

## Hydrogéologie isotopique de la dépression piézométrique du Kadzell (Niger Oriental)

GAËLLE GAULTIER<sup>1,2</sup>, CHRISTELLE MARLIN<sup>1</sup>,  
CHRISTIAN LEDUC<sup>2</sup>, ANNICK FILLY<sup>1</sup> & MARC MASSAULT<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Hydrologie et géochimie isotopique, FRE Orsayterre, Université de Paris sud, F-91405 Orsay Cedex, France*  
[gaultier@msem.univ-montp2.fr](mailto:gaultier@msem.univ-montp2.fr)

<sup>2</sup> *IRD, UMR HydroSciences Montpellier, F-34095 Montpellier Cedex 5, France*

**Résumé** La dépression naturelle fermée de la nappe quaternaire au Niger oriental présente un creux piézométrique d'environ 40 m dans la plaine continentale du Kadzell. Mis en évidence par les radioisotopes (<sup>14</sup>C, <sup>13</sup>C), un vieillissement des eaux vers son cœur souligne la prédominance de la recharge périphérique par les eaux superficielles et la circulation lente dans cet aquifère argilo-sableux. En effet les bordures sont maintenues et alimentées principalement par la rivière Komadougou Yobé, par percolation des précipitations sur la plage de Sayam au Nord et enfin par le lac Tchad. Les eaux anciennes (11 500 ans) isotopiquement ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ) les plus appauvries suggèrent une paléorecharge lors du maximum humide holocène. Leurs teneurs en chlorures voisines de celles du lac Tchad évoquent une submersion lacustre de la plaine pendant cette phase humide. Puis l'aridification du climat a entraîné un bilan (transferts latéraux depuis les bordures—évapotranspiration au centre de dépression) déficitaire responsable du creusement de la nappe.

**Mots clés** aquifère libre; dépression piézométrique; isotopes; paléorecharge; Sahel

**Key words** groundwater; hollow aquifer; isotopes; past recharge; Sahel

### INTRODUCTION

Sur l'ensemble de la bande sahélienne, de nombreuses dépressions piézométriques existent au sein des nappes phréatiques des grands bassins sédimentaires. Actuellement, leur origine la plus vraisemblable semble être liée à deux paramètres: (a) l'existence d'un déficit du flux de recharge de la nappe vis-à-vis du flux d'évapotranspiration, et (b) la faible perméabilité latérale des aquifères. D'autres hypothèses ont été évoquées comme la tectonique ou les oscillations marines mais jusqu'ici peu étayées (Dieng, 1990).

La nappe phréatique du Niger oriental, contenue dans l'important bassin endoréique du lac Tchad, n'échappe pas à ce schéma hydrogéologique. Réservoir quaternaire d'origine continentale reposant sur une épaisse formation argileuse qui l'isole de l'aquifère pliocène artésien sous-jacent, la nappe est déprimée de plus de 40 m dans la plaine du Kadzell située à l'extrême SE du pays à la frontière du Nigéria (Fig. 1).

### Le contexte régional

La plaine du Kadzell, d'une superficie d'environ 7500 km<sup>2</sup>, est bordée au nord et à l'ouest par l'ancien erg du Manga, à l'est par la plage du lac Tchad et au sud par la Komadougou Yobé, l'unique rivière du site (Fig. 1). Cette plaine est plus argileuse que les autres formations quaternaires du Niger oriental, ce qui entraîne une morphologie planaire dont l'altitude décroît lentement de 320 m à 290–285 m vers le cordon lacustre.

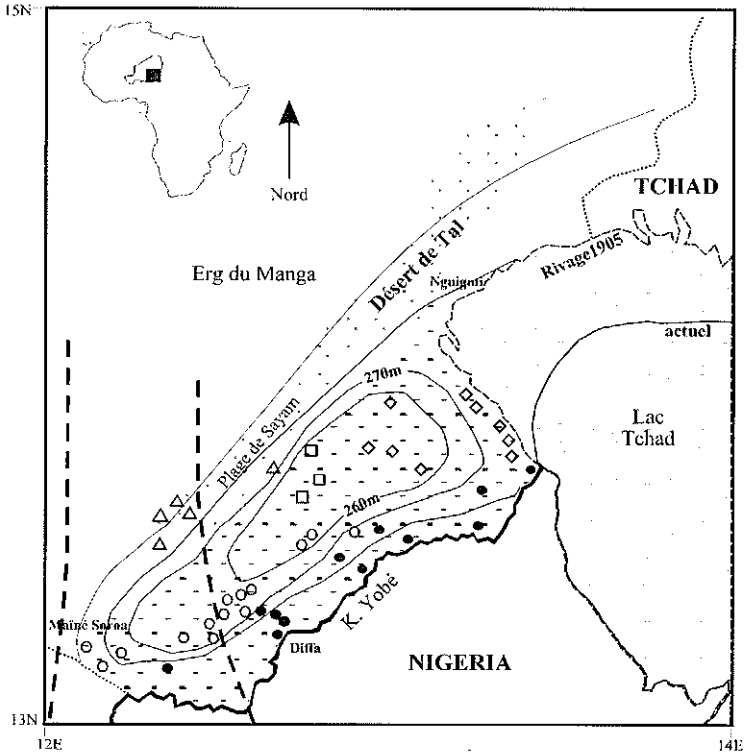


Fig. 1 Carte piézométrique de la nappe phréatique dans la plaine du Kadzell.

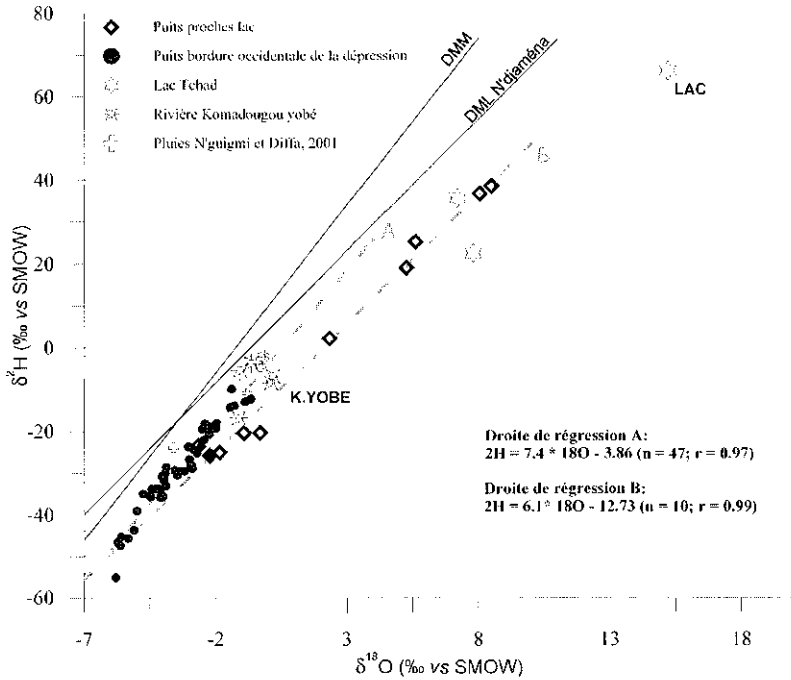
- |   |                                   |     |                                |
|---|-----------------------------------|-----|--------------------------------|
| ◆ | Puits influencés par le lac       | ○   | Puits intermédiaires           |
| △ | Puits sur la plage de Sayam       | □   | Puits au cœur de la dépression |
| ● | Puits influencés par la K. Yobé   | — — | Fossé de N'dgel edgi           |
| — | Courbe isopièze de la nappe libre |     |                                |

D'un point de vue climatique, la région est soumise à un régime de type sahélien, contrôlé par les fluctuations latitudinales annuelles du front de mousson venant du golfe de Guinée. Le Kadzell connaît une unique saison des pluies de juin à septembre où environ 90% des pluies tombent aux mois de juillet et août provoquant l'engorgement du sol argileux. Le site d'étude se situe ainsi entre les isohyètes 450 mm à Maïné Soroa (à l'ouest) et 200 mm à Nguigmi (au nord).

Les aquifères plio-quaternaires représentent la seule ressource permanente en eau. De nombreux puits ont donc été forés dans la plaine et permettent ainsi une observation dense de la nappe libre, nécessaire pour comprendre l'hydrodynamisme et la mise en place de la dépression.

### La distribution spatiale des résultats isotopiques

Tous les prélèvements pour analyses isotopiques ( $^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $^{13}\text{C}_{\text{C}_{11}\text{D}}$ ,  $^{14}\text{C}_{\text{C}_{11}\text{D}}$ ,  $^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ ) et analyses des éléments majeurs ont été effectués dans des puits captant la surface de la nappe. Les valeurs du pH varient peu et sont comprises entre 6.9 et 8.0 pour une température moyenne de la nappe de 30°C. Par contre, la conductivité électrique s'échelonne de 200  $\mu\text{s cm}^{-1}$  sur les bordures de la dépression jusqu'à 4700  $\mu\text{s cm}^{-1}$  pour les puits les plus profonds.



**Fig. 2** Teneurs en  $\delta^2\text{H}$  et en  $\delta^{18}\text{O}$  pour les eaux de la nappe quaternaire. DMM: droite météorique mondiale (Craig, 1961),  $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$  DML: droite météorique locale de N'djaména,  $\delta^2\text{H} = 6.3 \delta^{18}\text{O} + 4.2$  (GNIP-OMM, 1964–1978 et 1995).

Les activités  $^{14}\text{C}$  ( $A^{14}\text{C}$ ) réparties sur l'ensemble de la plaine s'échelonnent dans une large gamme entre 110 et 24 pCm selon une organisation spatiale centripète avec une décroissance de l'activité depuis les bordures jusqu'au cœur de la dépression. Bien que certains auteurs mentionnent la présence de carbonates sur quelques profils superficiels de la plaine (Durand *et al.*, 1984), l'indépendance des données  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $A^{14}\text{C}$  et du CITD suggère plutôt que l'activité mesurée est directement liée au temps de séjour de l'eau dans l'aquifère et n'oblige pas à une correction des activités mesurées de la dissolution de carbonates anciens de la matrice.

Les isotopes stables varient largement, de  $-5.8\text{‰}$  à  $0.9\text{‰}$  vs VSMOW pour  $\delta^{18}\text{O}$  et  $-55\text{‰}$  à  $+10\text{‰}$  vs VSMOW pour  $\delta^2\text{H}$ . Tous les points se situent sous la droite météorique locale, signe d'un fractionnement lors de l'évaporation. Dans un diagramme  $\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$ , deux ensembles, dont l'origine sera ultérieurement détaillée, se distinguent selon leurs répartitions géographiques (Fig. 2): (a) un groupe A réparti selon une droite de régression sensiblement parallèle à la droite des eaux météoriques mondiales (DMM) et regroupant les puits situés entre le cœur de la dépression, la rivière et la plage de Sayam; (b) un groupe B, représentant tous les puits localisés à proximité du lac, aligné selon une droite de pente plus faible qui suppose une reprise évaporatoire plus marquée (Fontes, 1976).

## LES POLES ACTUELS DE RECHARGE VERS LA NAPPE LIBRE

**L'influence majeure de la Komadougou Yobé** Les eaux prélevées le long de la rivière à une distance maximale de 15 km de ses berges présentent les mêmes caractéristiques isotopiques (c.  $-1\text{‰}$  vs VSMOW) et chimiques (faciès bicarbonaté calcique) que la rivière

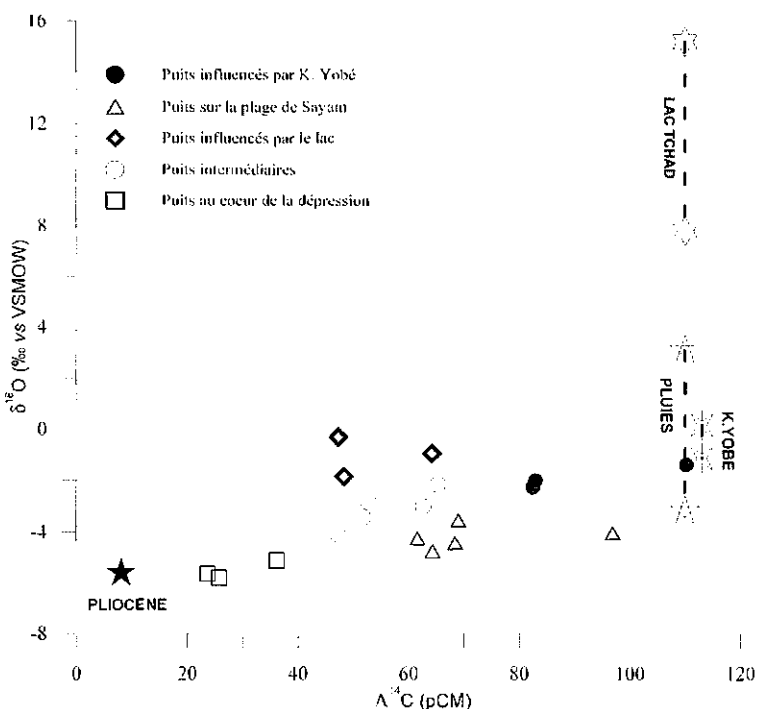


Fig. 3 Teneurs en  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\Delta^{14}\text{C}$  par la nappe phréatique et ses tributaires.

Komadougou Yobé et des  $\Delta^{14}\text{C}$  proches de 110 pCm, signe d'une recharge récente (Fig. 3). La rivière joue donc actuellement un rôle essentiel pour la recharge des eaux souterraines pendant son écoulement de juillet à février. En parallèle, les observations piézométriques régulières de la rivière et de l'aquifère en périphérie immédiate de la rivière (500 m maximum) montrent le synchronisme des régimes. Les variations saisonnières enregistrées, uniques sur la plaine du Kadzell, indiquent une percolation rapide vers la nappe qui est isotopiquement perceptible vers le mois de novembre. Ce retard de quelques mois après le début de la crue peut être attribué à l'inertie de la nappe ou bien à une infiltration préférentielle au travers de la plaine d'inondation d'extension maximum à cette période comme le démontre Goes (1999) en amont de la rivière Komadougou Yobé au Nigéria.

**L'infiltration directe des pluies depuis la plage de Sayam** La plage de Sayam surplombe la plaine d'une quinzaine de mètres et délimite la frontière entre les sables éoliens de l'erg ancien du Manga et les dépôts palustro-lacustres du Kadzell. Les eaux échantillonnées affichent des  $\Delta^{14}\text{C}$  comprises entre 96 pCm au sommet et 60 pCm au pied du plateau (Fig. 3). Les eaux y sont faiblement minéralisées (de 210 à 634  $\mu\text{s cm}^{-1}$ ) et leurs faciès chimiques affichent notamment une faible concentration en sodium ( $< 43 \text{ mg l}^{-1}$ ) qui se démarque très nettement des puits de la plaine ( $> 76 \text{ mg l}^{-1}$ ). La granulométrie beaucoup plus sableuse que dans la plaine du Kadzell favorise la recharge directe par les précipitations et limite aussi la reprise évaporatoire, comme suggérée par Dincer (1974). Les teneurs en  $\delta^{18}\text{O}$  comprises entre  $-4.3\text{‰}$  et  $-3.6\text{‰}$ , proches de celles des précipitations du mois de juillet et août de Diffa ( $-2.7\text{‰}$ ) et Nguigmi ( $-4.4\text{‰}$ ), démontrent ainsi que la plage de Sayam représente une seconde zone d'infiltration actuelle vers la nappe libre.

**La bordure orientale de la dépression piézométrique en liaison avec le lac Tchad** Les eaux les plus évaporées, selon la droite de régression B, sont toutes situées sur la bordure orientale de la dépression non loin des rives du lac Tchad (Fig. 1). Alors que l'écoulement dans la nappe phréatique est globalement du nord-ouest vers le sud-est au Niger oriental et semble converger vers le lac, les gradients hydrauliques actuels s'inversent sur la bordure Est de la dépression. Le lac Tchad devient alors localement une recharge potentielle de l'aquifère. Celui-ci montre un fort enrichissement isotopique sous l'effet de l'importante reprise évaporatoire (3200 mm an<sup>-1</sup>): les teneurs en <sup>18</sup>O s'échelonnent entre +7‰ et +16‰ vs VSMOW (Roche, 1980). Cette distinction permet d'évaluer par un traçage isotopique l'impact de l'infiltration d'eau du lac vers la nappe.

Mais aujourd'hui, les apports du lac sont fluctuants dans le temps et l'espace. En raison de sa morphologie très plane et peu profonde, sa superficie est très sensible à la moindre modification du régime d'écoulement de ses tributaires. Alors qu'au début du siècle les descriptions par des explorateurs montraient un lac bordant la ville de Nguigmi, aujourd'hui la cuvette septentrionale n'est inondée que de septembre à février, voire exondée toute l'année comme ce fut le cas à la fin des années 1970 (Olivry *et al.*, 1996). L'alimentation de la nappe par le lac se trouve alors fortement compromise. En bordure du lac, certains niveaux piézométriques ont baissé d'environ 10 m depuis les années 1970 suite à la sécheresse. Des mesures d'activités en <sup>14</sup>C de puits proches du lac actuel permettraient d'évaluer l'évolution de l'infiltration du lac vers la nappe. Il est donc possible que la signature fortement évaporée de la nappe phréatique observée aujourd'hui dans des secteurs distants de quelques kilomètres des rives du lac actuel soit le reflet d'une infiltration lacustre passée.

## MISE EN PLACE DE LA DÉPRESSION PIEZOMETRIQUE

Les eaux les plus anciennes échantillonnées (11500 ans ± 3600 ans BP) se trouvent au cœur de la dépression. Ces eaux ont les signatures en <sup>18</sup>O les plus appauvries, proche de -5‰ (Fig. 3). Exempt de toute infiltration actuelle à plus de 40 m de profondeur, le cœur de la dépression présente aussi une concentration en chlorures (41 mg l<sup>-1</sup>) jusqu'à 50 fois plus élevée que celles des puits aux abords de la rivière (11 mg l<sup>-1</sup>) ou de la plage de Sayam (5 mg l<sup>-1</sup>) mais proche des puits influencés par le lac Tchad (46 mg l<sup>-1</sup>). D'après Servant (1973), l'Holocène entre 10300 et 8000 ans BP était plus humide en Afrique de l'Ouest, entraînant donc des surfaces lacustres plus étendues et des niveaux phréatiques sub-affleurants. L'hypothèse de l'existence d'un immense paléolac Tchad à 320 m d'altitude qui aurait saturé la nappe libre avec une signature isotopique inférieure à -5‰ sur la plaine du Kadzell est possible (Gasse, 2002). Puis l'aridification de la région dans les derniers 8000 ans aurait conduit: (a) au retrait du lac Tchad, (b) à l'allongement du cours de la Komadougou Yobé, et (c) à l'abaissement de la nappe phréatique.

## DISCUSSION SUR LE CREUSEMENT DE LA NAPPE PHREATIQUE

La formation de la dépression du Kadzell ne peut pas s'interpréter comme conséquence des variations du niveau marin ou d'une surexploitation de l'aquifère en raison du contexte géographique et social. L'hypothèse tectonique est aussi à rejeter bien que le fossé de N'gel Edji traverse la plaine. Aucun indice net ne permet d'avancer que ces failles N-S ont une activité récente qui aurait provoqué l'effondrement de la nappe libre. De plus, cet accident

tectonique aurait été un chemin privilégié de drainance de l'aquifère artésien pliocène vers la nappe libre. Or, les mesures isotopiques réalisées ne montrent pas de mélange entre le pôle isotopique des eaux de surface et celui de la nappe pliocène ( $\delta^{18}\text{O}$  c.  $-5.6\text{‰}$  vs VSMOW;  $\text{A}^{14}\text{C}$  c. 8 pCm) (Fig. 3). En fait, l'hypothèse d'une reprise évapotranspiratoire au centre de la dépression supérieure aux flux latéraux dans ce contexte argilo-sableux semble être l'explication la plus probable.

Les chroniques piézométriques récentes (5 ans) des puits au centre de la dépression montrent une baisse graduelle de la nappe de 1 à 4 cm  $\text{an}^{-1}$  pour une reprise évaporatoire estimée à 0.08 mm  $\text{an}^{-1}$  d'après la modélisation de Leduc *et al.* (1998). La dégradation pluviométrique et les disparitions temporaires du lac Tchad dans la cuvette septentrionale ces dernières décennies peuvent expliquer ce creusement piézométrique. Mais il faut aussi envisager que la nappe soit toujours à état transitoire depuis l'aridification du climat après le dernier maximum humide holocène et que l'alimentation depuis les bordures (rivière, lac et plage de Sayam) ne suffit toujours pas à compenser les flux verticaux ascendants au sein de cet aquifère. Les relevés piézométriques anciens ne permettent pas de trancher. La modélisation numérique permettra de déterminer lequel de ces deux mécanismes est le plus réaliste.

## CONCLUSION

Alors que 1500 km plus à l'ouest, la dépression du Kori de Dantiandou connaît une remontée piézométrique spectaculaire depuis 50 ans suite à une mise en culture massive (Favreau *et al.*, 2002), la dépression du Kadzell semble au contraire continuer à se creuser. La diminution, depuis plusieurs années, des ressources en eaux superficielles comme le lac Tchad ou la rivière Komadougou Yobé, a certainement un impact sur la nappe phréatique qu'il convient de préciser. La prochaine étape sera donc une modélisation numérique de la piézométrie actuelle et passée pour comparer les reconstitutions isotopiques et hydrodynamiques et notamment pour quantifier les principaux processus en oeuvre.

## REFERENCES

- Dincer, T., Al-Mugrin, A. & Zimmermann, U. (1974) Study of the infiltration through the sand dunes in arid zones with special reference to the stable isotopes and thermonuclear tritium. *J. Hydrol.* **23**, 79–109.
- Dieng, B., Ledoux, E. & de Marsily, G. (1990) Palaeohydrogeology of the Senegal sedimentary basin: a tentative explanation of the piezometric depressions. *J. Hydrol.* **118**, 357–371.
- Durand, A., Fontes, J. Ch., Gasse, F., Icole, M. & Lang, J. (1984) Le Nord-ouest du lac Tchad au Quaternaire: étude de paléoenvironnements alluviaux, éoliens, palustres et lacustres. *Palaeoecology of Africa* **16**, 215–243.
- Favreau, G., Leduc, C., Marlin, C. & Guéro, A. (2002) Une dépression piézométrique naturelle en hausse au Sahel (sud-ouest du Niger). *C. R. Géoscience* **334**, 395–401.
- Fontes, J. Ch. (1976) Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles: quelques aspects. Thèse d'état, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France.
- Gasse, F. (2002) Diatom-inferred salinity and oxygen isotopes in Holocene waterbodies of the western Sahara and Sahel (Africa), implications for climate and water resources variability. *Quatern. Sci. Rev.* **21**(7), 737–767.
- Gocs, B. J. M. (1999) Estimate of shallow groundwater recharge in the Hadejia-Nguru wetlands, semi-arid north-eastern Nigeria. *Hydrogeology J.* **7**, 294–304.
- Leduc, C., Ousseini, S. & Leblanc, M. (1998) Evolution des ressources en eau dans le département de Diffa (bassin du lac Tchad, sud-est nigérien). *Variabilité des ressources en eau en Afrique au XX<sup>ème</sup> siècle* (ed. by Eric Servat, Denis Hughes, Jean-Marie Fritsch & Mike Hulme) (Proc. Abidjan'98 conf., nov. 98), IAHS Publ. no. 252.
- Olivry, J.C., Chouret, A., Vuillaume, G., Lemoalle, J. & Bricquet, J. P. (1996) Hydrologie du lac Tchad. *Monographie hydrologique ORSTOM 12*.
- Roche, M.A. (1980) Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du lac Tchad. *Travaux et documents de l'ORSTOM 117*.
- Servat-Vildary, S. (1973) Etude des diatomées et paléolimnologie du bassin tchadien au Cénozoïque supérieur. *Travaux et documents de l'ORSTOM 84*.