



# Hydrochemistry

Edited by

**NORMAN E. PETERS**

*U.S. Geological Survey, 3039 Annwiler Road, Suite 130, Atlanta, Georgia 30360-2824, USA*

**ANNE COUDRAIN-RIBSTEIN**

*URA CNRS, Circulation et transferts hydriques Continentaux, Laboratoire Géologie Appliquée, Université Pierre et Marie Curie, 4 Place Jussieu, F-75252 Paris Cedex 5, France*

Proceedings of an international symposium (Symposium S5) held during the Fifth Scientific Assembly of the International Association of Hydrological Sciences (IAHS) at Rabat, Morocco, from 23 April to 3 May 1997. This symposium was convened by the International Commission on Water Quality (ICWQ) and the International Committee on Tracers (ICT) of IAHS. The symposium was sponsored by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), the World Meteorological Organization and the Moroccan Water Resources Association, and is a contribution to UNESCO's International Hydrological Programme V, Projects 5.1 and 6.1

*Hydrochemistry* (Proceedings of the Rabat Symposium, April 1997)  
IAHS Publ. no. 244, 1997.

235

**Hydrochimie et recharge de la nappe phréatique du Continental Terminal (Niamey, Niger)**

**CHRISTIAN LEDUC & JEAN-DENIS TAUPIN**

*ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier cedex, France*

**Résumé** Le suivi hydrochimique de la nappe phréatique contenue dans les sédiments du Continental Terminal près de Niamey (Niger) a permis de collecter plusieurs milliers de mesures depuis 1991 à partir d'environ 300 puits et forages. Diverses méthodes statistiques (classification hiérarchique, analyse en composantes principales) confirment l'existence de sous-ensembles homogènes à l'intérieur du degré carré, déjà pressentis par l'étude hydrodynamique. Cette distinction de différentes zones est confirmée par le suivi isotopique ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) qui a également montré que seule la nappe phréatique, à la composition isotopique bien différenciée des aquifères captifs du Continental Terminal, connaît une infiltration actuelle significative. Malgré l'homogénéité apparente du milieu, il existe une grande variabilité spatiale de la recharge. L'évaporation n'est sensible que dans les zones où la nappe est proche de la surface.

## INTRODUCTION

L'expérimentation Hapex-Sahel a été menée sur le degré carré de Niamey, entre 2 et 3°E et entre 13 et 14°N. La composante hydrogéologique de cette expérimentation avait pour objectif de décrire et de quantifier les processus d'infiltration qui permettent la recharge de la nappe phréatique durant la courte saison des pluies. Ce travail a comporté un volet hydrochimique, objet du présent article, et un volet hydrodynamique présenté dans Leduc *et al.* (1996a). Sont détaillés ici les principales caractéristiques hydrochimiques de la nappe au nord du fleuve Niger et l'impact de l'infiltration à partir des analyses de la nappe et d'isotopes réalisées pendant trois ans. Même si cette approche ne permet pas toujours une quantification de la recharge aussi fine que les calculs hydrodynamiques, elle permet de compléter notre connaissance des mécanismes d'alimentation de l'aquifère.

## CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le Continental Terminal (CT) du Niger occidental est un vaste épannage détritique sur environ 500 km du nord au sud et d'est en ouest. Les dépôts, essentiellement sablo-limoneux et parfois grésifiés, renferment des niveaux latéritiques plus ou moins indurés. Le CT repose directement sur le socle métamorphique, souvent altéré et kaolinisé, ou sur des niveaux sédimentaires plus anciens du Continental Hamadien du Paléocène. Dans sa partie centrale, le CT peut atteindre 450 m d'épaisseur (Greigert & Bernert, 1979) et contenir trois niveaux aquifères dénommés ici CT1, CT2 et CT3 de bas en haut.

44 81894



010014863

IAHS Publication no. 244  
in the IAHS Series of Proceedings and Reports

Fonds Documentaire ORSTOM

Fonds Documentaire ORSTOM  
Cote: B\* 14863 Ex: 4

Dans le degré carré de Niamey, l'aquifère du CT est limité au sud-ouest par le fleuve Niger et à l'ouest par sa forme en biseau reposant sur le substratum cristallin. Dans la partie occidentale de notre zone d'étude ne subsiste qu'un seul niveau aquifère (CT3) alors que des horizons sous-jacents fortement captifs sont connus au nord et à l'est.

### HYDRODYNAMIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE

La carte piézométrique (Fig. 1) ne montre aucune direction privilégiée d'écoulement souterrain à l'échelle régionale mais présente des dômes et une dépression à très faible gradient hydraulique. Ce type de dépression a déjà été observée en Afrique sahélienne et est généralement expliquée par un déficit infiltration-évaporation dans une zone de médiocre perméabilité où les transferts latéraux sont réduits (par exemple Aranyossi & Guerre, 1989).

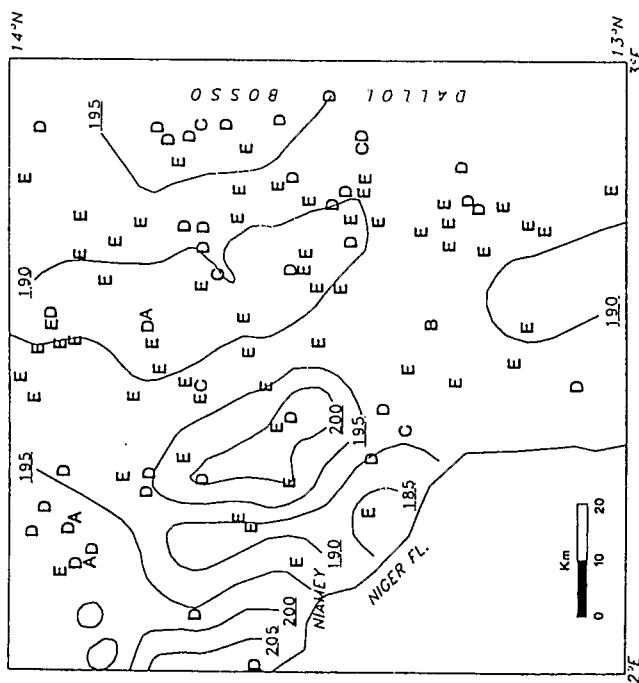


Fig. 1 Carte piézométrique du CT3 du degré carré (juin 1994) et regroupement des puits selon cinq groupes d'après la classification hiérarchique ascendante (cf Fig. 2).

Le fleuve Niger recoupant complètement les dépôts du CT coule sur le socle. Les ensembles aquifères du CT de part et d'autre du fleuve sont donc hydrauliquement indépendants. En rive gauche, les échanges entre fleuve et nappe phréatique ne peuvent se produire que par déversement de celle-ci vers le cours d'eau.

Les mares endoréiques et les cours d'eau temporaires jouent un rôle prépondérant dans l'alimentation de la nappe phréatique (Desconnets, 1994; Leduc & Desconnets, 1994; Leduc *et al.*, 1996a). Ce réseau hydrographique est toujours perché au-dessus de la nappe phréatique dont le niveau piézométrique se trouve entre 2 et 75 m sous la surface du sol (35 m en médiane). Les fluctuations piézométriques de la nappe phréatique sont provoquées par l'infiltration plus ou moins rapide des eaux de surface durant la saison des pluies (juin à septembre). Ces fluctuations sont généralement inférieures à 1 m mais peuvent atteindre 9 m. Elles dépendent principalement des caractéristiques hydrodynamiques locales de l'aquifère et de la distance à la zone d'infiltration, et dans une moindre mesure de la distribution et de l'intensité des pluies. Plusieurs zones à comportement hydrodynamique différent ont été identifiées:

- le nord-ouest du degré carré, où les sédiments peu épais du CT reposent en biseau sur le socle. La piézométrie est élevée et la fluctuation saisonnière très variable sur de courtes distances;
  - une région à l'est de Niamey, également à piézométrie élevée et de forte variabilité annuelle. Le CT, plus épais que dans le secteur précédent, ne renferme cependant qu'un seul niveau aquifère;
  - le dallol Bosso, en bordure orientale du degré carré, est une large vallée fossile rectiligne nord-sud où la nappe est très proche de la surface. Les fluctuations saisonnières sont généralement faibles;
  - le reste de la nappe, à gradients hydrauliques pouvant être aussi faible que 1 pour 10 000 est assez homogène.
- L'infiltration calculée pour 1992 est d'environ  $50 \text{ mm an}^{-1}$ , soit de l'ordre de 10% de la pluie annuelle (Leduc & Desconnets, 1994); elle est sensiblement plus faible pour des années plus sèches.

Sauf éventuellement en bordure nord-ouest du degré carré, il n'y a pas d'échanges naturels significatifs entre la nappe phréatique du CT3 et les horizons plus profonds du CT qui renferment une nappe fortement captive, très minéralisée et à renouvellement extrêmement faible.

### HYDROCHIMIE

#### Conductivité

L'aquifère étudié présente des conductivités faibles (médiane de  $130 \mu\text{S cm}^{-1}$ ). Cependant, la plage de variation est assez large ( $10$  à  $6800 \mu\text{S cm}^{-1}$ ). Certains puits isolés présentent une conductivité particulièrement forte qui pourrait être liée à la présence d'un forage artésien exploitant les niveaux très minéralisés du CT1/2. Outre ces puits isolés, les zones à fortes conductivité sont:

- le dallol Bosso: les valeurs mesurent entre  $30$  et  $2300 \mu\text{S cm}^{-1}$  (morites au sein de la sédimentation continentale et aussi par l'évaporation favorisée). En s'éloignant de la bordure du dallol, la conductivité baisse progressivement jusqu'à des valeurs moyennes de la nappe;
- le nord-ouest, où le biseau des séries sédimentaires en bordure de l'aquifère peut faciliter les échanges avec le CT1/2 et le socle, est caractérisé par une minéralisation beaucoup plus forte, un pH moins acide et une autre distribution des ions majeurs.

Ce découpage de la nappe se superpose avec celui basé sur l'hydrodynamique.

De nombreux puits montrent une hausse saisonnière de la conductivité, généralement concomitante avec la remontée de la nappe. En l'absence d'accroissement significatif de la conductivité sur plusieurs années, l'hypothèse proposée est de lier cette hausse à la hausse piézométrique saisonnière.

## pH

La valeur médiane du pH mesuré in situ dans 255 puits est d'environ 6,0; les valeurs inférieures à 5,0 sont exceptionnelles, celles supérieures à 6,5 sont rares. Il n'y a pas de relation claire entre le pH et la conductivité ou la teneur d'un quelconque ion majeur, sauf  $\text{HCO}_3$ . Les valeurs de pH les plus faibles se rencontrent en bordure nord du degré carré; les plus fortes sont concentrées dans le nord-ouest et une zone du dallol Bosso. Le pH ne semble pas varier au cours de l'année.

## Ions majeurs

La plupart des échantillons sont faiblement minéralisés. Ca et Na constituent plus de 75% des cations, leur proportion étant pratiquement constante. K est toujours faible et Mg plus variable.  $\text{HCO}_3$  et  $\text{NO}_3$ , représentant 80% des anions, le reste étant réparti entre Cl variable et  $\text{SO}_4$  généralement faible ou nul.  $\text{HCO}_3$  domine pour les faibles minéralisations mais il n'augmente pas significativement quand la minéralisation totale croît alors que  $\text{NO}_3$  constitue l'anion essentiel pour les moyennes et fortes minéralisations. Les échantillons les plus minéralisés (conductivité supérieure à  $800 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) montrent une distribution ionique différente se rapprochant généralement de celle caractérisant le CT1/2.

Classification ascendante hiérarchique D'après les classifications ascendantes hiérarchiques (CAH) réalisées sur 130 échantillons (Fig. 2), il existe plusieurs petits groupes de quelques individus fortement différenciés, un groupe médian d'une quarantaine d'individus et un groupe majoritaire à faible variance interne:

- le groupe A est composé de trois puits isolés très fortement minéralisés (de 1300 à  $2600 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) et au faciès hydrochimique proche de celui du CT profond. La cohérence de ce groupe est faible. Il pourrait s'agir d'ouvrages ayant dépassé le mur de la nappe phréatique,
- le groupe B ne comprend qu'un seul puits à minéralisation forte, variable dans le temps et différente de celle CT profond et des autres puits du même village,
- le groupe C est constitué de cinq puits isolés, dont trois à minéralisation forte, de 450 à  $1050 \mu\text{S cm}^{-1}$ , qui ne se retrouvent pas dans les puits voisins. La minéralisation est sans parenté avec celle du CT profond. Les groupes B et C s'expliqueraient par la présence de singularités lithologiques locales,
- le groupe D rassemble une quarantaine d'individus répartis sur l'ensemble du degré carré,

- le groupe E est homogène malgré sa taille (73 prélèvements). Il est peu représenté dans le nord-ouest et dans le dallol Bosso.

La nappe phréatique a donc un faciès hydrochimique globalement homogène, sans différenciation géographique. Les points exceptionnels, assez peu nombreux, correspondent à des singularités locales.

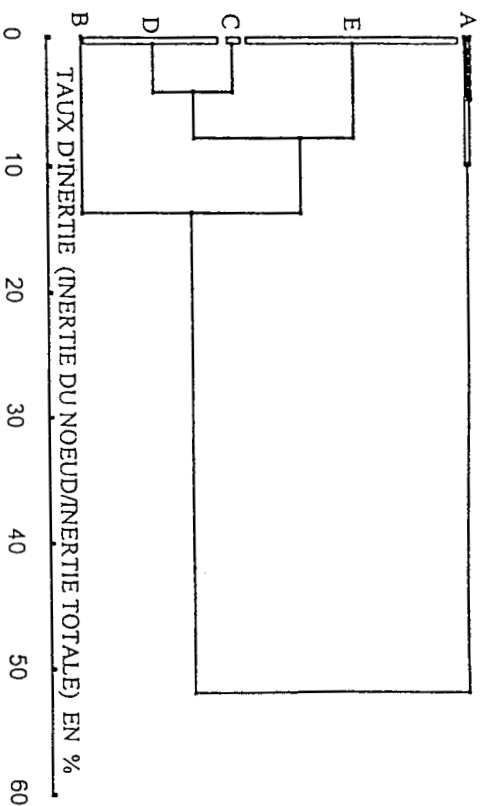


Fig. 2 Arbre de classification hiérarchique ascendante des puits de la nappe phréatique. Groupe A: trois puits; Groupe B: un puits; Groupe C: cinq puits; Groupe D: quarantaine de puits; Groupe E: 73 puits.

Analyse en composantes principales Les analyses en composantes principales (ACP) de 135 échantillons ont été réalisées en prenant les ions majeurs, les conductivités et le pH de terrain comme variables principales. Comme les concentrations des ions majeurs présentent une distribution non normale et que la méthode classique d'ACP utilise des valeurs centrées réduites, l'analyse a porté sur les logarithmes des concentrations.

Il existe une bonne corrélation entre la conductivité et la concentration de chacun des ions Ca, Mg, Na et Cl, ainsi qu'entre celle de Ca et celle de Mg. Par contre, le pH et les concentrations en anions ( $\text{HCO}_3$  et  $\text{SO}_4$ ) sont faiblement corrélés avec les autres variables. Seuls les deux premiers facteurs ont des valeurs propres supérieures à un. Le premier axe, représentant la minéralisation globale des échantillons, est défini par tous les ions, surtout Ca, Mg, Cl et Na, et par la conductivité. Le deuxième axe est dû presque uniquement au pH et à  $\text{HCO}_3$  d'une part et à  $\text{NO}_3$  d'autre part. L'ion  $\text{SO}_4$ , absent dans un tiers des échantillons, est mal représenté dans le plan 1-2. Les analyses effectuées en double sont proches, de même que les prélèvements en provenance de différents puits d'un même village (à l'exception du groupe C).

Equilibre thermodynamique A partir des mesures de pH, température, ions majeurs, Si et Al, un calcul effectué avec le programme Wateqf montre que les solutions sont toujours à l'équilibre ou sur-saturées par rapport au quartz mais sous-saturées par rapport à la silice amorphe et aux carbonates. La plupart des échantillons sont regroupés dans le champ de stabilité de la kaolinite. Le processus d'acquisition de la minéralisation est donc assez homogène dans le degré carré.

## ISOTOPES

## Oxygène 18 et deutérium

La saison des pluies au Sahel se situe entre avril et octobre mais plus de 65% des pluies tombent entre juillet et août. Les pluies de début et de fin de saison sont en général faibles et espacées dans le temps, elles ne font qu'humecter le sol d'où elles sont reprises par évaporation. A Niamey, la composition isotopique de chaque événement entre 1992 et 1995 a été analysée (Taupin *et al.*, 1997). Il existe une grande variabilité de la composition isotopique à l'échelle de l'événement (de +2 à -11‰) mais pendant les mois de juillet et août les températures plus basses et l'effet de masse favorisent une composition isotopique appauvrie et plus homogène (Tableau 1). La moyenne pondérée des quatre années (-3,99‰) est assez proche de celle calculée à N'Djaména pour la période 1965-1978 (-4,11‰) avec la plupart des valeurs comprises entre -3,0 et -5,5‰ d'après AIEA, 1992). La composition isotopique moyenne de la recharge actuelle doit donc être proche de -4‰. A la variabilité temporelle s'ajoute une certaine variabilité spatiale: en 1992, la moyenne annuelle pondérée de 9 stations pluviométriques disposées sur l'ensemble du degré carré de Niamey varie entre -3,6 et -5,1‰.

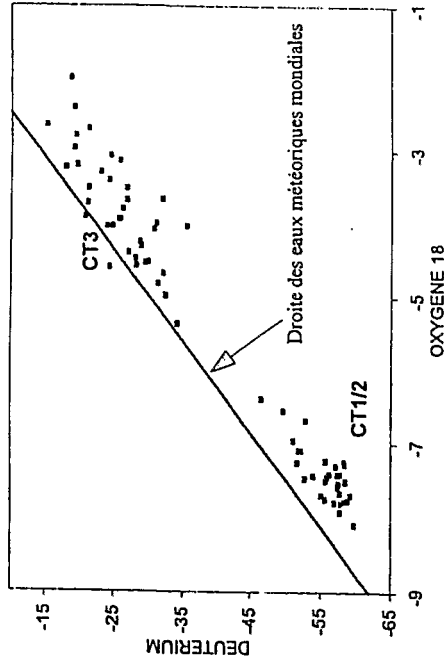
**Tableau 1** Pluviométrie des pluies mensuelles de la saison humide et de la pluie annuelle. Les valeurs  $\delta^{18}\text{O}$  sont pondérées par la hauteur de la pluie. Station de Niamey.

Period	1992	1993	1994	1995
juin	$\delta^{18}\text{O}$ pond -1,14 mm 100,8	$\delta^{18}\text{O}$ pond -1,12 mm 82,1	$\delta^{18}\text{O}$ pond -0,81 mm 75,6	$\delta^{18}\text{O}$ pond -2,39 mm 75,6
juillet	$\delta^{18}\text{O}$ pond -3,71 mm 178,8	$\delta^{18}\text{O}$ pond -0,54 mm 133,5	$\delta^{18}\text{O}$ pond -3,13 mm 162,7	$\delta^{18}\text{O}$ pond -3,59 mm 162,7
août	$\delta^{18}\text{O}$ pond -4,56 mm 157,1	$\delta^{18}\text{O}$ pond -4,15 mm 182,4	$\delta^{18}\text{O}$ pond -7,62 mm 273,0	$\delta^{18}\text{O}$ pond -7,45 mm 273,0
septembre	$\delta^{18}\text{O}$ pond -4,29 mm 34,0	$\delta^{18}\text{O}$ pond -2,27 mm 53,6	$\delta^{18}\text{O}$ pond -6,50 mm 72,3	$\delta^{18}\text{O}$ pond -3,85 mm 72,3
$\delta^{18}\text{O}$ an	-3,50	-2,44	-4,60	-4,99

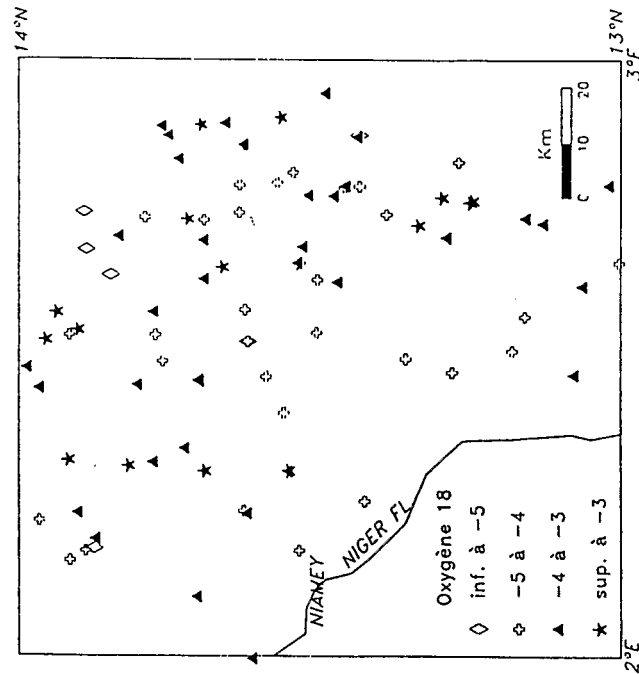
Dans la nappe phréatique (Fig. 3), les valeurs vont de -2,0 à -5,7‰ pour l'oxygène-18 (médiane -3,98‰) et de -15,2 et -34,4‰ pour le deutérium. La variabilité temporelle est faible. La moitié des échantillons présentent des valeurs comprises entre -3,5 et -4,5‰, c'est-à-dire comparables aux précipitations pondérées. Ces résultats sont concordants avec l'hypothèse d'une alimentation sous le régime climatique actuel.

La répartition spatiale des teneurs en oxygène-18 (Fig. 4) montre une forte hétérogénéité avec des gradients isotopiques qui peuvent être localement importants. Ceci rappelle la variabilité spatiale de la pluie déjà évoquée et corrobore bien les résultats hydrodynamiques qui montrent des vitesses latérales d'écoulement faibles, ne permettant pas une bonne homogénéisation de l'aquifère. Plusieurs explications sont émises sur la présence des zones à teneurs isotopiques dissemblables:

- le dallol Bosso, où les rapports isotopiques enrichis peuvent être expliqués par une reprise évaporatoire directe: la faible profondeur de la nappe permet d'atteindre des ambures d'évaporation élevées (Taupin 1990)



**Fig. 3** Teneurs en oxygène-18 et deutérium des différents aquifères du Continental Terminal. CT3: nappe phréatique, CT1/2: aquifères plus profonds.



**Fig. 4** Répartition spatiale de l'oxygène-18 en ‰ dans la nappe phréatique.

en dehors du dallol, certains puits profonds dispersés ont une teneur isotopique très enrichie, supérieure à -2,5‰, associée à une conductivité forte. La position de ces points, nettement sous la droite des eaux météoriques mondiales (Fig. 3), montre un caractère évaporé. L'évaporation à partir de l'aquifère doit être faible puisque le niveau piézométrique est dans ces cas-là à plus de 30 m sous le niveau du sol. L'hypothèse d'une évaporation au moment de l'infiltration est possible et doit vraisemblablement être le signe d'une faible conductivité hydraulique du sol.

au nord-est du degré carré on trouve une zone assez étendue, où les teneurs isotopiques sont appauvries (11 échantillons < -5‰). Seules les pluies les plus importantes de juillet et août qui sont appauvries en isotopes participent à l'alimentation de la nappe. Soit il existe un mélange avec des eaux plus anciennes, comme le laisseraient supposer les activités  $^{14}\text{C}$  de quatre de ces puits variant entre 79 à 84% pCm.

Dans les niveaux capifs plus profonds du CT, les extrêmes sont de -6,5 et -7,9‰ pour  $^{18}\text{O}$  et de -46,4 et -58,9‰ pour  $^2\text{H}$ . Ces valeurs indiquent un climat plus frais et plus humide, donc une infiltration remontant à au moins 4000 ans.

### Tritium

Les valeurs de tritium dans la nappe phréatique varient entre 0,8 et 20,0 UT (médiane de 4 UT) et ne sont pas liées à la profondeur de la nappe. Il n'y a pas d'organisation géographique sauf dans le dallol Bosso où les 3 mesures sont élevées (de 7,9 à 20,0 UT). Un modèle d'évolution de la teneur en tritium de la nappe depuis 40 ans (Leduc *et al.*, 1996b) indique un taux de renouvellement annuel maximum dépassant 5% alors que la médiane est de 0,5%. Avec une épaisseur mouillée de 30 m et une porosité utile de 15%, la teneur médiane en tritium équivaut à une infiltration moyenne sur 40 ans de 22 mm an $^{-1}$ .

### CONCLUSION

Les mesures chimiques et isotopiques réalisées depuis 1991 ont permis de tracer les grands traits de l'hydrochimie de la nappe phréatique du Continental Terminal dans le degré carré de Niamey. Les eaux sont généralement peu minéralisées, les ions les plus importants étant Ca et Na,  $\text{HCO}_3$  et  $\text{NO}_3$ . Les différents traitements statistiques effectués sur les analyses chimiques (classification hiérarchique, analyse en composantes principales) montrent que la plupart des échantillons appartiennent à un groupe assez homogène. Les singularités appartiennent soit à des zones particulières (biseau du CT sur le socle, dallol Bosso) soit à des points isolés au milieu d'un environnement normal. Le découpage géographique basé sur l'analyse hydrochimique se superpose aux grandes unités hydrodynamiques définies sur la base d'observations piézométriques.

Les teneurs en  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$  de la nappe phréatique sont très différentes de celles des nappes captives du CT, plus profondes. Le marquage isotopique de l'évaporation est surtout visible dans le dallol Bosso, là où la nappe est très proche de la surface du sol. Ces teneurs en isotopes stables concordent bien avec les teneurs de la pluie actuelle. Les teneurs en  $^3\text{H}$  et  $^{14}\text{C}$  confirment l'existence d'une recharge actuelle et donnent des taux moyens d'infiltration tout à fait cohérents avec les estimations basées sur les observations hydrodynamiques.

### REFERENCES

- AIEA (1992) Statistical treatment of data on environmental isotopes in precipitation. Technical report 331, Vienna.
- Aranypoti, J.F. & Guerre, A. (1989) Etude des dépressions piézométriques par les isotopes de l'environnement; premières données sur des exemples au Mali. In: *The state-of-the-art of hydrology and hydrogeology in the arid and semi-arid areas of Africa* (ed. by G.E. Stout & M. Demisse), 660-670, Proc. Sahel forum, Ouagadougou, IWRA.
- Desconnets, J.C. (1994) Typologie et caractérisation hydrologique des systèmes endoréiques en milieu sahélien (Niger, degré carré de Niamey). Th. Doctorat, Univ. Montpellier 2, France.
- Greigert, J. & Bernert, G. (1979) Atlas des eaux souterraines du Niger: état des connaissances (mai 1978). Vol. 1, fasc. 5: les nappes du Continental Terminal du synclinal de Dogondouchi. *Rap. BRGM 79/AGE/001*, Orléans, France.
- Leduc, C. & Desconnets, J.C. (1994) Variability of groundwater recharge in Sahelian climate: piezometric survey of the Continental Terminal aquifer near Niamey (Niger). In: *Future Groundwater Resources at Risk* (ed. by J. Soveri & T. Suokko), IAHS Publ. 222, 505-511.
- Leduc, C., Bromley, J. & Schroeter, P. (sous presse) Groundwater recharge in semi-arid climate: some results of the Hapex-Sahel hydrodynamic survey. *J. Hydrol.*
- Leduc, C., Taupin, J.D. & Le Gal La Salle, C. (sous presses) Estimation de la recharge de la nappe phréatique du Continental Terminal (Niamey, Niger) à partir des teneurs en tritium. *C. R. Acad. Sci. Paris, série II*.
- Taupin, J. D. (1990) Evaluation isotopique de l'évaporation en zone non-saturée sous climat sahélien et évolution géochimique des solutions du sol (vallée du Niger). Th. Doct. Sciences, Univ. Paris-sud, Orsay.
- 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: *Hydrochemistry*, IAHS Publ. 244 (ce même numéro).

