

This article was downloaded by:

On: 21 April 2011

Access details: *Access Details: Free Access*

Publisher *Taylor & Francis*

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



## Hydrological Sciences Journal

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.informaworld.com/smpp/title~content=t911751996>

### Approche hydrogéologique et hydrochimique des échanges hydrodynamiques entre aquifères profond et superficiel du bassin du Djérid, Tunisie

Samir Kamel<sup>ab</sup>; Lassaad Dassi<sup>c</sup>; Kamel Zouari<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Commissariat Régional au Développement Agricole de Tozeur/Arrondissement des Ressources en Eau, Tozeur, Tunisie <sup>b</sup> Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Sfax, Tunisie <sup>c</sup> Faculté des Sciences de Gabes, Gabes, Tunisie

Online publication date: 19 January 2010

**To cite this Article** Kamel, Samir , Dassi, Lassaad and Zouari, Kamel(2006) 'Approche hydrogéologique et hydrochimique des échanges hydrodynamiques entre aquifères profond et superficiel du bassin du Djérid, Tunisie', *Hydrological Sciences Journal*, 51: 4, 713 – 730

**To link to this Article:** DOI: 10.1623/hysj.51.4.713

**URL:** <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.51.4.713>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Full terms and conditions of use: <http://www.informaworld.com/terms-and-conditions-of-access.pdf>

This article may be used for research, teaching and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, re-distribution, re-selling, loan or sub-licensing, systematic supply or distribution in any form to anyone is expressly forbidden.

The publisher does not give any warranty express or implied or make any representation that the contents will be complete or accurate or up to date. The accuracy of any instructions, formulae and drug doses should be independently verified with primary sources. The publisher shall not be liable for any loss, actions, claims, proceedings, demand or costs or damages whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with or arising out of the use of this material.

## Approche hydrogéologique et hydrochimique des échanges hydrodynamiques entre aquifères profond et superficiel du bassin du Djérid, Tunisie

SAMIR KAMEL<sup>1,3</sup>, LASSAAD DASSI<sup>2</sup> & KAMEL ZOUARI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Commissariat Régional au Développement Agricole de Tozeur/Arrondissement des Ressources en Eau, Route de Nefta, 2200 Tozeur, Tunisie  
[kamelsamirlazhari@yahoo.fr](mailto:kamelsamirlazhari@yahoo.fr)

<sup>2</sup> Faculté des Sciences de Gabes, Zrig 6000 Gabes, Tunisie  
[lassaad@geologist.com](mailto:lassaad@geologist.com)

<sup>3</sup> Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, BP W, 3038 Sfax, Tunisie  
[kamel.zouari@enis.rnu.tn](mailto:kamel.zouari@enis.rnu.tn)

**Résumé** L'étude basée sur l'interprétation des données hydrochimiques (éléments majeurs) et isotopiques (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H, <sup>3</sup>H et <sup>14</sup>C) des eaux souterraines du bassin du Djérid (sud-ouest tunisien) a permis de comprendre les relations entre les différents niveaux du système aquifère dans ce bassin. Elle a montré que l'eau de l'aquifère profond du Complexe Terminal (CT), vraisemblablement peu circulante, a été rechargée sous un paléoclimat plus froid. De nos jours, cette eau couvre à elle seule la quasi-totalité des besoins en eau d'irrigation des palmeraies de la région. Le surplus d'eau d'irrigation alimente la nappe phréatique logée dans les formations sableuses du Plio-Quaternaire. Cette dernière présente un intérêt secondaire de point de vue quantitatif, mais son influence se situe au niveau de sa contribution à la recharge de la nappe profonde du CT. En effet, l'eau de retour d'irrigation de la nappe phréatique, évaporée et équilibrée avec le CO<sub>2</sub> atmosphérique conduit, par endroits, à un rajeunissement apparent et à un enrichissement en isotopes stables des eaux de la nappe du CT.

**Mot clefs** aquifère nord-saharien; hydrochimie; isotopes du milieu; mélange d'eaux souterraines; recharge paléoclimatique; retour d'irrigation; Tunisie; zone aride

### Hydrogeological and hydrochemical approach of hydrodynamic exchanges between deep and shallow aquifers in the Djerid basin (Tunisia)

**Abstract** The study based on the interpretation of geochemical (major elements) and isotopic data (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H, <sup>3</sup>H and <sup>14</sup>C) of the groundwater in the Djerid basin, southwestern Tunisia, helped to understand the relationships between the different levels of the aquifer system in this basin. It indicates that the slow flowing groundwater of the deep Complex Terminal (CT) aquifer has been recharged under cooler palaeoclimatic conditions. In the present, this groundwater supplies the huge irrigation demands of the oases in the region. The excess irrigation water returns to the ground and recharges the phreatic water table of the Plio-Quaternary aquifer. This water table is not of great quantitative interest; however, it has an important influence in the recharge of the deep CT aquifer. Indeed, the return flow of the evaporated and CO<sub>2</sub>-equilibrated irrigation water of the phreatic aquifer leads, in some places, to a young bias of radiocarbon ages and a stable isotope enrichment of the deep CT groundwater.

**Key words** north Saharan aquifer; hydrochemistry; environmental isotopes; groundwater mixing; palaeoclimatic recharge; return flow; Tunisia; arid zone

## INTRODUCTION

Le sud tunisien, par son climat aride à semi-aride fait partie d'une région naturelle où seules les ressources en eaux souterraines constituent la principale source d'approvisionnement de l'Homme. Ces ressources se répartissent entre la nappe phréatique du Plio-Quaternaire (PQ) et la nappe profonde du Complexe Terminal (CT). Cette dernière contribue à elle seule à plus de 80% des besoins en eau potable et en eau d'irrigation de la région (DGRE, 2004a). Depuis la création des oasis du Djérid à l'époque romaine (Brunhes, 1902; Mamou & Kassah, 2002), le surplus d'eau d'irrigation des eaux de la nappe du CT, estimé à 14% (Bouzaidi, 1973), alimente la

nappe phréatique du PQ. Ceci conduit à une remontée locale du niveau piézométrique pendant la saison hivernale quand l'évapotranspiration atteint son minimum.

La surexploitation de la nappe du CT au niveau du bassin du Djérid avec des débits totaux avoisinant  $10\,000\text{ L s}^{-1}$  (DGRE, 2004a), entraîne une chute moyenne du plan d'eau dans les ouvrages hydrauliques d'environ  $1\text{ m an}^{-1}$  (DGRE, 2004b) et fait croître les coûts du  $\text{m}^3$  d'eau pompée.

L'eau de la nappe phréatique est plus accessible à l'exploitation à l'aide de puits forés ne dépassant pas 50 m de profondeur. De ce fait, l'exploitation de cette nappe n'a cessé d'augmenter et les prélèvements s'égalisent approximativement avec les ressources disponibles.

## CADRE GENERAL

Le bassin du Djérid se situe dans le sud tunisien entre les longitudes 7 et  $10^\circ\text{E}$  et les latitudes 33 et  $34^\circ 30'\text{N}$  et couvre la région du Djérid (*stricto sensu*) à l'ouest et la région de la Nefzaoua à l'est (Fig. 1). Ce bassin est délimité à l'ouest par la frontière algérienne, au nord par la dépression de Chott El Gharsa et la chaîne nord des Chotts, à l'est par Djebel Tebaga et les reliefs du Dahar, et au sud par le Grand Erg Oriental. Ce bassin couvre approximativement une superficie de  $10\,000\text{ km}^2$  dont la moitié est occupée par la dépression fermée de Chott Djérid qui constitue avec Chott El Gharsa les exutoires naturels des nappes.

Le climat qui règne dans ce bassin est de type semi-aride avec des tendances sahariennes marquées par des précipitations faibles et irrégulières, ne dépassant qu'exceptionnellement  $100\text{ mm an}^{-1}$  (ONM, 1998). Les moyennes interannuelles de la température et de l'évapotranspiration potentielle pour la période 1984–1997 sont estimées à  $21^\circ\text{C}$  et  $1793\text{ mm an}^{-1}$ , respectivement (ONM, 1998).

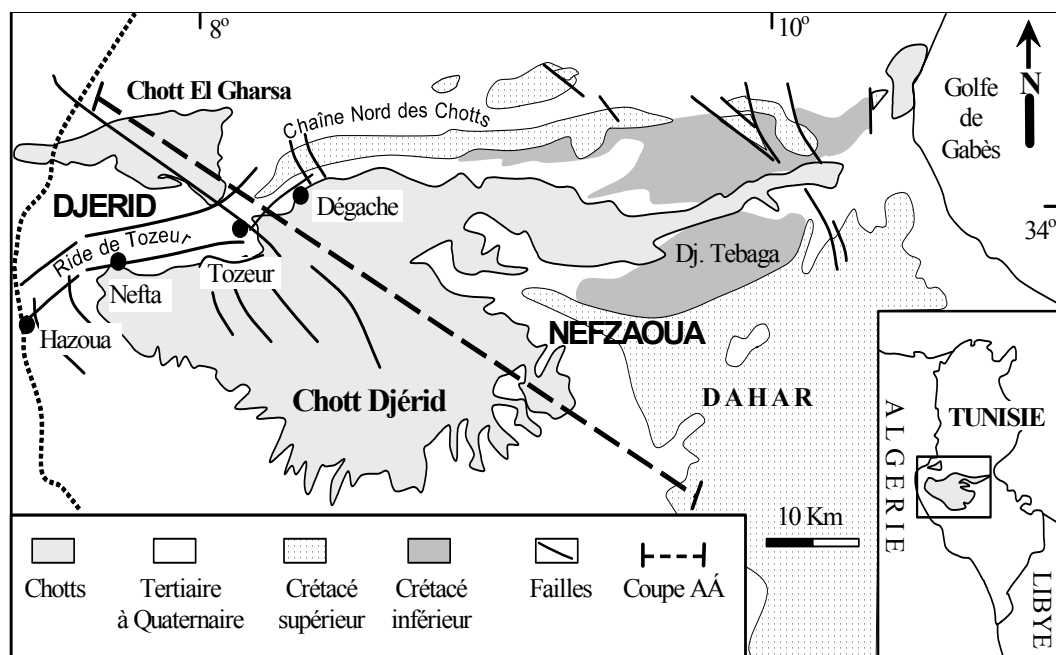


Fig. 1 Carte géologique simplifiée d'après Ben Youssef & Peybernes (1986).

Le réseau hydrographique est peu dense. Il est constitué essentiellement par des cours d'eau non pérennes (*oueds*) qui collectent l'eau de ruissellement pendant les rares événements pluvieux à partir de la chaîne nord des Chotts et l'acheminement vers les exutoires naturels du bassin (Chott El Gharsa et Chott Djérid).

## CADRE GEOLOGIQUE

Le bassin du Djérid est bordé par des reliefs dont les formations affleurantes datent du Crétacé inférieur au Quaternaire, avec toutefois une lacune des dépôts néogènes (Ben Youssef & Peybernes, 1986). A l'intérieur du bassin et en dehors des dépressions des Chotts, comblés de dépôts du PQ, les principales formations affleurantes sont les sables et les argiles Miocènes, dans la région du Djérid, et les calcaires Sénoniens dans la Nefzaoua (Fig. 1).

Le bassin du Djérid appartient au domaine atlasique méridional occupant une position charnière entre deux domaines géologiques à styles de déformation différents: l'Atlas tunisien central montagneux et la plateforme saharienne à structure stable et monotone. Seul le nord du bassin, avoisinant le domaine atlasique est fortement influencé par la tectonique. En effet, le dernier mouvement orogénique alpin, a engendré un soulèvement anticlinal donnant naissance à la ride de Tozeur. Cette structure, bordée par deux failles majeures parallèles et de direction E-O, constitue le prolongement de la chaîne nord des Chotts (Zargouni, 1986).

A cette complexité structurale s'ajoute une complexité d'origine stratigraphique résultant du changement latéral de faciès lithologique et de la puissance du CT en allant du Djérid vers la Nefzaoua. Les forages pétroliers et les forages profonds d'eau ont permis de mettre en évidence ce changement de faciès et de préciser la puissance des formations géologiques existant en profondeur dans la zone d'étude. Le Tableau 1 et la coupe hydrogéologique présentée par la Fig. 2, montrent la succession de ces formations de la plus ancienne à la plus récente.

## HYDROGEOLOGIE

Dans la zone d'étude, l'aquifère profond, connu sous le nom du Complexe Terminal (CT), est logé dans les formations du Sénonien supérieur au niveau de la Nefzaoua et du Miocène au niveau du Djérid. Ces formations reposent sur les argiles semi-perméables du Sénonien inférieur (Fig. 2).

A l'ouest du bassin, dans la région du Djérid, le CT a une épaisseur moyenne de 80 m (Castany, 1982). Au centre, cette formation plonge en profondeur et s'épaissit pour atteindre 200 m (UNESCO, 1972). Vers l'est, elle s'approche de nouveau de la surface et son épaisseur se réduit et finit par biseauter pour céder la place aux calcaires fissurés du Sénonien supérieur dans la région de la Nefzaoua (Rouatbi, 1971 in Mamou, 1989).

L'aquifère de surface est logé dans les sables argileux à gypseux du PQ. Cet aquifère, de moindre importance, est sollicité uniquement dans la région du Djérid (Fig. 2).

**Tableau 1** Unités lithostratigraphiques dans le bassin du Djérid.

Unités stratigraphiques	Région du Djérid Formation / lithologie (épaisseur)	Région de la Nefzaoua Formation / lithologie (épaisseur)
Quaternaire	Terrasses non différenciées / sables fins, sables argileux à gypseux (100 m)	Terrasses non différenciées / sables et sables argileux à gypseux (50 m)
Pliocène	Ségui / argiles gypseuses (250 m)	Pliocène complètement absent
Miocène	Béglia / sables moyens à grossiers (80 m)	Miocène complètement absent
Sénonien	Berda / calcaires fissurés et calcaires marneux (300 m)	Berda / calcaires fissurés et calcaires marneux (600 m)
Santonien-Coniacien	Aleg / marnes, argiles et calcaires gypseux (400 m)	Aleg / marnes, argiles et calcaires gypseux (400 m)
Turonien-Cénomanién	Zebbag / marnes, calcaires et dolomies (700 m)	Zebbag / marnes, calcaires et dolomies (700 m)
Aptien-Albien	Orbata / marnes, calcaires et grès (200 m)	Orbata / marnes, calcaires et grès (200 m)
Aptien	Sidi Aich / grès et sables (140 m)	Sidi Aich / grès et sables (140 m)
Barrémien-Aptien	Bouhedma / sables avec passées d'argiles, calcaires et gypses (250 m)	Grès à bois / grès fossilifères (350 m)
Hautérvien-Barrémien	Boudinar / grès quartzeux et argiles (300 m)	Kbar el Haj / grès et sables (230 m)
Valangénien-Hautérvien	Sidi Kralif-Melloussi / argiles et marnes (650 m)	
Jurassique	Nara / calcaires, dolomies et argiles (670 m)	Nara / calcaires, dolomies et argiles (700 m)

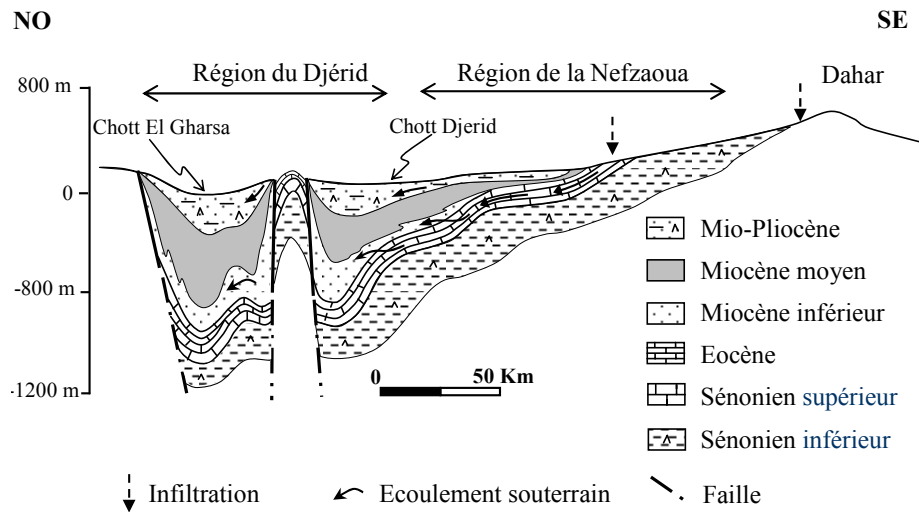


Fig. 2 Coupe hydrogéologique Djérid-Nefzaoua.

Le fonctionnement hydrodynamique des aquifères dans le bassin du Djérid est fortement influencé par la tectonique (Zargouni, 1986). En effet, la ride de Tozeur, séparant les deux dépressions de Chott El Gharsa et de Chott Djerid, maintient une différence de pression hydrostatique de 30 m entre les deux compartiments nord et sud (DGRE, 2004b). En surface, l'influence de cette ride est matérialisée par un alignement de sources tout au long de son flanc sud. D'autre part, le compartimentage des niveaux aquifères par des failles N-S perpendiculaires aux deux accidents majeurs longeant la ride de Tozeur, a contribué au changement latéral des faciès lithologiques en allant de l'ouest vers l'est du bassin (ETAP, 1992 in Chalbaoui *et al.*, 2000). Cette situation a abouti à une configuration très particulière du système hydraulique CT-PQ (Fig. 3).

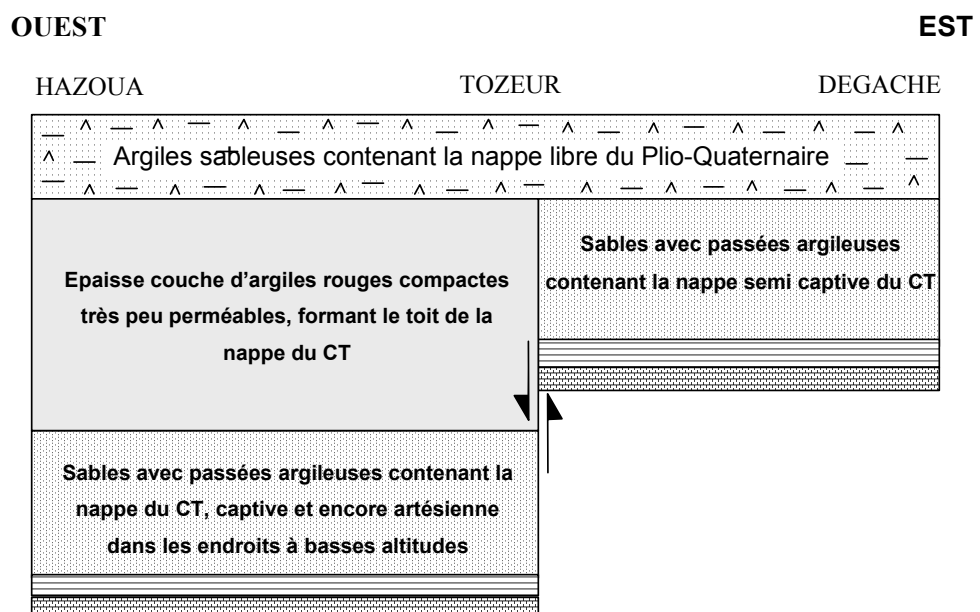


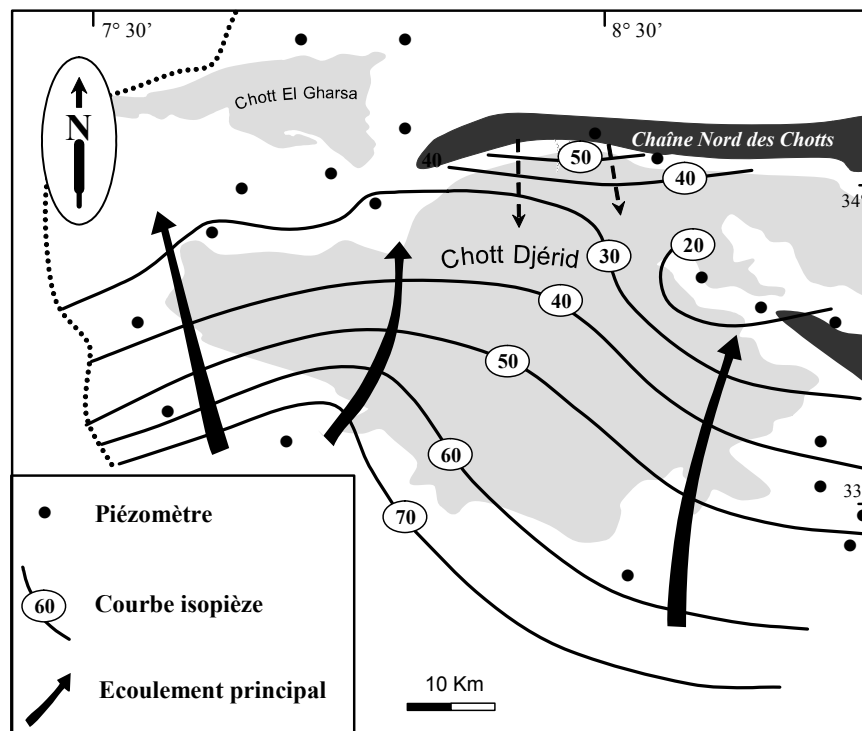
Fig. 3 Configuration schématique du système aquifère Complexe Terminal (CT)/Plio-Quaternaire (PQ) dans la région du Djérid.

En effet, la subsidence de l'aquifère du CT à l'ouest de Tozeur a donné naissance à une nappe captive (sauf à proximité de la ride de Tozeur) et artésienne à cause de l'épais dépôt d'argiles rouges compactes (300 m) formant son toit. Cependant, à l'est, et en absence d'un toit imperméable, la nappe du CT est considérée comme semi-captive. En outre, l'augmentation de la pression exercée par la sédimentation sur les calcaires Sénoniens à cause de leur enfouissement en profondeur à proximité du Chott Djérid a donné naissance au phénomène du relais hydrogéologique entre les calcaires et les sables (Fig. 2).

La nappe du CT est captive sur une grande partie du bassin. Elle est libre à semi-captive uniquement au niveau de la ride de Tozeur et dans la Nefzaoua. Les valeurs de la transmissivité obtenues à partir des essais de pompage sont très hétérogènes pour le CT de la Nefzaoua et varient entre 0.5 et  $150 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  (UNESCO, 1972). Dans le Djérid, elles sont plus homogènes et varient entre 9 et  $18 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  (Mamou, 1989). Pour la nappe libre du PQ, la conductivité hydraulique moyenne obtenue par la méthode Porchet (Castany, 1970 in Chalbaoui, 1989) est de  $5\text{--}11 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  (DGRE, 2004a).

La carte piézométrique de la nappe du CT (Fig. 4), établie en juin 1999, montre que l'écoulement général des eaux s'effectue à partir des reliefs du Dahar vers Chott Djérid et Chott El Gharsa selon une direction S–N. Un écoulement d'ordre secondaire, de direction N–S, s'effectue à partir de la chaîne nord des Chotts vers Chott Djérid. Le gradient hydraulique est relativement faible au sud et sud-est du bassin (environ 0.3‰), alors qu'il atteint son maximum (environ 4‰) à l'est où l'exploitation est très intense.

En résumé, le bassin hydrogéologique du Djérid est formé de deux principaux aquifères séparés par des formations semi-perméables. Ce système, fortement



**Fig. 4** Carte piézométrique de la nappe du Complexe Terminal du bassin du Djérid (juin 1999).

influencé par la tectonique, présente d'importantes variations latérales du faciès lithologique et d'épaisseur. Cette conception peut-elle favoriser l'intercommunication entre les niveaux aquifères de ce système à travers les couches semi-perméables et/ou les failles dans ce système?

## ECHANTILLONNAGES ET TECHNIQUES ANALYTIQUES

La Fig. 5 montre la localisation des différents points des prélèvements d'échantillons d'eau dans la nappe du CT et la nappe du PQ en juin 1999. Les analyses chimiques des éléments majeurs (Tableau 2) ont été réalisées au Laboratoire de Radio-Analyses et Environnement (LRAE) de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (Tunisie). Les teneurs en isotopes stables des eaux ( $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$ ) ont été déterminées au Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique d'Orsay (Tableau 2). Les incertitudes analytiques sur les mesures sont de  $\pm 0.2\%$  pour l'oxygène-18 ( $^{18}\text{O}$ ) et  $\pm 2\%$  pour le deutérium ( $^2\text{H}$ ). Les activités en  $^{14}\text{C}$  ont été mesurées au LRAE de Sfax par scintillation liquide sur le  $\text{CO}_2$  obtenu par l'attaque du  $\text{BaCO}_3$ , précipité sur le terrain, par de l'acide phosphorique. Les mesures des teneurs en tritium ( $^3\text{H}$ ) ont été effectuées à l'Institut d'Hydrologie du Centre National de Recherche de Munich en Allemagne. L'incertitude sur ces mesures est de 0.4 UT (Tableau 2).

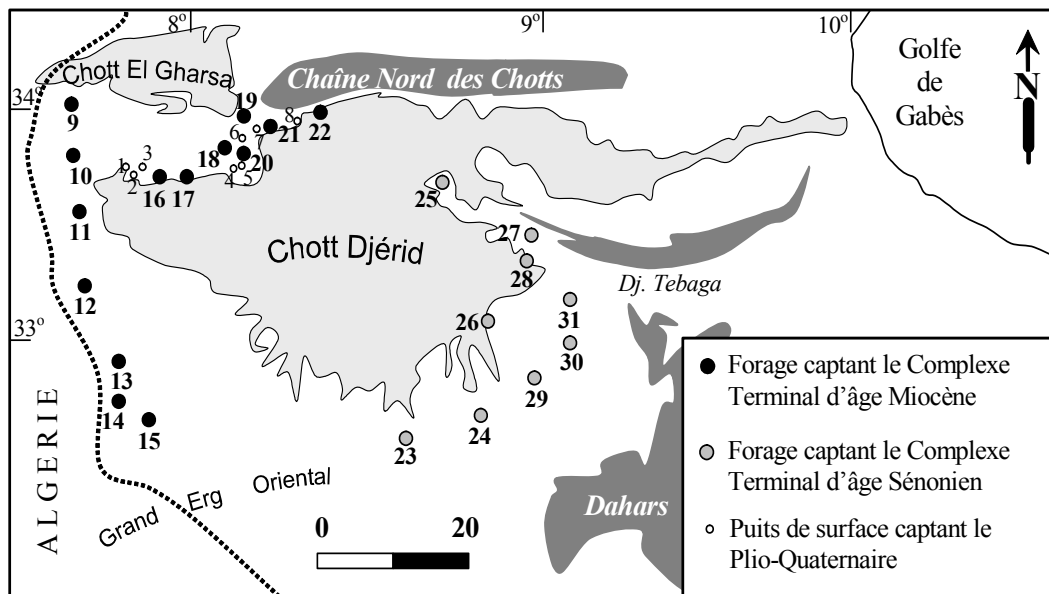


Fig. 5 Carte de localisation des points d'eau échantillonnés pour analyses chimiques et isotopiques.

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

### Hydrochimie

**Salinité et faciès chimique** La carte de répartition spatiale de la minéralisation (résidu sec) des eaux de la nappe du CT (Fig. 6) montre que la charge saline augmente



**Tableau 2** Caractéristiques hydrogéologiques, analyses chimiques et isotopiques des points d'eau échantillonnés dans le bassin du Djérid (campagne juin 1999).

No.	Désignation	Aqui fère	Coordonnées géographiques			Prof. (m)	Captage (m)	Eléments majeurs (méq L <sup>-1</sup> )						Résidu sec (mg L <sup>-1</sup> )	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ vs SMOW)	$\delta^2\text{H}$	<sup>3</sup> H (UT)	<sup>14</sup> C (pcm)	
			Lat.	Long.	Alt. (m)			Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>						HCO <sub>3</sub>
1	M. Zaeter	PQ	33°51'57"	7°50'43"	35.00	15	7–15	26.80	28.77	40.00	1.40	46.05	49.92	6.00	6280	-4.90	-46.70	-	77.60
2	M. Tatta	PQ	33°51'55"	7°53'09"	25.00	15	4–15	39.00	24.66	17.52	0.70	21.15	55.91	3.00	6480	-4.82	-49.20	-	85.50
3	Nefta forêt	PQ	33°51'59"	7°54'11"	35.00	15	6–15	40.00	18.00	22.00	0.92	24.69	48.72	1.71	5280	-3.86	-43.60	-	72.10
4	Jhim forêt	PQ	33°54'00"	8°07'12"	32.00	25	6–25	43.60	24.08	40.00	1.20	47.55	62.40	4.51	7340	-3.19	-40.90	-	83.00
5	A. Jhimi	PQ	33°54'05"	8°07'24"	25.00	25	7–25	38.50	21.29	44.00	0.64	40.04	54.91	4.59	7580	-3.63	-43.40	-	99.40
6	A. Sekala	PQ	33°55'57"	8°09'11"	30.00	30	6–20	38.00	22.52	32.00	0.72	30.03	51.92	4.00	6500	-3.48	-42.30	-	100.00
7	H. Maklouf	PQ	33°05'20"	7°53'35"	40.00	10	2–10	29.20	18.58	63.00	0.44	65.09	34.94	4.00	7640	-3.57	-42.50	-	93.90
8	K.Rhouma	PQ	33°58'06"	8°12'09"	35.00	15	5–15	32.00	25.65	48.00	1.00	55.07	55.91	3.71	7700	-4.43	-44.70	-	87.50
9	Htam	CTM	33°58'39"	7°38'44"	12.00	805	666–739	10.75	10.03	21.74	0.46	14.49	25.47	2.76	3100	-5.29	-49.30	0.70	4.40
10	Mzara	CTM	33°49'42"	7°37'01"	38.00	375	323–361	12.80	12.99	17.52	0.36	17.03	21.96	2.00	2800	-4.83	-47.40	0.70	3.20
11	Gara. Jaballah	CTM	33°48'37"	7°41'37"	30.00	450	325–395	16.00	5.92	19.52	0.50	21.04	16.47	4.40	2920	-4.77	-47.60	-	7.90
12	A. O.Ghrissi	CTM	33°40'52"	7°41'17"	38.00	550	443–489	16.00	11.84	12.00	0.26	27.07	10.34	3.00	2720	-4.60	-46.90	-	5.80
13	Bir Roumi	CTM	33°28'07"	7°43'02"	35.00	348	278–340	19.50	9.86	15.00	0.79	16.02	20.97	3.51	3010	-5.00	-49.10	0.70	1.75
14	Matrouha 2	CTM	33°22'15"	8°41'09"	47.00	302	190–288	15.91	7.78	15.22	0.56	16.82	22.20	3.05	2940	-4.02	-44.90	-	8.80
15	R. Matoug 2	CTM	33°18'07"	8°01'30"	49.00	225	120–225	15.90	7.81	15.22	0.56	16.81	22.19	3.05	2316	-4.16	-45.20	0.70	2.40
16	Ghardgaya 4b	CTM	33°51'41"	7°58'04"	43.00	423	285–380	31.20	2.87	12.17	0.59	11.00	35.05	2.85	3310	-6.11	-53.90	0.90	10.40
17	PK 14b	CTM	33°52'21"	8°02'36"	32.00	630	507–578	9.20	12.25	12.70	0.38	14.10	17.97	1.67	2160	-4.07	-45.00	-	6.10
18	Drâa CRDA	CTM	34°00'15"	8°12'05"	71.00	104	56–104	9.70	15.62	7.35	0.10	13.93	13.81	2.35	1930	-5.72	-51.80	0.70	17.80
19	Hamma 14b	CTM	33°59'39"	8°09'42"	58.00	133	0.5–99	20.00	11.84	15.00	0.38	14.02	28.95	2.00	4290	-5.44	-49.50	-	28.50
20	Tozeur 8	CTM	33°54'55"	8°08'09"	30.00	415	320–400	8.00	8.30	14.30	0.12	14.86	11.97	2.05	2100	-3.85	-43.60	0.70	18.30
21	O. Koucha 2b	CTM	33°57'33"	8°11'24"	28.00	354	285–342	6.85	10.03	14.35	0.59	12.01	14.06	2.48	1890	-4.79	-46.20	0.70	11.90
22	Deghoumes 4	CTM	34°01'27"	8°19'26"	45.00	623	544–586	19.37	7.89	36.47	0.00	49.39	18.27	2.23	4100	-5.99	-51.74	-	12.00
23	Sabria Mol	CTS	32°45'10"	8°32'00"	60.20	333	118–200	5.00	3.46	7.08	0.37	6.25	7.84	2.25	1132	-5.62	-51.50	0.80	6.30
24	Faouar 4	CTS	32°45'00"	8°40'30"	48.60	195	88–195	7.28	4.98	10.18	0.27	12.01	8.73	1.90	1634	-4.52	-46.50	0.90	9.60
25	Fatnassa 2	CTS	33°33'32"	8°45'00"	53.30	185	92–185	18.18	7.78	20.24	0.49	23.55	23.82	2.55	3406	-5.03	-47.07	0.70	27.80
26	Zarcine 1	CTS	33°05'10"	8°49'10"	28.00	200	103–200	9.09	4.98	11.11	0.31	12.49	11.94	2.25	1974	-5.35	-49.10	0.80	11.60
27	Ras el Ain	CTS	33°20'00"	8°48'00"	53.00	214	28–78	20.90	16.03	29.83	0.51	31.73	30.39	3.50	4560	-6.10	-49.60	0.70	-
28	Negga 6	CTS	33°29'10"	8°49'50"	23.00	251	80–251	10.46	4.98	10.92	0.31	12.97	13.42	2.40	1868	-5.15	-51.10	-	11.60
29	Zafrane 3b	CTS	32°54'03"	8°45'00"	39.00	122	0–122	5.91	3.25	7.41	0.22	8.65	7.10	2.10	1234	-5.13	-47.00	-	21.10
30	Jemna 1bis	CTS	32°55'42"	8°55'01"	45.90	150	60–150	6.80	3.46	8.07	0.26	9.61	7.27	2.25	1470	-6.00	-45.90	-	10.80
31	Douz 2b	CTS	32°51'00"	9°02'11"	65.70	123	63–100	9.00	10.00	25.00	0.41	32.04	18.97	2.10	3250	-5.70	-49.60	-	-

**Légende:** PQ: Plio-Quaternaire; CTM: Complexe Terminal Miocène; CTS: Complexe Terminal Sémonien.

Lat.: latitude; Long.: longitude; Alt.: altitude; Prof.: profondeur.

pcm: % carbone moderne.

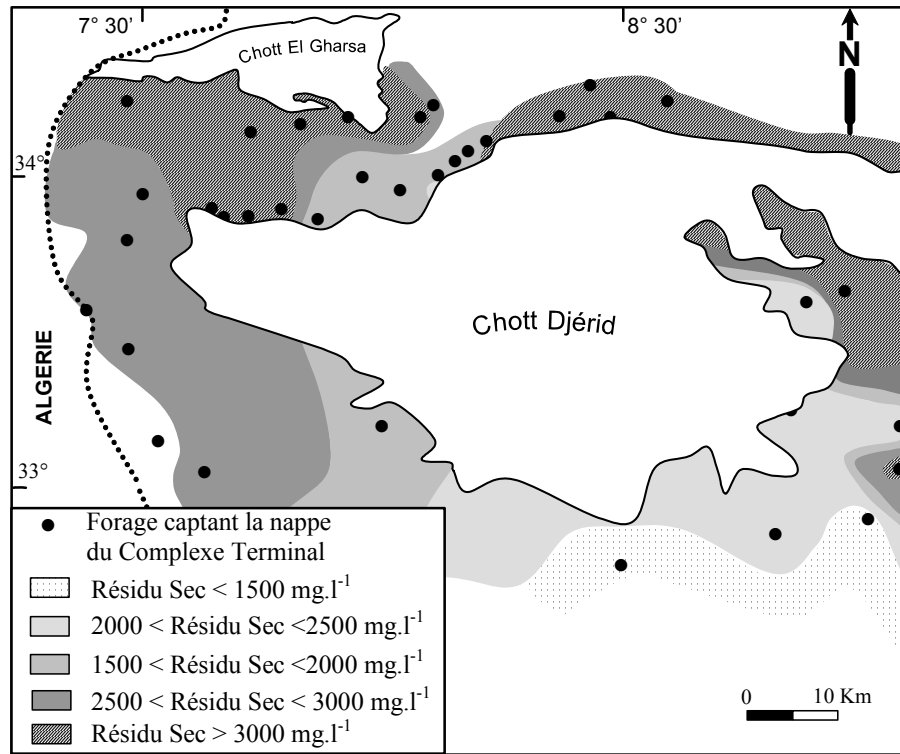


Fig. 6 Répartition spatiale de la minéralisation totale (résidu sec) des eaux de la nappe du Complexe Terminal.

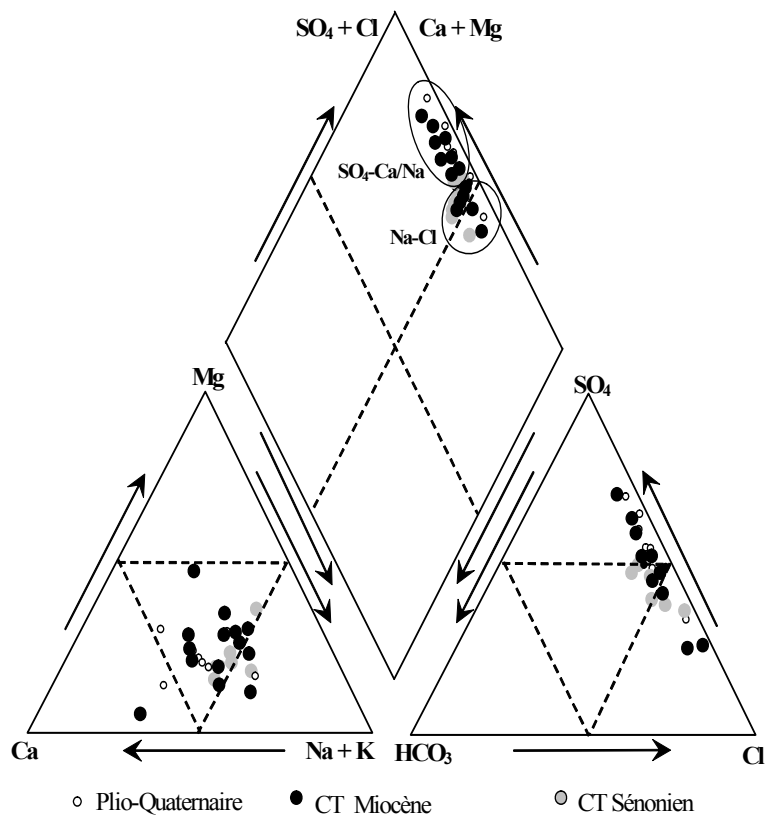


Fig. 7 Diagramme de Piper des eaux souterraines du bassin du Djérid.

Downloaded At: 20:40 21 April 2011

du sud-ouest vers le nord-est. Les plus faibles valeurs caractérisent la proximité des reliefs du Dahar au sud-est du bassin et semblent être en relation avec une infiltration rapide des eaux de pluie au niveau des affleurements carbonatés karstifiés du Sénonien. L'augmentation de la salinité vers les exutoires du bassin (au nord-est et au nord-ouest), dépassant  $3000 \text{ mg L}^{-1}$ , est en parfait accord avec le sens d'écoulement déduit de la carte piézométrique. Dans la Nefzaoua et la partie est du Djérid, la surexploitation des réserves du CT contribuerait à l'augmentation de la minéralisation des ses eaux par appel d'eau à partir du PQ, dont la salinité est souvent supérieure à  $5000 \text{ mg L}^{-1}$ . Cet appel d'eau saumâtre peut être en relation avec la drainance descendante existante, par endroits (oasis), entre les niveaux superficiel et profond.

La représentation des concentrations en éléments majeurs sur le diagramme de Piper (Piper, 1944) montre que les eaux du CT évoluent d'un faciès chimique du type chloruré sodique à l'est de la zone d'étude vers un faciès sulfaté calcique à sodique à l'ouest. Les eaux de la nappe phréatique, rechargée par retour d'irrigation, montrent logiquement un faciès sulfaté calcique à sodique semblable à celui du CT (Fig. 7).

**Mécanismes de l'acquisition de la charge saline** Des corrélations établies entre la concentration de chaque élément majeur et le résidu sec (RS) des eaux souterraines sont utilisées pour mettre en évidence les différents mécanismes qui contribuent à la salinisation des eaux souterraines (Fig. 8). D'une façon générale, les concentrations en sodium, en chlorure, en calcium et en sulfate sont bien corrélées avec le résidu sec. Les coefficients de détermination de ces corrélations ( $R^2$ , toutes nappes confondues) sont de 0.75, 0.90, 0.85 et 0.90, respectivement. Ceci traduit la participation de ces éléments à l'acquisition de la charge saline des eaux souterraines. Cependant, les concentrations en magnésium, en bicarbonate et en potassium ne montrent pas une nette corrélation avec le résidu sec, indiquant une faible participation de ces ions à la salinisation des eaux souterraines.

La participation des ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  à la minéralisation totale des eaux résulterait d'une éventuelle dissolution de l'halite et/ou de l'anhydrite. Ceci est corroboré par la corrélation positive entre les chlorures et le sodium, affichant un coefficient de détermination ( $R^2$ ) égal à 0.91 (Fig. 9(a)). De même, la participation des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  à la salinisation indiquerait une éventuelle dissolution du gypse, ce qui est confirmé par l'étroite corrélation entre ces deux éléments ( $R^2 = 0.88$ ) (Fig. 9(b)). La dissolution de ces évaporites est d'ailleurs confirmée par les indices de saturation (IS) calculés par le programme WateqF (Plummer *et al.*, 1976) (Tableau 3). En effet, les indices de saturation de l'ensemble des eaux vis-à-vis des minéraux concernés (halite et gypse) montrent un état de sous-saturation pour la majorité des échantillons (IS moyen vis-à-vis de l'halite:  $-4.86$ ; IS moyen vis-à-vis du gypse:  $-0.40$ ). La Fig. 10(a) et (b), illustrant les étroites corrélations entre les indices de saturation des eaux vis-à-vis de l'halite et du gypse en fonction de  $\text{Na}+\text{Cl}$  et de  $\text{Ca}+\text{SO}_4$  respectivement, renforce l'hypothèse de la dissolution de ces évaporites, exception faite pour les eaux du PQ qui sont en équilibre vis-à-vis du gypse, particulièrement abondant dans les niveaux superficiels avoisinant les Chotts. Par contre, l'absence de corrélations entre les indices de saturation des eaux vis-à-vis de la calcite en fonction de  $\text{Ca}+\text{HCO}_3$  (Fig. 10(c)) et de la dolomite en fonction de  $\text{Ca}+\text{Mg}+\text{HCO}_3$  (Fig. 10(d)) infirme la dissolution de ces minéraux carbonatés, malgré l'état de sous-saturation observé essentiellement pour les eaux CT du Sénonien.

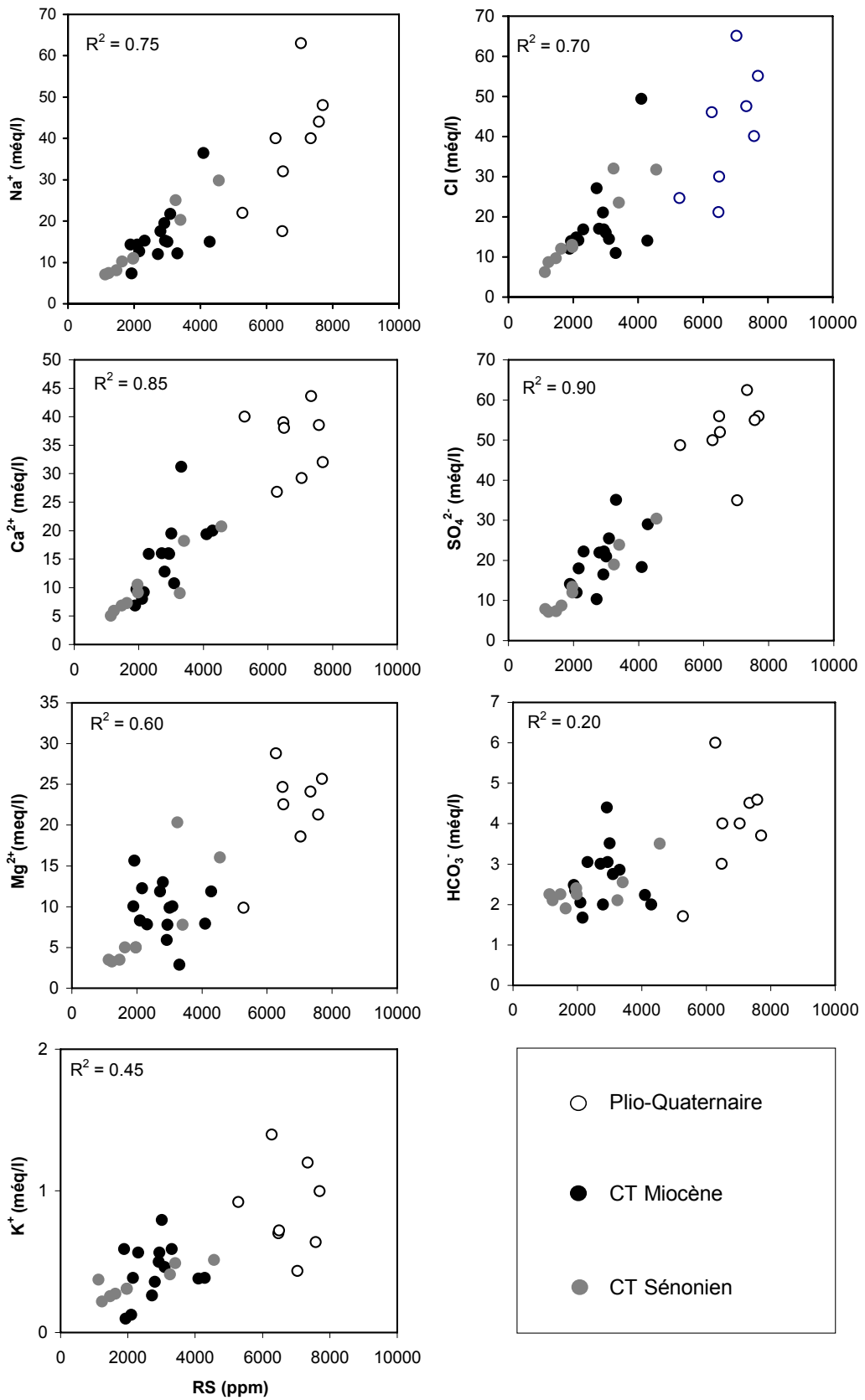


Fig. 8 Variation des concentrations des éléments majeurs en fonction du résidu sec.

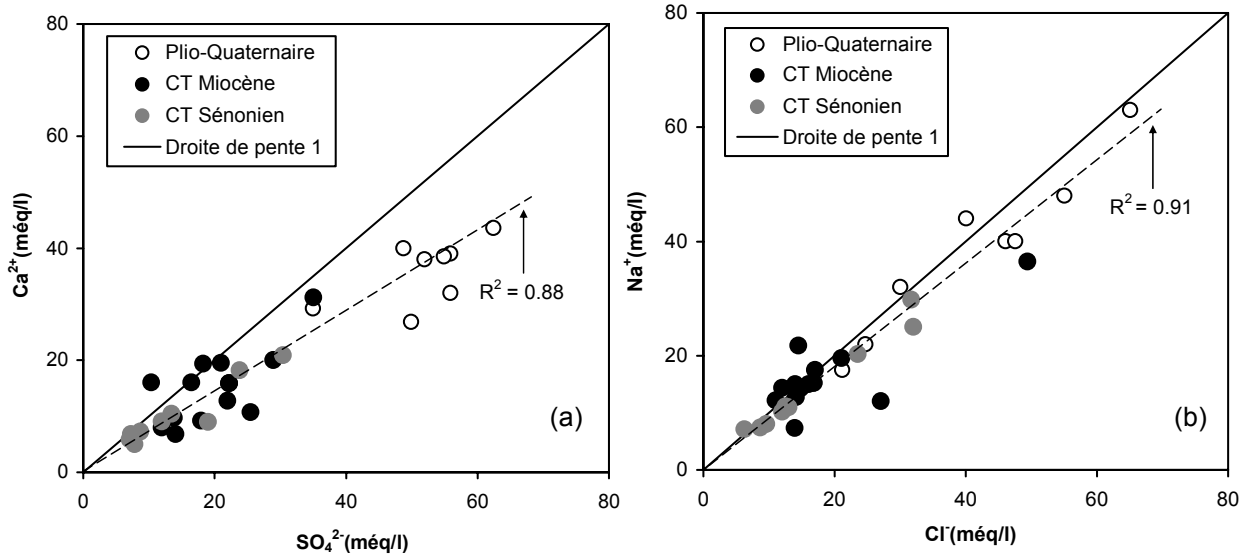


Fig. 9 Relation entre (a)  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  et (b)  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  dans les eaux souterraines du bassin du Djérid.

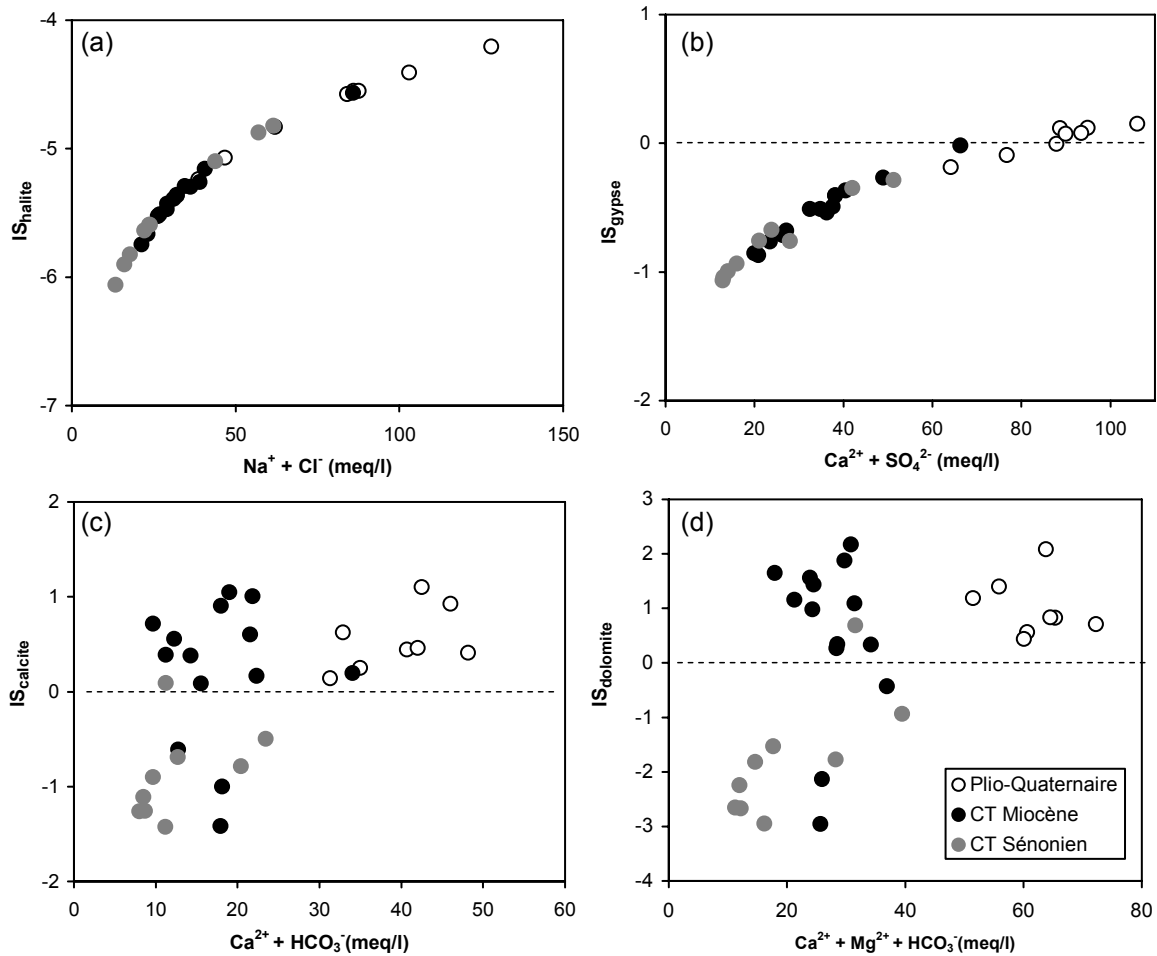


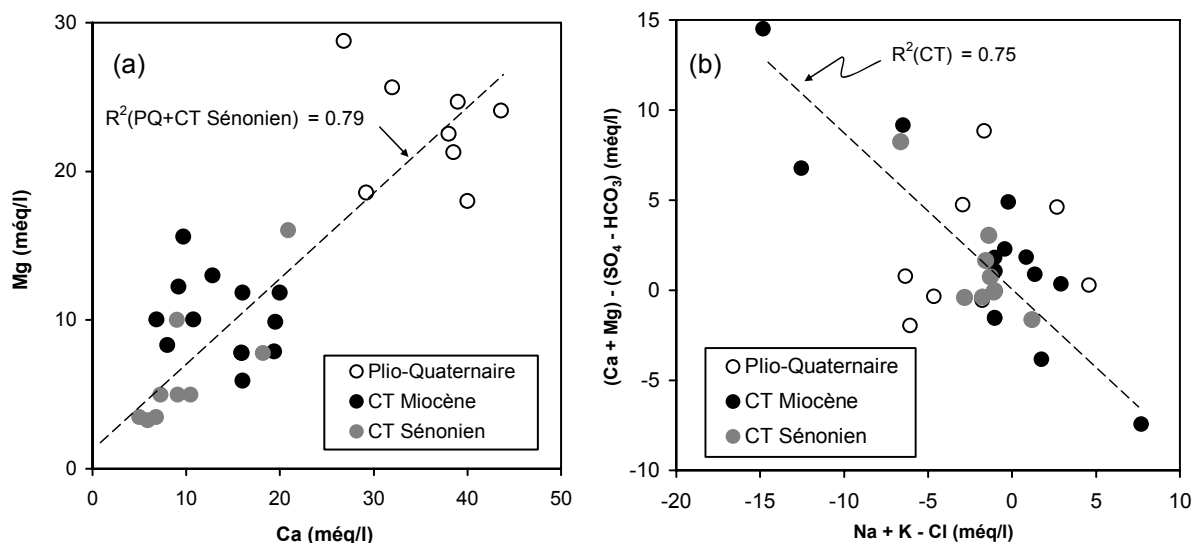
Fig. 10 Corrélation des indices de saturation des eaux vis-à-vis de l'halite, du gypse, de la calcite et de la dolomite en fonction de  $\text{Na}+\text{Cl}$  (a),  $\text{Ca}+\text{SO}_4$  (b),  $\text{Ca}+\text{HCO}_3$  (c) et  $\text{Ca}+\text{Mg}+\text{HCO}_3$  (d) respectivement.

**Tableau 3** Indices de saturation des eaux souterraines dans le bassin du Djérid vis-à-vis des minéraux carbonatés et évaporitiques.

No.	Désignation	IS <sub>Calcite</sub>	IS <sub>Dolomite</sub>	IS <sub>Gypse</sub>	IS <sub>Halite</sub>
1	M. Zaeter	0.92	1.40	0.12	-5.07
2	M. Tatta	0.25	0.56	-0.01	-4.41
3	Nefta forêt	0.44	0.83	0.12	-5.24
4	Jhim forêt	0.14	0.44	-0.09	-4.55
5	A. Jhimi	0.41	0.71	0.15	-4.55
6	A. Sekala	0.46	0.83	0.07	-4.83
7	H. Maklouf	1.10	2.08	0.08	-4.58
8	K.Rhouma	0.63	1.18	-0.19	-4.21
9	Htam	0.09	0.34	-0.51	-5.29
10	Mzara	0.91	1.56	-0.51	-5.16
11	Garaet Jaballah	0.39	1.16	-0.87	-5.53
12	A. O.Ghrissi	1.05	2.17	-0.71	-5.26
13	Bir Roumi	0.38	0.98	-0.54	-5.30
14	Matrouha 2	0.56	1.44	-0.68	-5.51
15	R. Matoug 2	-0.61	0.27	-0.77	-5.75
16	Ghardgaya 4b	0.20	-0.43	-0.02	-5.67
17	PK 14b	0.72	1.65	-0.85	-5.43
18	Drâa CRDA	0.16	0.33	-0.27	-5.47
19	Hamma 14b	-1.42	-2.96	-0.41	-5.37
20	Tozeur 8	0.60	1.09	-0.37	-5.39
21	O. Koucha 2b	1.00	1.88	-0.49	-4.57
22	Deghoumes 4	-1.00	-2.13	-0.40	-5.36
23	Sabria Mol	0.09	0.69	-0.76	-4.88
24	Faouar 4	-1.26	-2.67	-1.00	-5.83
25	Fatnassa 2	-0.50	-0.94	-0.29	-4.82
26	Zarcine 1	-0.79	-1.78	-0.35	-5.10
27	Ras el Ain	-1.11	-2.24	-1.07	-6.06
28	Negga 6	-0.90	-1.82	-0.94	-5.64
29	Zafrane 3b	-1.26	-2.65	-1.04	-5.90
30	Jemna 1b	-0.69	-1.53	-0.67	-5.59
31	Douz 2b	-1.42	-2.95	-0.76	-5.59

D'autre part, le lessivage des sels par les événements pluvieux et le retour des eaux d'irrigation favorisent l'accumulation des sels dans les sols et contribuent à l'acquisition de la minéralisation des eaux de la nappe phréatique et celles des niveaux peu profonds de la nappe du CT (en particulier dans la Nefzaoua).

Le déficit en calcium observé dans la relation Ca vs SO<sub>4</sub> (Fig. 9(b)) peut être attribué à l'échange cationique entre Ca et Mg pour les eaux du PQ et du CT dans la Nefzaoua essentiellement (Fig. 11(a)). En ce qui concerne les eaux du CT du Djérid, ce déficit en Ca (Fig. 11(a)) est en relation avec le mécanisme d'échanges de base, par lequel le Ca<sup>2+</sup> est adsorbé à la surface des minéraux argileux contre la libération de Na<sup>+</sup>. Ces échanges sont mis en évidence par la relation (Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)-(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) en fonction de (Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>-Cl<sup>-</sup>) (Garcia *et al.*, 2001; Dassi, 2004) représentée dans la Fig. 11(b). Cette relation met l'accent uniquement sur les réactions pouvant exister entre les minéraux argileux et l'eau par soustraction d'ions issus d'éventuelles



**Fig. 11** Relation entre (a)  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  et (b)  $(\text{Ca}+\text{Mg})-(\text{HCO}_3+\text{SO}_4)$  vs  $(\text{Na}+\text{K}-\text{Cl})$  dans les eaux souterraines du bassin du Djérid.

dissolutions des minéraux carbonatés et évaporitiques selon les réactions suivantes (Appelo & Postma, 1994):

- Calcite:  $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$ ;
- Dolomite:  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 2\text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4\text{HCO}_3^-$ ;
- Gypse:  $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$ ; et  $\text{H}_2\text{O}$
- Halite:  $\text{NaCl} \rightleftharpoons \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ .

En absence d'échanges, tous les points représentatifs des échantillons devraient être placés à proximité de l'origine (McLean *et al.*, 2000), ce qui est le cas pour les eaux du PQ. Cependant, pour les eaux de la nappe du CT du Djérid, la Fig. 11(b) montre une augmentation de Na+K accompagnée d'une diminution de Ca+Mg.

## Isotopie

**Isotopes stables de la molécule d'eau ( $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ )** La gamme des valeurs obtenues en  $\delta^{18}\text{O}$  exprimées en ‰ varie de  $-6.11$  à  $-3.85$  avec une moyenne de  $-5.10$  pour la nappe du CT et de  $-4.90$  à  $-3.19$  avec une moyenne de  $-3.99$  pour la nappe phréatique. Les teneurs en deutérium varient entre  $-53.90$  et  $-43.60$ ‰ avec une moyenne de  $-48.24$  pour la nappe profonde et entre  $-49.20$  et  $-40.90$ ‰ avec une moyenne de  $-44.16$  pour la nappe phréatique.

Si on compare les teneurs moyennes en  $^{18}\text{O}$  et en  $^2\text{H}$  des eaux profondes du CT dans la zone d'étude ( $-5.10$  et  $-48.24$ ‰) avec les teneurs moyennes des précipitations pondérées recueillies à la station de Nefta pendant la période 2000–2003 ( $-3.18$  et  $-22.34$ ‰), on remarque que les eaux souterraines sont appauvries de  $1.92$ ‰ pour  $^{18}\text{O}$ . Cette différence de teneurs isotopiques peut être expliquée par une différence entre la température de formation des eaux de pluie actuelle dans la zone d'étude et celles des précipitations qui ont rechargé la nappe profonde. Cet effet thermique peut être lié à l'altitude de recharge.

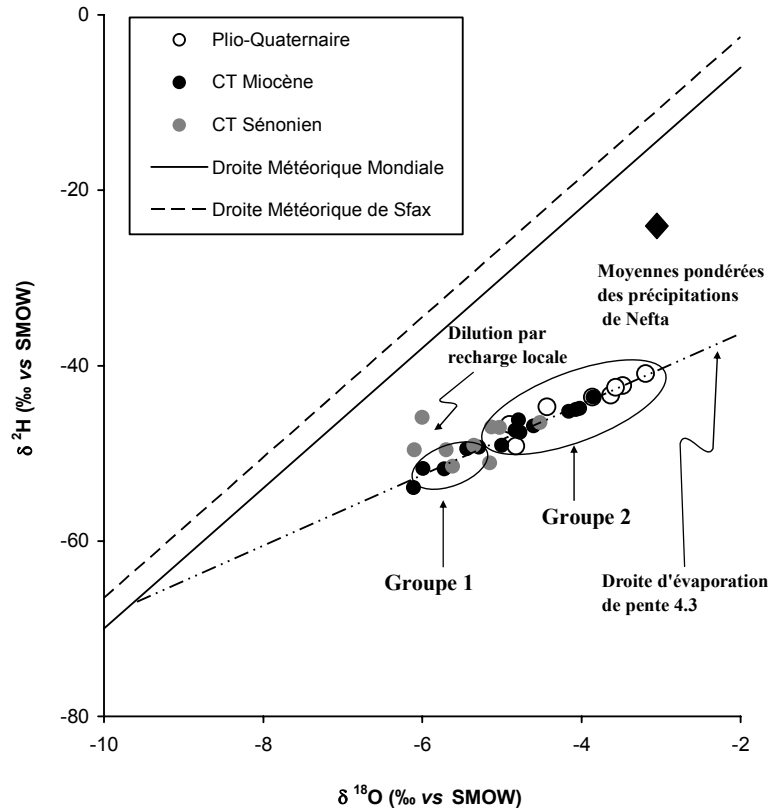


Fig. 12 Relation  $^{18}\text{O}$  vs  $^2\text{H}$  dans les eaux souterraines du bassin du Djérid.

En considérant un gradient altitudinal moyen en  $^{18}\text{O}$  de  $-0.3\text{‰}$  pour chaque 100 m d'altitude (Blavoux, 1978; Zuppi *et al.*, 1974; Maliki *et al.*, 2000) et en supposant que ce gradient n'a pas varié au cours du temps, on en déduit que les eaux souterraines du bassin du Djérid devraient être rechargées à une altitude moyenne de 640 m. Or les altitudes des reliefs bordant le bassin (chaîne nord des Chotts et le Dahar) ne dépassent pas les 450 m. Donc, les différences dans les compositions isotopiques entre les eaux de la nappe profonde et celles des précipitations actuelles ne peuvent pas être dues à un effet d'altitude et résulteraient d'un effet paléoclimatique. En effet, dans le diagramme  $^{18}\text{O}$  vs  $^2\text{H}$  (Fig. 12), les points représentatifs des eaux du CT se placent nettement en dessous de la droite météorique des précipitations mondiales "DMM" (Craig, 1961) et de la droite des précipitations de la ville de Sfax (Maliki, 2000). Cette observation, confortée par les activités  $^{14}\text{C}$  relativement faibles, indique l'origine ancienne de ces eaux, probablement en relation avec leur recharge durant les périodes humides et froides du Pléistocène. Ceci concorde avec les résultats obtenus au centre et au sud tunisien (Fontes *et al.*, 1983; Ouda *et al.*, 1999; Zouari *et al.*, 2003).

D'autre part, dans ce diagramme ( $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ ), les eaux de la nappe du CT se répartissent en deux groupes bien individualisés (Fig. 12). Le premier groupe, représenté par les forages captant le CT de la Nefzaoua et des niveaux aquifères les plus confinés du CT du Djérid, se distingue par des teneurs appauvries en isotopes stables (de  $-7$  à  $-5\text{‰}$  pour l'oxygène-18 et de  $-58$  à  $-49.5\text{‰}$  pour le deutérium). Ce groupe refléterait une signature isotopique des eaux de paléorecharge. Le deuxième groupe est constitué par les eaux du CT prélevées dans les niveaux aquifères les moins confinés et



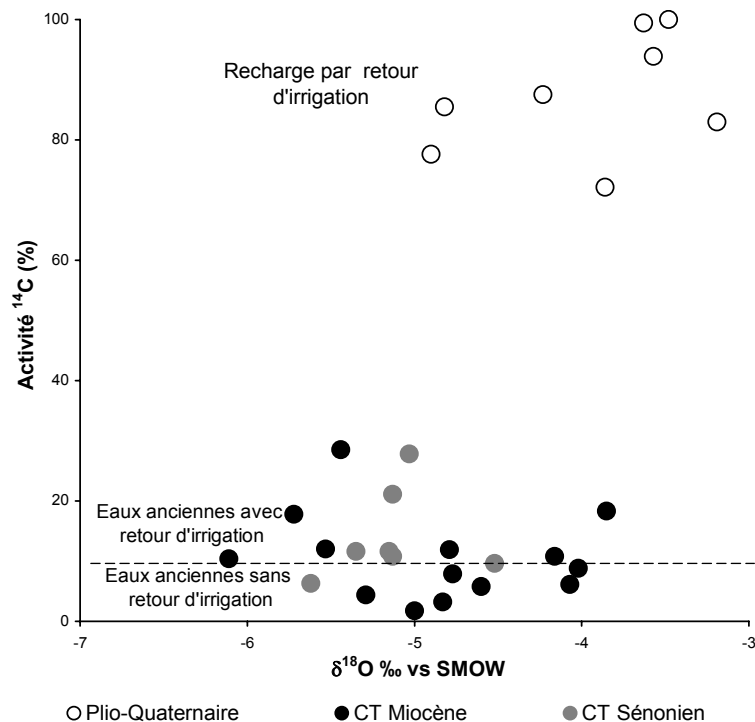
par les échantillons de la nappe phréatique du Djérid. Les eaux de ce groupe, qui se distinguent par des teneurs enrichies en isotopes stables (de  $-3$  à  $-5\text{‰}$  pour l'oxygène-18 et de  $-40$  à  $-50\text{‰}$  pour le deutérium), se placent aussi en dessous des droites météoriques mondiale et régionale indiquant également le caractère ancien de ces eaux.

En outre, dans le diagramme  $^{18}\text{O}/^2\text{H}$  (Fig. 12), les points représentatifs des eaux de ce deuxième groupe s'alignent sur une droite de pente 4.3 reflétant une évaporation de ces eaux. Cette évaporation a vraisemblablement eu lieu pendant la recharge par retour d'irrigation. La superposition des échantillons des eaux représentatifs de deux groupes le long de cette droite d'évaporation indique l'origine commune et le mélange de ces eaux. Cet effet de mélange est en relation avec la drainance ascendante à travers les unités hydrogéologiques captives, mécanisme classique, reconnu dans les aquifères à temps de résidence relativement long.

La Fig. 12, montre en plus des deux principaux groupes, deux points de la nappe du CT Sénonien qui se détachent de la droite d'évaporation/mélange mettant en évidence une probable dilution par recharge locale à travers les calcaires fissurés de la Nefzaoua.

**Isotopes radioactifs ( $^3\text{H}$  et  $^{14}\text{C}$ )** Les eaux du bassin du Djérid affichent des teneurs en tritium comprises entre 0.7 et 0.9 UT (Tableau 2). Compte tenu de l'incertitude sur les mesures, ces faibles teneurs en  $^3\text{H}$  sont peu significatives. Elles peuvent correspondre aussi bien aux eaux anciennes faiblement mélangées avec une recharge récente qu'aux eaux de recharge par les pluies actuelles dont les teneurs en tritium sont comprises entre 0 et 5 UT (Maliki, 2000).

Concernant l'isotope radioactif du carbone (Fig. 13), les eaux prélevées des forages captant le niveau les plus confinés du CT (groupe 1), affichent des activités



**Fig. 13** Variation des activités du  $^{14}\text{C}$  en fonction de  $^{18}\text{O}$  dans les eaux souterraines du bassin du Djérid.

comprises entre 3.6 et 8 pcm (Tableau 2). Ces faibles activités plaident en faveur de l'origine ancienne de ces eaux.

Les eaux prélevées dans la nappe phréatique du PQ, elle-même rechargée par le surplus d'eau d'irrigation pompée de la nappe du CT, affichent des activités  $^{14}\text{C}$  comprises entre 72 et 100 pcm malgré leur origine ancienne. Ces fortes activités indiquent un rajeunissement de ces eaux par équilibration avec le  $\text{CO}_2$  atmosphérique au moment de l'irrigation et pendant l'infiltration.

Les eaux des forages peu profonds du CT présentent des valeurs intermédiaires des activités  $^{14}\text{C}$  allant de 10 à 28 pcm. Ceci s'explique par l'effet de mélange avec les eaux de la nappe phréatique issues du retour d'irrigation.

## CONCLUSION

Le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère du bassin du Djérid est influencé et par la tectonique et par les variations lithostratigraphiques. En effet, le compartimentage des niveaux aquifères par des réseaux de failles E-O et N-S et les changements latéraux de faciès lithologiques et d'épaisseurs ont conduit au relais hydrogéologique entre les calcaires Sénoniens et les sables Miocènes du CT.

Les données chimiques montrent que les eaux de l'aquifère profond du CT et superficiel du PQ sont sulfatées calciques à l'ouest et chlorurées sodiques à l'est du bassin. La répartition spatiale de la salinité (résidu sec) indique l'existence d'une drainance descendante entre les niveaux superficiel et profond particulièrement dans le domaine oasisien. En dehors du milieu oasisien, la salinité des eaux croît, conformément à la piézométrie, des reliefs du Dahar (sud est) vers la zone des Chotts (nord ouest).

La dissolution du gypse, de l'halite et/ou l'anhydrite contribuerait à la salinisation des eaux de la nappe profonde et de surface. Ceci est d'ailleurs en parfait accord avec l'état de sous-saturation des eaux vis-à-vis de ces minéraux pour la majorité des points échantillonnés.

L'étude isotopique a mis en évidence l'origine et le mode de recharge des aquifères superficiel et profond. Les eaux profondes, provenant d'une recharge paléoclimatique affichent par endroits des activités  $^{14}\text{C}$  relativement fortes en dépit de leur origine ancienne. Ceci témoigne d'un rajeunissement apparent de ces eaux par drainance descendante à partir de la nappe phréatique rechargée par retour d'irrigation.

Ainsi l'étude hydrochimique et isotopique a pu confirmer l'intercommunication entre l'aquifère profond du CT et l'aquifère sus-jacent du PQ.

**Remerciement** Les auteurs remercient les correcteurs anonymes qui ont enrichi cet article par leurs critiques scientifiques.

## REFERENCES

- Appelo, C. A. J. & Postma, D. (1994) *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Ben Youssef, M. & Peybernes, B. (1986) Données micropaléontologiques et biostratigraphiques nouvelles sur le crétacé inférieur marin du Sud-Tunisien. *J. African Earth Sci.* **15**, 217–231.
- Blavoux, B. (1978) Etude de cycle de l'eau au moyen de l'oxygène-18 et du deutérium. Thèse Doctorat Etat, Univ. de Paris VI, Paris, France.

- Bouzaïdi, A. (1973) Réaction du palmier dattier à l'irrigation. Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE), Tunis, Tunisie. Internal Report 73-17.
- Brunhes, J. (1902) L'irrigation dans la péninsule ibérique et dans l'Afrique du Nord. Thèse de docteurs des lettres, Paris, France.
- Castany, G. (1982) Bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Algérie-Tunisie): aquifères du continental intercalaire et du Complexe Terminal. *Bulletin, Bureau Recherches Géologiques Minières (BRGM). Série 2*, 127–147.
- Chalabaoui, M. (1989) Etude de l'hydrogéologie et l'hydrologie urbaines de la ville de Sfax. Thèse 3ème cycle, Univ. de Tunis, Tunisie.
- Chalabaoui, M., Ben Dhia, H. & Turki, M. (2000) Nouvelles données sur la tectonique de la région des Chotts de Tunisie du Trias au Crétacé inférieur. *Africa Geosci. Rev.* **47**, 515–522.
- Craig, H. (1961) Isotopic variation in meteoric waters. *Science* **133**, 1702–1703.
- Dassi, L. (2004) Etude hydrogéologique, géochimique et isotopique du système aquifère du bassin de Sbeitla (Tunisie Centrale). Thèse 3ème cycle, Univ. de Sfax, Tunisie.
- DGRE (Direction Générale des Ressources en Eau) (2004a) Annuaire de l'exploitation des nappes profondes de la Tunisie. DGRE, Tunis, Tunisie.
- DGRE (Direction Générale des Ressources en Eau) (2004b) Annuaire piézométrique de la Tunisie. DGRE, Tunis, Tunisie.
- Fontes, J. C., Coque, R., Dever, L., Filly, A. & Mamou, A. (1983) Paléohydrologie isotopique de l'wadi el Akarit (sud tunisien) au Pléistocène et à l'Holocène. *Palaeogeogr. Palaeontol. Palaeogeol.* **43**, 41–61.
- Garcia, M. G., Del Hidalgo, M. & Blesa, M. A. (2001) Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman province. Argentina. *J. Hydrol.* **9**, 597–610.
- Maliki, M. A. (2000) Etude hydrogéologique, hydrochimique et isotopique de système aquifère de Sfax (Tunisie). Thèse 3ème cycle, Univ. de Tunis, Tunisie.
- Maliki, M. A., Krimissa, M., Michelot, J. L. & Zouari, K. (2000) Relation entre nappes superficielles et aquifère profond dans le bassin de Sfax (Tunisie). *C.R. Acad. Sci. Rev.* **331**, 1–6.
- Mamou, A. (1989) Caractéristiques, évaluation et gestion des ressources en eau du sud tunisien. Thèse 3ème cycle, Univ. de Paris-Sud, Orsay, France.
- Mamou, A. & Kassah, A. (2002) Eau et développement dans le sud tunisien. *Cah. du CERES, Série géogr.* **23**.
- McLean, W., Jankowski, J. & Lavitt, N. (2000) Groundwater quality and sustainability in alluvial aquifer, Australia. In: *Groundwater, Past Achievement and Future Challenges* (ed. by O. Sililo et al.), 567–573. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- ONM (Office National de la Météorologie) (1998) *Revue de l'Office National de la Météorologie* **98**(5), 3–9.
- Ouda, B., Zouari, K., Yermani, M., Mamou, A. & Michelot, J. L. (1999) Contribution des méthodes géochimiques et isotopiques pour la compréhension du système aquifère de Hajeb El Aioun-Djelma (Tunisie centrale). In: *Apport de la Géochimie Isotopique dans le Cycle de l'Eau* (Colloque Int., Hammamet, Tunisie, 6–7 août 1999), abstract 34–35. Lab. de Radio-analyses et Environnement, Sfax, Tunisie.
- Piper, A. M. (1944) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Trans. Am. Geophys. Union* **25**, 914–923.
- Plummer, L. N., Truesdell, A. H. & Jones, B. F. (1976) WATEQF, a Fortran IV version of WATEQ, a computer program for calculation chemical equilibrium of waters. *US Geol. Survey Report WRI, 76-13*.
- UNESCO (1972) Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. UNESCO Tech. Report 06-44.
- Zargouni, F. (1986) Tectonique de l'Atlas méridional de Tunisie, évolution géométrique et cinématique des structures en zones de cisaillement. Thèse 3ème cycle, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, France.
- Zouari, K., Chkir, N. & Ouda, B. (2003) Palaeoclimatic variation in Maknassi basin (central Tunisia) during Holocene period using pluridisciplinary approaches. IAEA Tech. Report 80-28, Int. Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- Zuppi, J. M., Fontes, J. Ch. & Létolle, R. (1974) Isotopes du milieu et circulations d'eaux sulfatées dans le Latium. Isotope techniques in groundwater hydrology, IAEA Tech. Report I, 341–361. Int. Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

Reçu le 7 juin 2005; accepté le 11 mars 2006