

Étude des écoulements souterrains dans le bassin de Bilma-Djado à l'aide des isotopes de l'environnement

Groundwater flow study in the Bilma–Djado Basin (Niger) by means of environmental isotopes

Abdelkader DODO¹ et Gian Maria ZUPPI²

¹ Département de géologie, Faculté des sciences, Université Abdou-Moumouni, BP 10662, Niamey, Niger ;

² Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino, Via Valperga-Caluso 37, 10125 Turin, Italie

RÉSUMÉ

Les isotopes stables ¹⁸O et ²H et radioactifs ³H et ¹⁴C ont permis d'identifier un écoulement général d'est en l'ouest du Tibesti au bassin du Djado et, dans une moindre proportion, nord-sud selon la direction de la flexure de Bilma (axe du synclinal). Une autre composante existe du nord-est vers le sud-ouest à la faveur d'inféro-flux d'oueds descendant le Hoggar. Les principales aires de recharge des aquifères sont les massifs du Tibesti et la bordure orientale du Hoggar. La présence de tritium permet d'envisager le phénomène de drainance : jusqu'à $2,5 \pm 1,0$ UT dans le Cambrien, $1,8 \pm 1,0$ UT dans le Viséen, $2,9 \pm 1,0$ dans le Continental intercalaire CI. Le Cambrien alimente par drainance le Carbonifère et le CI. L'exutoire principal est caractérisé par l'évaporation des eaux des aquifères excepté celles du Cambrien ; en effet, ces dernières sont proches de la droite météorique locale des régions arides et semi-arides $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 5$. Les variations piézométriques saisonnières sont la conséquence, à la fois d'un transfert de masse des précipitations sur les massifs et de la charge dans les aquifères (drainance).

Mots clés : Bassin sédimentaire, Aquifère, Isotopes, Recharge, Drainance, Zone aride, Niger

ABSTRACT

Stable (²H and ¹⁸O) and radioactive isotopes (³H and ¹⁴C) allow the identification of the pattern of the regional groundwater flow in the Bilma–Djado basin. The general trends of groundwater flow are from the east (Tibesti) to the west (Djado basin), and, to a minor extent, north-south along the Bilma ridge. Another component has been noticed linked to wadis subsurface runoff flowing from Hoggar towards the south-east. The main recharge areas for the aquifers are the Tibesti massif (Holocene recharge) and the eastern border of the Hoggar (present day recharge). The presence of tritium indicates an upward leakage from the Cambro-Ordovician aquifer (2.5 ± 1.0 TU) to the Viséan aquifer (1.8 ± 1.0 TU) and the Continental Intercalaire aquifer (2.9 ± 1.0 TU). The main discharges are the direct evaporation of the aquifers and some springs in the border of the Bilma-Djado basin supplied by the Cambrian aquifer. Only in this case, the waters are not affected by the isotopic fractionation effect and lie close to the classical meteoric water line for groundwater recharged during Holocene (5‰).

Keywords: Sedimentary basin, Aquifer, Isotope, Recharge, Leakage between aquifers, Arid zone, Niger

Abridged version (see p. 850)

Note présentée par Jean Dercourt

Note remise le 24 février 1997, acceptée après révision le 22 août 1997

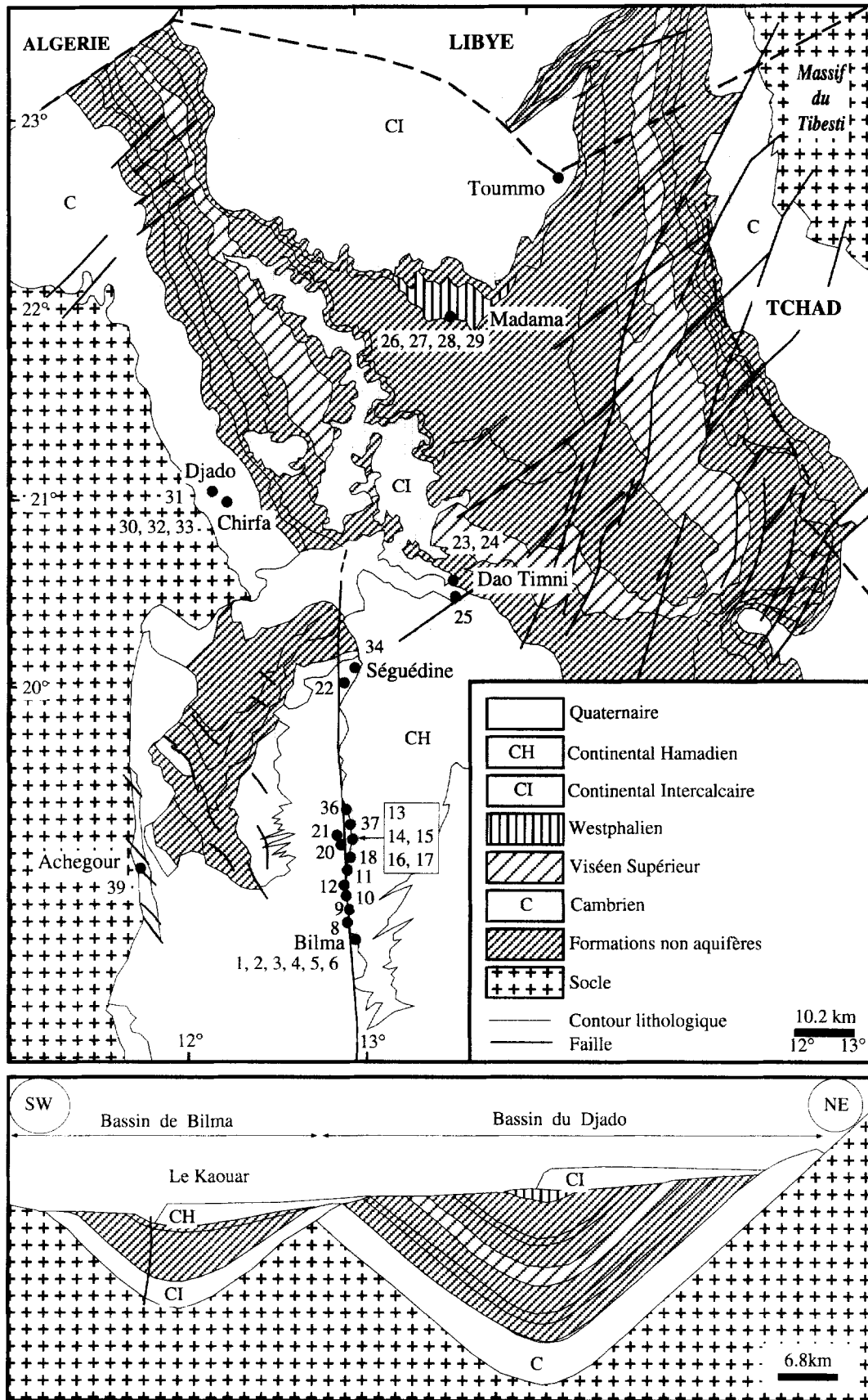


Figure 1. Carte hydrogéologique du bassin de Djado-Bilma avec une coupe NE-SW.

Hydrogeological map of the Djado-Bilma basin with a north-east-south-west section.

I. Introduction

Le bassin de Djado-Bilma occupe la partie nord-est du Niger, entre les longitudes 11° et 16° et les latitudes 18° et 23° (figure 1). Il est caractérisé en moyennes annuelles par une pluviosité de 10 mm, une température de 27 °C, une humidité relative de 13 %, une évapotranspiration potentielle de 4 500 mm (Desconnets, 1994). Le flux évaporatoire, mesuré à Bilma, en fonction de la profondeur de la nappe est de 900 mm/an à 25 cm et de 10 mm/an environ à 2 m de profondeur (Aranyossy et al., 1991 ; Joseph et al., 1992). L'analyse des variations des isotopes du milieu (oxygène-18, deutérium, tritium, carbone-14) dans les aquifères gréseux du bassin (Cambrien, Viséen supérieur, Westphalien terminal, Continental Intercalaire, Continental Hamadien, Quaternaire), tente de répondre aux questions suivantes :

- 1) une recharge actuelle locale de l'aquifère du Cambrien de haute altitude du Plateau de Djado est-elle possible ? Dans l'affirmative, quelle est son importance ?
- 2) les fluctuations piézométriques des eaux souterraines (de 20 à 50 cm environ) observées chaque année dans les oasis traduisent-elles une réponse directe des précipitations dans les zones de plus haute altitude ou seulement un transfert de charge dans les aquifères ?
- 3) y a-t-il des phénomènes de drainance entre les aquifères ou les aquifères sont-ils tous parfaitement isolés ? Quelles sont les directions des écoulements souterrains dans la région ?

Les réponses attendues doivent apporter des précisions sur la stratégie de gestion de la ressource en eau à adopter et identifier ces nappes comme des archives des changements climatiques durant le Quaternaire.

II. Le Paléozoïque du Plateau du Djado

1. La nappe du Cambrien

Les teneurs en isotopes stables dans ces eaux souterraines sont assez groupées (figure 2) : $-10,73 \pm 0,47$ pour ^{18}O et $-82,6 \pm 2,2$ pour le ^2H . Les points sont situés sous la droite mondiale des eaux météoriques selon une droite d'équation $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 5$. Cet excès en deutérium de + 5 ‰, observé dans la plupart des eaux souterraines au Sahara et au Ténére (Sonntag et al., 1978 ; Dray et al. 1983 ; Moser et al., 1983 ; Guendouz, 1985 ; Rozanski, 1985 ; Fontes et al., 1993), traduirait les conditions climatiques de température et d'humidité existantes à la surface des bassins évaporants (océans ou lacs), au moment de l'existence des masses d'air humides (Merlivat et Jouzel, 1979 ; Martinelli et al., 1996).

Les teneurs en ^{14}C du carbone inorganique total dissous (CITD) indiquent une origine relativement récente de ces eaux. Les points de la relation ^{14}C en fonction de la teneur en ^{18}O également obtenue à partir des données des bassins du Djado (tableau) et de Téloua (Roussin-Bariac, 1985), s'organisent autour d'une courbe (figure 3), qui

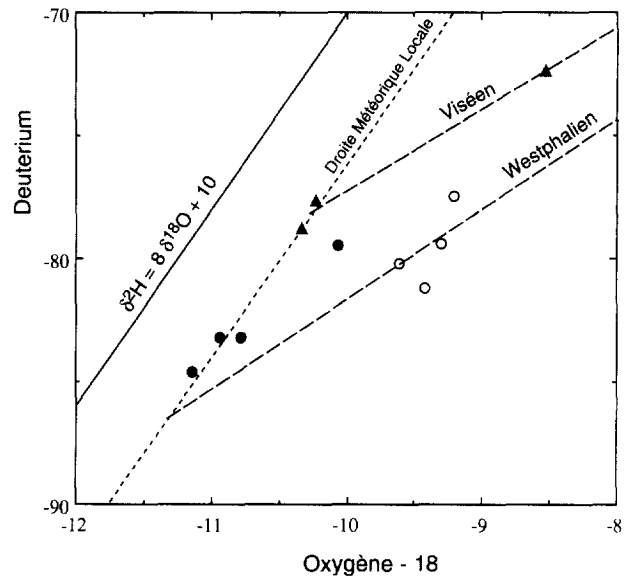


Figure 2. Relation $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ vs SMOW dans les eaux du Plateau du Djado. ○ Westphalien ; ▲ Viséen ; • Cambrien.

Stable isotope composition of Djado groundwaters relative to the SMOW standard. ○ Westphalian; ▲ Visean; • Cambrian.

décrit une dilution entre des eaux anciennes et des eaux actuelles dont la composition isotopique serait respectivement de $-11,5$ ‰ et de $-4,0$ ‰.

Si de nos jours, les faibles pluviosités isotopiquement plus enrichies, constituent l'essentiel de la recharge des aquifères à nappe libre, pour le passé en revanche, d'autres aires et types de recharge beaucoup plus importants doivent être considérés. En effet, ceux-ci pourraient être le fait des zones montagneuses du Tibesti dont la structure très faillée des terrains cristallophylliens permet une infiltration rapide des eaux des précipitations et du ruissellement issus de ce massif (Siegenthaler et al., 1972), comme cela a déjà été observé dans l'Aïr et dans les aquifères paléozoïques au pied du massif (Dray et al., 1983 ; Aranyossy et al., 1983). L'appauvrissement de ces eaux anciennes peut être expliqué par l'effet de continentalité affectant les eaux météoriques, semblable à celui qui a été mis en évidence dans le Nord Sahara d'ouest en est (Sonntag et al., 1978). A l'effet de continentalité (Mathieu et al., 1995) s'ajoute celui d'un gradient d'altitude (Gallaire et al., 1995), semblable à celui actuellement observé, tant dans des régions tempérées des Alpes (Siegenthaler et al., 1980 ; Rozanski, 1985) que tropicales du Mont Cameroun (Fontes et Olivry, 1977 ; Gonfiantini, 1995).

La circulation souterraine des eaux se ferait d'est en ouest pour la composante plus ancienne et profonde et probablement du nord-ouest vers le sud-est pour la composante actuelle, à la faveur d'inféro-flux d'oueds descendant du Hoggar semblables à ceux décrits dans le Sud de l'Aïr (Gallaire, 1995). Les variations piézométriques saisonnières, observées régulièrement dans ces points d'eau, seraient la conséquence à la fois d'un transfert de masse et de la charge hydraulique.

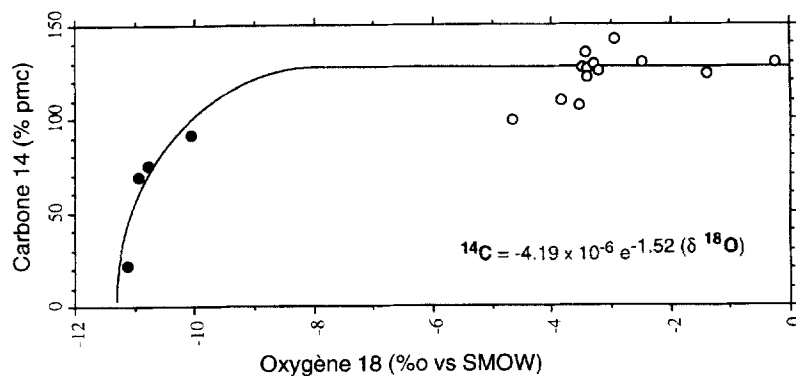


Figure 3. Relations entre la teneur en carbone 14 et l'oxygène 18 des eaux du Cambrien, avec : • données de la présente note ; ○ données issues des travaux de Roussin-Barriac, 1985.

Relationships between ^{14}C (%modern) and $\delta^{18}\text{O}$ (‰ vs SMOW) of Cambrian groundwaters, with • data from the present publication, and ○ data from Roussin-Barriac, 1985.

2. Les nappes du Carbonifère

Les teneurs en ^{18}O se répartissent entre $-10,33\text{‰}$ et $-8,53\text{‰}$ par rapport au SMOW. Le diagramme $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ (figure 2) montre que seulement deux points sont alignés sur la droite de pente 8 et d'ordonnée à l'origine de $+5\text{‰}$, définie précédemment. Les autres points s'inscrivent nettement en dessous de la ligne météorique locale, dans le domaine des eaux dites évaporées.

Les points d'intersection avec la droite des eaux météoriques indiquent les teneurs moyennes en ^{18}O et en ^2H des eaux des nappes avant fractionnement. Le fait que les intersections des droites viséenne et cambrienne présentent une différence d'environ 1δ pour l'oxygène 18 montre que ces eaux, malgré un âge comparable (activités en ^{14}C équivalentes), avaient une origine différente qui pourrait correspondre à une altitude de recharge variable favorisée par la discontinuité de l'aquifère, liée à la tectonique.

En revanche, la présence du ^{14}C moderne dans les eaux de Madama et la haute teneur en sels dissous indiquent, pour les points de la droite « Westphalienne », une origine de mélange dont le pôle des eaux profondes retrouve, au niveau piézométrique de -3 m , les eaux des événements pluvieux locaux très appauvries (Gallaire, 1995) qui lessivent, au moment de l'infiltration, les couches superficielles riches en sulfates (Greigert et Pougnet, 1965).

3. Les aquifères du Paléozoïque

Les aquifères paléozoïques montrent un caractère à la fois assez homogène et appauvri en isotopes stables. Les eaux du Cambrien et du Viséen n'ont pas subi d'évaporation. Ces aquifères se présentent ainsi en réservoirs d'eaux souterraines héritées des périodes holocènes dont les conditions climatiques étaient différentes de l'actuel. Toutefois, la présence du carbone moderne dans le réservoir westphalien et en plus du tritium ($2,5 \pm 0,1\text{ UT}$) dans le Cambrien, témoignent de leur réalimentation actuelle par les eaux d'oueds descendant du Hoggar et du Tibesti, lors d'événements pluvieux exceptionnels. Enfin, il n'est pas impossible qu'une drainage verticale s'effectue des eaux du Cambrien (en provenance du Tibesti) vers celles du Carbonifère susjacent. La différence isotopique refléterait une zonation géographique avec les valeurs les plus négatives au nord, correspondant à une altitude plus élevée du massif cristallin.

III. Le Continental intercalaire

Le Continental intercalaire, dénommé grès de Nubie dans la région, est à nappe libre dans le bassin du Djado et à nappe captive dans le bassin de Bilma. Les teneurs en ^{18}O se répartissent entre $-10,44\text{‰}$ et $-7,01\text{‰}$ par rapport au SMOW. Le diagramme $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ (figure 4) montre que tous les points s'inscrivent nettement en dessous de la ligne météorique locale, indiquant que les eaux sont toutes plus ou moins affectées par les phénomènes d'évaporation.

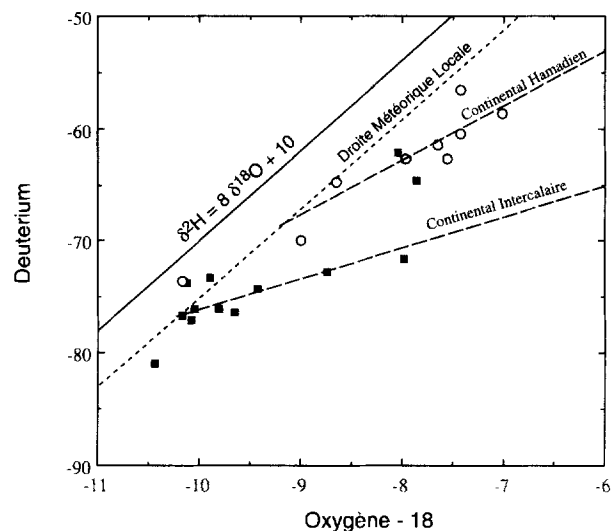


Figure 4. Relation $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ vs SMOW dans les eaux du Mésozoïque. ○ Continental hamadien ; ■ Continental intercalaire.

Stable isotope composition of Cenozoic groundwaters relative to the SMOW standard. ○ Continental Hamadien; ■ Continental Intercalaire.

Dans le bassin de Bilma, le Continental intercalaire affleure de Séguédine jusqu'au sud de Bilma, formant la falaise du Kaouar. Celle-ci est jalonnée par une multitude de points d'eau dont le faciès isotopique est à la fois caractéristique de mélange et d'évaporation, défini par la relation suivante :

$$\delta^2\text{H} = (3,10 \pm 0,25) \delta^{18}\text{O} - (46,0 \pm 2,0)$$

L'intersection de la droite d'évaporation et de la droite météorique locale indique une provenance proche de

Tableau. Données relatives aux écoulements souterrains des bassins du Djado (Niger).

Data on groundwater flow in Djado basins (Niger).

Code	Site	Aquifère	Cond ($\mu\text{S/cm}$)	3H (UT)	$\delta^2\text{H}$ (‰ vs SMOW)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ vs SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ PDB)	^{14}C (% PMC)	Age corrig.
1	Bilma	Cont. Int.	195	$0,4 \pm 1,0$	-64,6	-7,87	-6,80	$41,5 \pm 1,4$	$0 \pm 3\ 000$
2	Bilma	Cont. Ham.	320	$0,9 \pm 1,0$	-61,4	-7,65			
3	Bilma	Cont. Ham.	150	$0,9 \pm 1,0$	-58,6	-7,01			
4	Bilma	Quater.	495	$0,7 \pm 1,0$	-62,7	-7,97			
5	Bilma	Cont. Int.	185	$0,7 \pm 1,0$	-62,1	-8,05			
6	Bilma	Quater.	620	$0,5 \pm 1,0$	-64,8	-8,65			
7	Bilma	Lac	8 750	$1,5 \pm 1,0$	-6,5	+3,80			
8	Agguer	Cont. Ham.	290	$1,3 \pm 1,0$	-60,5	-7,42			
9	Djibella	Cont. Ham.	205	$0,9 \pm 1,0$		-8,52			
10	Bezza Sud	Cont. Ham.	240	$0,8 \pm 1,0$	-70,0	-9,00			
11	Chemidour Sud	Cont. Ham.	140	$0,5 \pm 1,0$	-62,7	-7,56			
12	Chemidour	Cont. Ham.	145	$1,1 \pm 1,0$	-56,5	-7,43	-7,58	$51,4 \pm 2,2$	$0 \pm 3\ 000$
13	Dirkou	Quater.	325		-73,5	-10,16			
14	Dirkou	Quater.	345		-66,6	-8,31			
15	Dirkou	Cont. Int.	550		-73,3	9,89			
16	Dirkou	Cont. Int.	325	$2,9 \pm 1,0$	-73,7	-10,12	-10,70	$39,8 \pm 1,5$	$3\ 900 \pm 2\ 500$
17	Dirkou CM	Cont. Int.	225	$1,4 \pm 1,0$	-74,2	-9,43	-7,91	$36,6 \pm 1,5$	$2\ 100 \pm 2\ 500$
18	Arrigui	Cont. Int.	140		-76,0	-9,80			
19	Achenouma Sud	Cont. Int.	90	$1,2 \pm 1,0$	-77,1	-10,07			
20	Telhi Dorosso	Quater.	125	$2,1 \pm 1,0$	-73,5	-9,05			
21	Barara	Mare	10 000	12,2	+15,6				
22	Laboulabou	Quat.	1 150	$2,0 \pm 1,0$	-67,7	-7,76			
23	Dao Timni	Viséen	430	$1,8 \pm 1,0$	-77,7	-10,22	-15,90	$34,5 \pm 2,5$	$8\ 300 \pm 2\ 400$
24	Dao Timni	Viséen	820		-72,4	-8,53	-7,50	$12,9 \pm 0,9$	$10\ 000 \pm 3\ 200$
25	Yat	Viséen	520		-78,8	-10,33	-11,00	$45,7 \pm 2,9$	$3\ 000 \pm 2\ 600$
26	Madama	Westphal.	2 025		-77,5	-9,21	-9,05	$65,2 \pm 2,2$	$0 \pm 2\ 800$
27	Madama	Westphal.	2 400		-79,4	-9,30	-11,00	$75,4 \pm 2,1$	$0 \pm 2\ 500$
28	Madama	Westphal.	5 400		-80,2	-9,61	-10,90	$81,2 \pm 2,2$	$0 \pm 2\ 200$
29	Madama	Westphal.	1 050	$1,0 \pm 1,0$	-81,2	-9,42	-6,40	$49,0 \pm 1,4$	$0 \pm 3\ 400$
30	Chirfa	Cambrien	590	$0,6 \pm 1,0$	-83,2	-10,94	-11,10	$68,9 \pm 3,8$	$0 \pm 2\ 500$
31	Djado	Cambrien	300	$2,5 \pm 1,0$	-79,5	-10,07	-8,50	$91,5 \pm 4,9$	$0 \pm 3\ 000$
32	Chirfa	Cambrien	765		-84,6	-11,14	-8,06	$21,7 \pm 2,6$	$6\ 500 \pm 3\ 500$
33	Chirfa	Cambrien	875	$0,3 \pm 1,0$	-83,2	-10,78	-11,20	$74,8 \pm 5,0$	$0 \pm 2\ 600$
34	Séguédine	Cont. Int.	260	$0,5 \pm 1,0$	-81,0	-10,44	-9,20	$29,5 \pm 5,0$	$5\ 000 \pm 3\ 800$
35	Latey	Cont. Int.	210		-71,6	-7,98	-6,16	$94,7 \pm 5,7$	$0 \pm 3\ 500$
36	Aney	Cont. Int.	210		-71,6	-7,98	-6,16	$94,7 \pm 5,7$	$0 \pm 3\ 500$
37	Emi Tchouma	Cont. Int.	110	$1,0 \pm 1,0$	-76,4	-9,65			
38	Achénouma	Cont. Int.	60	$1,0 \pm 1,0$	-76,6	-10,17			
39	Achegour	Cont. Int.	2 400		-72,7	-8,74	-2,81	$41,7 \pm 2,2$	$0 \pm 6\ 800$

celle déjà observée pour le Viséen ($\delta^{18}\text{O} = -10,15$ ‰). La zone de recharge de cette nappe pourrait donc correspondre au bord oriental du Tibesti, et la direction du flux souterrain serait donc est-ouest. Influencée par la ligne tectonique de Bilma, la direction pourrait changer vers le sud. Durant leur circulation, les eaux d'infero-flux en provenance de l'est peuvent se mélanger avec les eaux actuelles. L'apport actuel calculé devrait être de l'ordre de 90 % du volume, mais il faut certainement tenir compte

d'une stratification des eaux, du fait qu'il n'existe pas vraiment de perturbation du système hydrodynamique.

IV. Le Continental hamadien

Les eaux collectées dans cet aquifère se regroupent suivant une droite d'évaporation d'équation $\delta^2\text{H} = (4,8 \pm 0,1)$ $\delta^{18}\text{O} - (24,0 \pm 1,0)$. L'intercept

($\delta^{18}\text{O} = -9,05\text{‰}$) signale une nouvelle origine pour la recharge, plus basse en altitude que celles des précédents systèmes. Cela confirme, une fois de plus, l'observation d'une zonation géographique avec les valeurs plus négatives toujours au nord. Il s'agit d'eaux relativement plus anciennes. L'écoulement se produirait du nord-est vers le sud-ouest, avec changement de direction en relation avec la faille de Bilma-Séguédine. La séparation géographique est possible, car l'âge relatif donné par le ^{14}C est le même.

V. Le Quaternaire

Certains échantillons ont été récoltés dans des puits creusés dans les sables quaternaires sans atteindre les sédiments sous-jacents. Le fait que l'épaisseur de la couverture quaternaire qui recouvre par endroits les formations secondaires et primaires soit, dans la région étudiée, inférieure à 10 m, implique que les eaux reflètent entièrement la situation hydraulique et géochimique des autres nappes sous-jacentes. Il s'agit donc d'une recharge par le bas, conséquence d'un phénomène classique de drainance le long de la ligne tectonique. Les eaux sont soumises à une forte évaporation. Les valeurs se répartissent entre $-10,16\text{‰}$ et $+3,80\text{‰}$ δ pour ^{18}O et $-73,5\text{‰}$ et $-6,5\text{‰}$ δ pour le ^2H par rapport au SMOW.

VI. Conclusion

Les réservoirs aquifères du Sahara sud, entre le Hoggar oriental et le Tibesti, expriment par les âges obtenus en ^{14}C et l'excès en deutérium ($+5\text{‰}$) similaire aux grands réservoirs du Sahara algérien, libyen ($+4\text{‰}$) et séoudien ($+2\text{‰}$), une recharge durant l'Holocène. Leur mise en charge s'effectue à différentes altitudes, en particulier à partir du Tibesti. A la faveur des failles NE-SW et nord-sud, cette direction générale des écoulements souterrains évolue du nord vers le sud. Toutefois, à cette recharge paléoclimatique se surimpose la contribution actuelle (marquage de certaines eaux par le tritium jusqu'à $+12,2 \pm 0,1$ UT), engendrée par les crues d'oueds issus du Hoggar. La mise en charge à partir du Tibesti et le transfert de masse à partir du Hoggar sont à l'origine des variations piézométriques saisonnières. A ce schéma d'écoulement superficiel et profond, s'ajoute la drainance verticale des eaux anciennes paléozoïques vers les réservoirs susjacentes mésozoïques et quaternaires. La très forte évaporation et les sources du Kaouar représentent les exutoires principaux des aquifères. La gestion de la ressource doit prévoir uniquement l'exploitation de la fraction actuelle ; si l'on excepte celle-ci, les nappes se représentent comme des archives climatiques extraordinaires, car l'intervention humaine n'a introduit aucune perturbation.

ABRIDGED VERSION

Variations in the dissolved salt content, in the water molecule isotopes (^2H , ^3H , ^{18}O) and in carbon isotopes (^{13}C , ^{14}C) allow the identification and the description of the different sedimentary aquifers of the Djado-Bilma basin (table), and the comprehension of the groundwater flow dynamics.

The Djado basin is located in the far north-east Niger, at the latitude of the Tropic of Cancer (figure 1). It is established in a syncline oriented north-south, between the Precambrian massifs of eastern Hoggar and Tibesti. The granitic substratum dips north towards the Mourzouk basin (Lybia). The sedimentary cover thickness is 2 000 m in the Southern Bilma basin and 2 500 m in the northern Djado basin. A fault system affects both the substratum and the sedimentary cover in the eastern part of the Djado basin and the whole Bilma basin. In the latter, the Bilma-Seguedine east-west flexure gives rise to the Kaouar cliff.

The Djado-Bilma basin experiences hyper-arid climatic conditions. The annual means are 10 mm for precipitation, 27°C for temperature, 13% for relative humidity and 4 500 mm for potential evapotranspiration. The evapotranspiration flux measured in Bilma as a function of the groundwater depth is approximately 900 mm/year at 25 cm, and 10 mm/year at 2 m depth.

Five hydrogeologic sandstone units have been identified in the basin: the Cambrian, the Carboniferous (Upper Visean and Lower Westfalian), the Continental Intercalaire (Nubian sand-

stone, Trias-Jurassic), the Continental Hamadien (Upper Senonian), and the Quaternary. Paleozoic aquifers are only found in the Djado basin. They are artesian, except at the massif borders and in the southern sector of the basin, where they show discontinuities. A stratigraphic discordance is found between the Paleozoic formations and the Continental Intercalaire, which is phreatic in the Djado basin and artesian in the Bilma basin. The hydraulic charge is provided by the Cretaceous deposits and the Continental Hamadien. Discontinuous Quaternary deposits cover the other aquifers.

Cambrian and Visean waters show homogeneity and depletion in stable isotopes of the water molecule: values range between -11.4 and -10.07‰ for ^{18}O and -84.6 and 79.5‰ for deuterium in the Cambrian; between -10.33 and -8.53‰ in ^{18}O and -78.8 and -72.4‰ in deuterium for the Visean; and between -9.61 and -9.21‰ in ^{18}O and -81.2 and -77.5‰ in deuterium for the Westfalian. The linear regression between ^2H and ^{18}O values for Cambrian and Visean waters has the same slope of the meteoric water line, but a lower intercept, following the equation $\delta^2\text{H} = \delta^{18}\text{O} + 5$ (figure 2). This deuterium excess of $+5$ per mil is common in Algerian ($+5$), Libyan ($+4$) and Saoudian South Sahara ($+2$). Radiocarbon ages (9 000 years mean value) correspond to climatic conditions of temperature and humidity that existed during Quaternary times at the surface of the oceans originating the water vapour masses. This depletion in stable isotopes is due to two coupled effects. The

first is a continentality effect, as it could be seen in northern Sahara groundwaters in comparison with Europe. The second would be an altitude effect similar to the altitude effect observed in mid latitude regions such as the Alps or more humid regions such as Mount Cameroon.

^{14}C activities in some Cambrian samples indicate a relatively young age. The plot of ^{18}O activity compared to ^{18}O in Cambrian waters describes a dilution curve between ancient waters (-11.5‰ in ^{18}O) and recent waters (-4.0‰ in ^{18}O) (figure 3). Recent waters have been sampled in boreholes located close to low altitude, old (6 500 \pm 3 500 years) springs. Due to the low precipitations in the region, and to the piston flow movement of the water in the aquifer, related to the low use of the resource, this would imply a stratification of Cambrian waters. Different recharge areas during Holocene should then be defined, corresponding to the Tibesti ranges, showing more negative isotopic values ($< -11.14\text{‰}$ in ^{18}O). The presence of tritium ($2.5 + 0.1$ UT) in the Cambrian waters indicates that they are presently recharged by the temporary runoffs coming from the Hoggar and the Tibesti massifs, during exceptional meteoric events.

The presence of ^{14}C in the Westfalian waters and their high dissolved salt contents (up to 5 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$), indicates that the deuterium/oxygen-18 regression line is not an evaporation line but a mixing line. The mixing end members would be the uprising deep groundwaters of the underlying aquifers (piezometric level at 3 m from the surface), and the local meteoric waters, leaching, during infiltration, the upper layers of the aquifer. These are made of clays and gypsum interbedded in the sandstone of the upper Westfalian.

On the contrary with respect to the Paleozoic aquifers, the stable isotope compositions of the Mesozoic aquifers are very scattered: they range from -10.44 to 7.01‰ for ^{18}O and from -81.0 to -56.6‰ for deuterium. The data are plotted below the

local meteoric line, showing that they are all affected by evaporation. The evaporation lines have the equation $\delta^2\text{H} = (3.10 \pm 0.25) \delta^{18}\text{O} - (46.0 \pm 2.0)$ for the Continental Intercalaire and $\delta^2\text{H} = (4.8 \pm 0.1) \delta^{18}\text{O} - (24.0 \pm 1.0)$ for the Continental Hamadien (figure 4). The ^{18}O value for the intersection between the evaporation line for the Continental Intercalaire and the local meteoric line, indicates an origin close to the Visean groundwater ($\delta^{18}\text{O} = -10.15$). The recharge zone would then be located in the eastern border of the Tibesti massif. The groundwater flow direction would be from east to west in the Djado basin and from north to south in the Bilma basin, under the influence of the meridian fault of Bilma-Seguedine.

In the case of the Continental Hamadien, the value of -9.05‰ in ^{18}O obtained at the intersection between the evaporation line and the local meteoric line indicates another recharge zone, located at a lower altitude than the previous ones. This would confirm again the hypothesis of a geographic zonation, with negative values always located north.

Finally, Quaternary waters reflect completely the hydraulic and geochemical situation of the other groundwaters, that is they are strongly evaporated. Values range from -10.16 to 3.8‰ in ^{18}O and -73.5 and -6.5‰ in deuterium.

In conclusion, the general groundwater flow direction is from the east (Tibesti) to the west (Djado basin), then from north to south following the syncline axis of the Bilma flexure. The main recharge areas for the aquifers are the Tibesti massif and the western border of the Hoggar. Recharge can also occur by vertical upward movement of deep old groundwaters towards the upper aquifers. The main discharge is due to evaporation, except for the Cambrian aquifer. Seasonal piezometric fluctuations are the result of both the mass transfer of precipitation on the massifs and of the hydraulic charge in the aquifers (upwelling).

Remerciements : Nous exprimons notre profonde gratitude à l'endroit de l'AIEA qui a financé la présente étude et du ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement du Niger qui a contribué à la réalisation de la mission d'échantillonnage.

RÉFÉRENCES

- Aranyosy J.F., Beidou B., Dray M., Joseph A. et Zuppi G.M. 1983. Origine et alimentation des nappes de la bordure nord-est du bassin des Iullemmenden (Niger): apport des techniques isotopiques. In: *Isotope Hydrology 1983*, IAEA, Vienna, STI/PUB/650, 808-810
- Aranyosy J.F., Filly A., Tandia A.A., Louvat D., Ousmane B., Joseph A. et Fontes J.-C. 1991. Estimation des flux d'évaporation diffuse sous couvert sableux en climat hyper-aride (Erg de Bilma, Niger). In: *Isotope techniques in water resources development*, IAEA, Vienna, (1992), STI/PUB/875, 309-324
- Desconnets J.C. 1994. Typologie et caractérisation hydrologique des systèmes endoréiques en milieu sahélien (Niger-Degré carré de Niamey). Thèse, Univ. Montpellier II (U STL), 326 p.
- Dray M., Gonfiantini R. et Zuppi G.M. 1983. Isotopic composition of groundwater in the southern Sahara, *Proceedings of an advisory Group Meeting Vienna*, 25-28 septembre 1980, IAEA, 187-199
- Fontes J.-C., Gasse F. et Andrews J.N. 1993. Climatic conditions of Holocene groundwater recharge in the Sahel zone of Africa. In: *Isotope techniques in the study of past and current environment changes in the hydrosphere and the atmosphere*, IAEA, Vienna, (1993), STI/PUB/908, 231-248
- Fontes J.-C. et Olivry J.C. 1977. Composition isotopique des précipitations de la région du Mont Cameroun, ONAREST, Institut de recherches sur les techniques, l'industrie et le sous-sol, 28 p.
- Gallaire R. 1995. Hydrologie en milieu subdésertique d'altitude : le cas de l'Air (Niger), Thèse, Univ. Paris-Sud, Laboratoire hydrologie et géochimie isotopique, 387 p.
- Gallaire R., Fontes J.C. et Zuppi G.M. 1995. Isotopic characterization and origin rainwater on the Air massif (Niger). In: *Application of tracers in arid zone hydrology*, IAHS Publ. n° 232, 293-302
- Gonfiantini R. 1995. On the isotopic composition of precipitation. Colloque international sur l'hydrologie et la géochimie isotopique, Journée Jean-Charles Fontes, 1-2 juin 1995, 16 p.
- Greigert J. et Pougnet R. 1965. Carte géologique de la République du Niger à l'échelle 1/2 000 000, Edition BRGM (Orléans) et ministère des Mines et de l'énergie (Niamey). Notice explicative : 63 p.
- Guendouz A. 1985. Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara : Nord-est Septentrional (Algérie), Thèse, Univ. Paris-Sud, Laboratoire hydrologie et géochimie isotopique, 243 p.

Joseph A., Frangi J.P. et Aranyossy J.F. 1992. Isotope characteristics of meteoric water and groundwater in the Sahelo-sudanese zone, *J. Geophys. Res.*, 97 (D7), 7543-7551

Martinelli L.A., Victoria R.L., Sternberg L.S.L., Ribeiro A. et Moreira M.Z. 1996. Using isotopes to determine sources of evaporated water to the atmosphere in the Amazon basin, *J. Hydrol.*, 183, 191-204

Mathieu R., Bariac T., Fouillac C., Guillot B. et Mariotti A. 1995. Variations en isotopes stables dans les précipitations en 1988 et 1989 au Burkina Faso : apports de la météorologie régionale, *Veille climatique satellitaire*, 45, 47-64

Merlivat L. et Jouzel J. 1979. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen-18 relationship for precipitation, *J. Geophys. Res.*, 84, 5029-5033

Moser H., Stichler W. et Trimbom P. 1983. Stable isotope studies on paleowaters, *In: Palaeoclimates and palaeowaters: a collection of environmental isotopes studies*, IAEA, Vienna, STI/PUB/621, 201-204

Roussin-Bariac M. 1985. Étude hydrochimique et isotopique d'une nappe alluviale sous climat semi-aride (Cuvette d'Agadez, Niger). *Thèse 3^e cycle*, Univ. Paris-Sud, Laboratoire hydrologie et géochimie isotopique, 218 p.

Rozanski K. 1985. Deuterium and oxygen-18 in European groundwaters — Links to atmospheric circulation in the past, *Chem. Geol. (isotope geoscience section)*, 52, 349-363

Siegenthaler U. et Oeschger H. 1980. Correlation of ^{18}O in precipitation with temperature and altitude, *Nature*, 285, 314-317

Siegenthaler U., Schotterer U., Oeschger H. et Messerli B. 1972. Tritiummessungen und Wasserproben aus der Tibet-Region, *Hochgebirgsforsch.* 2, 153-160

Sonntag C., Klitzsch E., Löhnert E.P., El-Shazly E.M., Münnich K.O., Junghans C., Thorweih U., Weltroffer K. et Swallem F.M. 1978. Paleoclimatic information from deuterium and oxygen-18 in Carbon-14-dated north Saharian Groundwaters, *In: Isotope hydrology*, Vol. II, IAEA-SM-228/28, 569-581