risque de pénurie en eau potable dans la ville de Niamey (Niger). *Sécheresse*, 1999, **10**, 281-288.
2. BERNUS E & HAMIDOU SA - *Atlas du Niger*. Paris : Jeune Afrique, 1980, 64 p.
3. BOUVIER C, GATHELIER R & GIODA A - Campagne de simulation de pluies en milieu urbain, Niamey (Niger). Rapport ORSTOM Niamey, 1986.
4. DESCONNETS C, TAUPIN JD, LABEL T & LEDUC C - Hydrology of the Hapex-Sahel. *J Hydrol*, 1997, **188-9**, 155-178.
5. GROSS P - *Qualité de l'eau souterraine de la Communauté Urbaine de Niamey*. Compte-rendu des travaux réalisés à Niamey d'août 98 à février 99. Document CERMES Niamey, 1999.
6. HOUSIER S - *Rapport de fin de mission : Etude de la pollution de la nappe de Niamey*. Rapport SCAC Ambassade de France à Niamey, 1999.
7. LEDUC C, BROMLEY J & SCHROETER P - Water table fluctuation and recharge in semi-arid climate : some results of the Hapex-Sahel hydrodynamic survey (Niger). *J Hydrol*, 1997, **188-9**, 123-138.