

# Transfert hydraulique entre les aquifères profonds du sillon des Chotts, sud-ouest tunisien

Fatma BEN BRAHIM, Salem BOURI

Laboratoire Eau-Energie-Environnement, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax-Tunisie. B.p.w.3038 e-mail: bfatma27@yahoo.fr

**RÉSUMÉ.** – L'étude du transfert hydraulique entre les aquifères profonds du Complexe Terminal (CT) et le Continental Intercalaire (CI) dans les régions situées au sillon des Chotts (Kébilli et Tozeur) a été menée dans ce présent travail par l'application de plusieurs approches axées sur l'hydrogéologie, l'hydrochimie et l'isotopie. L'examen des profils piézométriques effectués récemment prouvent l'existence d'un échange inter-aquifère ascendant du CI vers le CT probablement due à un réseau de failles très développé dans le secteur étudié. Le taux de mélange est estimé entre 57 % et 73 % par la méthode du Chlore et entre 57 % et 65 % par la méthode enthalpique, respectivement dans les régions de Tozeur et Kébilli.

En outre, l'étude de la relation entre les teneurs en oxygène-18 et/ou en deutérium en fonction des concentrations en chlorure a permis de confirmer le déroulement du processus de mélange qui est plus prononcé dans la région de Tozeur que dans la région de Kébilli.

Mots-clés : mélange, Chlorure, enthalpie, Complexe Terminal, Continental Intercalaire.

## Assessment of the hydraulic water transfer between the deep aquifers in southwest of Tunisia

**ABSTRACT.** – The hydraulic transfer between different aquifers, especially between the Complex Terminal (CT) and the Continental Intercalary (CI) in the regions of the Southwestern Tunisia (Kebilli and Tozeur) was corroborated in the present work by applying several approaches focused on hydrogeology, hydrochemistry and isotopic data. The study of piezometric profiles proves the ascending movement of thermal water from the CI to the CT, probably due to the abundant fractures in the study area. The mixing rate is estimated at between 57% and 73% by the Chloride method and between 57% and 65% by the enthalpy method, in Tozeur and Kebilli regions respectively.

Mixing effects characterizing the CI and the CT aquifers were identified using oxygen-18 and / or deuterium v.s. chloride concentrations. It has also confirmed that the mixing process is more pronounced in the Tozeur area.

Key-words: mixing, Chloride, enthalpy, Complex Terminal, Continental Intercalary

### I. INTRODUCTION

Le Sud-ouest tunisien est caractérisé par la présence de deux systèmes aquifères s'étendant sur de vastes étendues depuis l'Algérie à l'Ouest jusqu'au Libye à l'Est en passant par le Sahara septentrional de la Tunisie soit plus de 1 million de Km<sup>2</sup> [Besbes *et al.* 2002 ; SASS, 2003]. Ces deux systèmes sont : la nappe du Continental Intercalaire (CI) contenue dans les formations gréseuses du Crétacé inférieur et la nappe du Complexe Terminal (CT) logée, selon les secteurs, dans les formations carbonatées du Crétacé supérieur (Turonien et Sénonien) et les épisodes détritiques du Tertiaire [ERESS, 1972; Gonfiantini *et al.*, 1974; Edmunds *et al.*, 1997 ; OSS, 2003]. Ces formations aquifères sont généralement séparées par des couches semi ou peu perméables. Toutefois, ces réservoirs indépendants peuvent communiquer entre eux à la faveur des failles ou des discordances.

En se référant à ces différentes études, et à la lumière des nouvelles données hydrogéologiques, hydrochimiques et isotopiques, nous aborderons dans cette étude les caractéristiques hydrogéologiques des principaux aquifères profonds, afin de mieux affiner leur modèle du fonctionnement hydrodynamique et estimer leur taux de mélange.

### II. CADRE GENERAL

La zone d'étude est limitée à l'Ouest par la frontière algérienne et à l'Est par le golfe de Gabés, au Nord par la région de Gafsa et au Sud par la région de Tataouine (Fig. 1). Le climat qui règne dans ce secteur est de type aride à semi-aride avec des tendances sahariennes. Les précipitations se caractérisent par leur irrégularité et leur violence, elles ne dépassent qu'exceptionnellement 100 mm/an.

### III. CADRE GEOLOGIQUE

Les formations géologiques affleurantes dans le Sud-ouest tunisien sont essentiellement d'âge secondaire et correspondent plus particulièrement au Crétacé inférieur dont la puissance est très importante de sorte que même les sondages pétroliers de 5000m n'ont pu que toucher le sommet de jurassique. L'évolution tectonique de la région au cours des temps géologiques, a largement favorisé l'individualisation de grandes unités structurales dont principalement l'anticlinal du chott El Fedjej, la chaîne de Tebaga de Kébilli et le massif du Dahar. Dans la région du Djérid, le dernier mouvement orogénique alpin, a engendré un

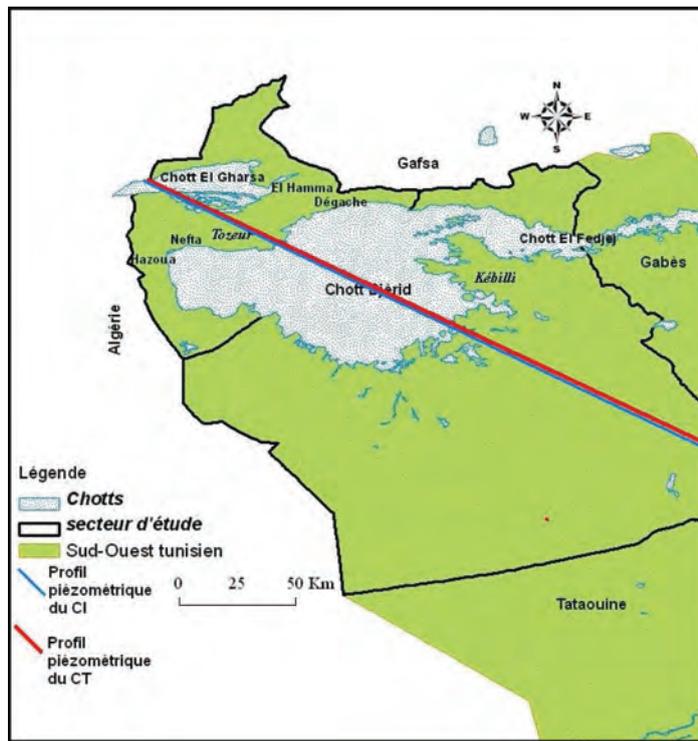


Fig. 1 : Carte de localisation de la zone d'étude.

soulèvement anticlinal donnant naissance à la ride de Tozeur. Cette structure est bordée par deux failles majeures parallèles de direction E-O [Zargouni *et al.*, 1985]. Le système aquifère du Continental, est logé dans les formations gréseuses du Crétacé inférieur (Néocomien, Barrémien, Aptien et Albien). Il est séparé de l'aquifère du Complexe Terminal par des couches semi ou peu perméables. Toutefois, ces réservoirs indépendants peuvent communiquer entre eux à la faveur des failles ou des discordances. Le système aquifère du complexe terminal, est logé dans les formations englobées qui sont déposées au Sahara au cours de la période qui s'étend du Sénonien inférieur au Mio-Pliocène [Kamel *et al.*, 2005]. Les différentes formations aquifères, caractérisant les deux systèmes aquifères, sont généralement séparées par des couches semi-perméables faiblement productives. Ces couches traitées en aquitards permettent généralement d'assurer l'échange hydraulique des aquifères sur l'ensemble des deux régions, à savoir la région de Djérid et la région de Nefzaoua (Fig. 2).

#### IV. CADRE HYDROGEOLOGIQUE

En se basant sur les levés piézométriques des forages profonds appartenant au secteur étudié, la carte piézométrique de la nappe du CI (Fig. 3) montre que l'écoulement principal des eaux souterraines converge vers la dépression du Chott Djérid qui constitue son exutoire naturel, située dans la région de Kébilli, tandis que la recharge se fait à travers les séries sommitales affleurant au niveau de la chaîne du Dahar. Notons toutefois que, l'espacement variable des courbes isopièzes met en évidence une variation du gradient hydraulique de la nappe, probablement en relation avec les variations latérales de faciès et d'épaisseur des formations aquifères du CI.

La nappe du Complexe Terminal est captive sous les couches argileuses du Mio-Pliocène à l'exception de la zone qui se situe le long de l'axe anticlinal du Drâa Djérid. De ce fait, elle est artésienne sous les Chotts El Djérid et El Gharsa et à leurs périphéries.

L'artésianisme constaté sur une grande partie du Djérid et de la Nefzaoua, est responsable du jaillissement des sources thermales.

La pression au niveau du sol peut atteindre une quarantaine de mètres au maximum, cependant on assiste à un déclin continu de l'artésianisme sous l'effet de l'exploitation de la nappe qui ne cesse de s'accroître. Cette pression est actuellement d'environ 40 m à Dhafria, 18 m à Hazoua et Dghoumess, de 10m à Drâa Sud. Dans les autres zones le niveau piézométrique, est affleurant ou à quelques mètres du niveau du sol.

L'étude comparative de la piézométrie de la nappe du CT entre 1988 et 2008 (Figs. 4 et 5) montre que dans la région de Tozeur et la région de Kébilli, l'allure générale des courbes isopièzes a totalement changé. En 1988, ces courbes présentaient une allure presque rectiligne témoignant d'une nappe plus ou moins plate qui s'est transformée en une nappe concave à filets convergents (Fig. 5). Ce changement s'explique par la surexploitation de la nappe du CT surtout dans la partie du bassin de Djérid où sont localisés la quasi-totalité des forages aux alentours de Nefta, Tozeur, Dégache et El Hamma [Ben Brahim, 2013].

#### V. ETUDE DU TRANSFERT HYDRAULIQUE INTER-AQUIFERES

##### V.1. Relation hydrodynamique entre CT-CI

L'étude de la relation hydrodynamique CT-CI a révélé l'existence d'un échange hydraulique entre les deux

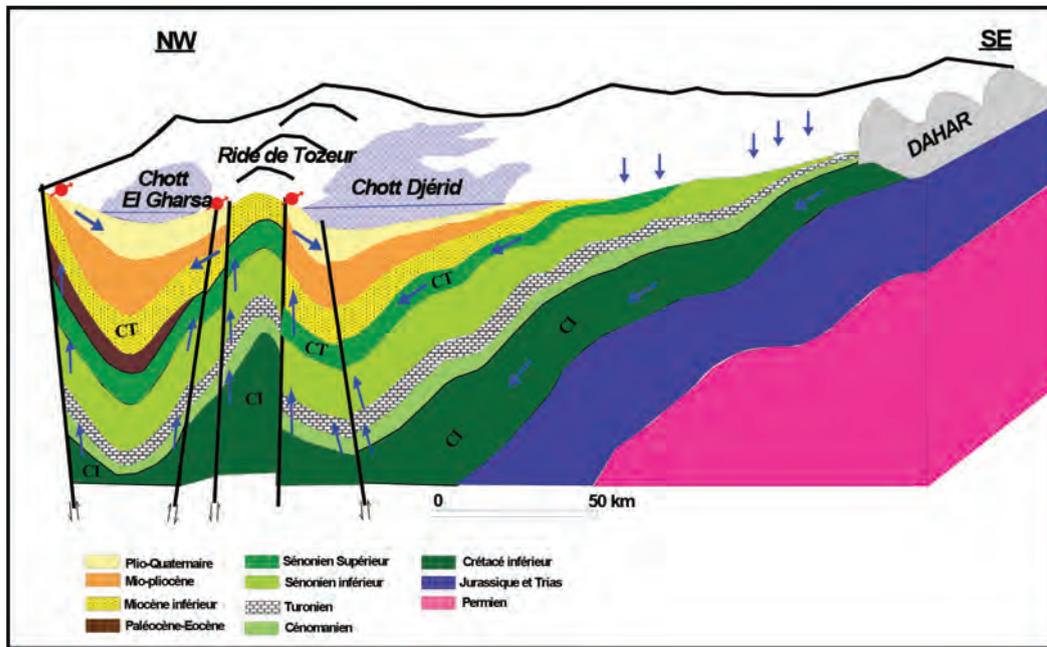


Fig. 2 : Schéma de synthèse géologique des systèmes aquifères au Sud-Ouest tunisien.

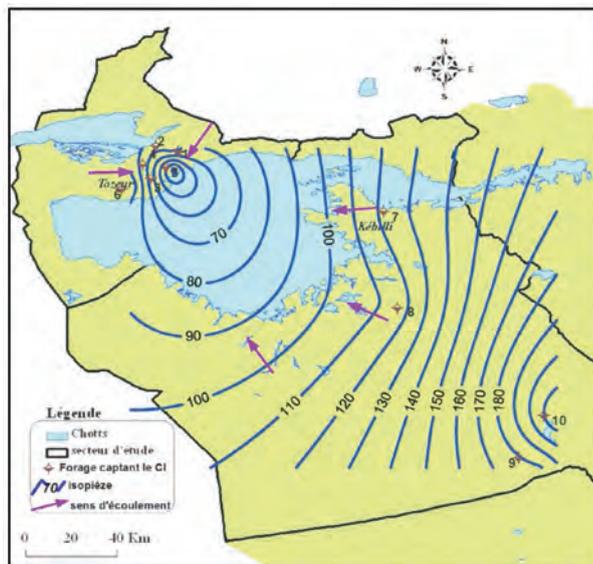


Fig. 3 : Carte piézométrique du Continental Intercalaire du Sud-Ouest tunisien en 2008.

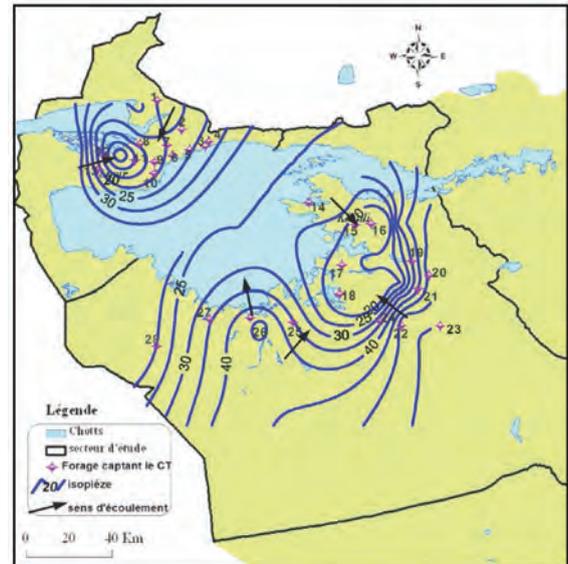


Fig. 4 : Carte piézométrique du Complexe Terminal du Sud-Ouest tunisien (2008).

aquifères superposés, qui peut se faire par le biais des failles subverticales très dominantes dans le Sud-Ouest tunisien. Le sens de drainage est déterminé par la différence de la pression des deux aquifères. En outre, les profils piézométriques effectués (Fig. 1 et Fig. 6) prouvent que tout au long du secteur étudié, le flux d'eau est ascendant, et la nappe du CI alimente la nappe sus-jacente du CT.

## V.2. Evaluation du taux de mélange

Pour évaluer le taux de mélange dans un gisement géothermal il est nécessaire de calculer la fraction de mélange

de chaque réservoir. Quand les eaux souterraines atteignent la surface, elles sont mélangées avec les eaux des roches traversées. Le taux de mélange peut être évalué par deux méthodes : une première avec l'utilisation de la teneur en chlore en fonction de la température et une deuxième avec l'utilisation de la teneur en silice et de l'enthalpie [Makni *et al.*, 2012].

### V.2.1. Méthode du Chlore

Par sa propriété de ne pas participer dans les réactions chimiques régulières dans des grandes concentrations et températures, le Chlore est utilisé pour estimer la fraction de mélange [Truesdell et Fournier, 1974].

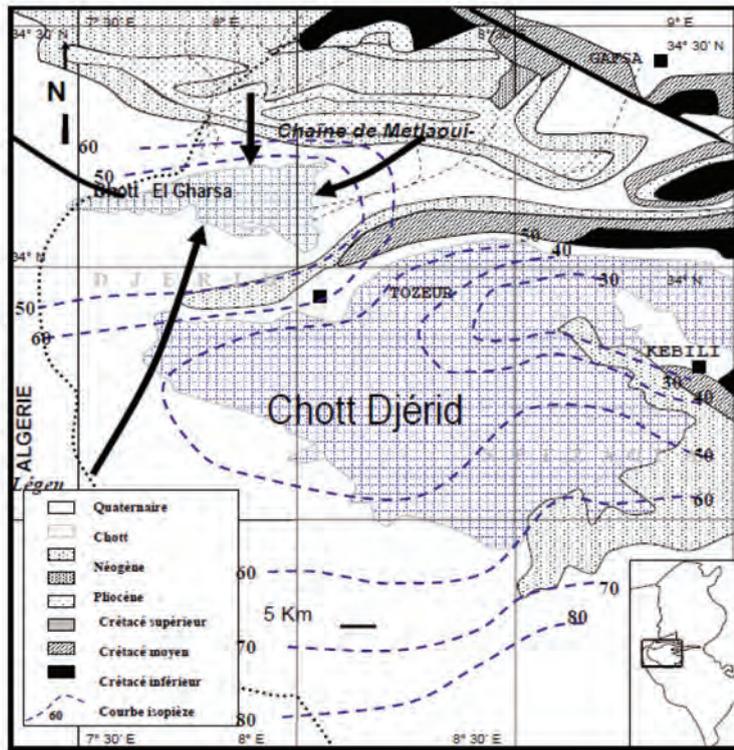


Fig. 5 : Situation piézométrique du Complexe Terminal au Sud-Ouest tunisien en 1988 [Abidi, 2007].

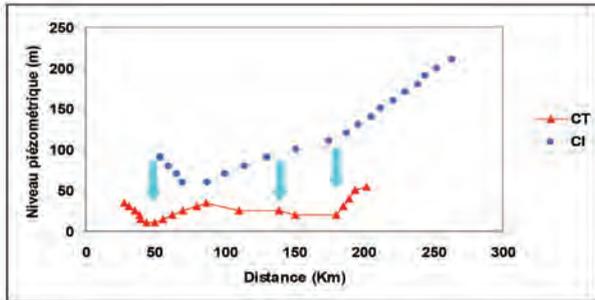


Fig. 6 : profils piézométriques (orientés Nw-SE) montrant la situation piézométrique des deux nappes étudiées.

En supposant la conservation des Cl, le mélange d’eaux froides avec les eaux thermales est estimé en utilisant l’équation suivante [Han, 2010]:

$$R = [(Cl_T - Cl_M) / (Cl_T - Cl_F)] * 100\%$$

Cl<sub>M</sub> = concentration du chlore des eaux du mélange;  
 Cl<sub>F</sub> = concentration du chlore des eaux froides;  
 Cl<sub>T</sub> = concentration du chlore des eaux thermales.

Pour appliquer cette méthode on a choisi des points d’eaux qui ont des caractéristiques physicochimiques différentes (chaude, froide et de mélange), dans les deux régions étudiées (Tab. 1 et Tab. 2)

L’application de cette équation a montré un taux de mélange de presque 57 % à Kébili et à environ 73 % à

Tozeur. Ce résultat est fortement lié à l’abondance des failles surtout dans les régions de Djérid qui favorise l’ascension des eaux thermales logeant la formation de Sidi Aïch d’âge Barrémien –Aptien (aquifère du CI) vers le surface et leur mélange avec les eaux de la formation Bégliia d’âge Miocène inférieur (aquifère du CT).

### V.2.2. Méthode enthalpique

L’eau chaude peut avoir, par exemple, été mélangée avec de l’eau froide en sub-surface produisant une eau à faible température et à faible teneur en silice, si le volume d’eau froide est important. La température et la proportion de l’eau chaude de tels mélanges peuvent être estimées en utilisant le modèle de mélange de Fournier et Truesdell [1974] et Truesdell et Fournier [1977].

Le modèle de Fournier et Truesdell [1974] utilise deux équations pour déterminer les deux quantités inconnues :

- (1) la température de l’eau chaude ;
- (2) les proportions d’eaux chaude et froide.

La première équation relie les enthalpies des eaux chaude et froide à celle de la source comme suit :

$$H_c(X) + H_h(1-X) = H_{sp}$$

H<sub>c</sub> = enthalpie de l’eau froide ;  
 H<sub>h</sub> = enthalpie de l’eau chaude ;  
 H<sub>sp</sub> = enthalpie de l’eau de source ;  
 X = fraction de l’eau froide ;  
 1 - X = fraction de l’eau chaude.

Tab. 1 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux de Kébilli.

Type d'eau	Forage	T (°C)	RS (mg/l)	Cl (mg/l)	Silice (mg/l)	Enthalpie (KJ/Kg)
Eau du mélange	Bled el Faroun	32.7	2.4	712.9	39	470
Eau froide	Sabria Mol	24	1.1	221.5	13	229
Eau thermale	Douz CI12	53	3.6	1360	37	507

Tab. 2 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux de Tozeur.

Type d'eau	Forage	T (°C)	RS (mg/l)	Cl (mg/l)	Silice (mg/l)	Enthalpie (KJ/Kg)
Eau du mélange	Htam	37.4	2.9	760.6	57	602
Eau froide	Tamerza sonede	24.5	1.3	151.8	21	487
Eau thermale	Tozeur CI1	67	7.05	5960	44	615

La seconde équation relie la teneur en silice des eaux chaude ( $Si_h$ ) et froide ( $Si_c$ ) à celle de l'eau de la source ( $Si_{sp}$ ), comme suit :

$$Si_c(X) + Si_h(1-X) = Si_{sp}$$

$Si_c$  = teneur en Si dans l'eau froide ;

$Si_h$  = teneur en Si dans l'eau chaude ;

$Si_{sp}$  = teneur en Si dans l'eau de source ;

La méthode conçue par Fournier et Truesdell [1974] est essentiellement une solution graphique dont l'approche est décrite ci-dessous. Les valeurs d'enthalpie d'eau chaude associées à différentes températures sont supposées et utilisées pour obtenir les valeurs de la fraction d'eau froide (Tab. 3):

$$X_t = \frac{H_h - H_{sp}}{(H_h - H_{\text{d'eau souterraine non thermique}})}$$

Les teneurs en Silice de l'eau chaude sont supposées à différentes températures et utilisées pour le calcul de la valeur de fraction d'eau froide  $X_{Si}$  à chaque température choisie :

$$X_{Si} = \frac{Si_c - Si_{sp}}{(Si_c - Si_{\text{d'eau souterraine non thermique}})}$$

Si la température et la teneur en Silice de l'eau souterraine froide ne sont pas connues, Fournier et Truesdell [1974] suggèrent d'utiliser la température moyenne annuelle et une concentration de 25 mg/l de silice dans une première approximation.

Les valeurs calculées de  $X_t$ ,  $X_{Si}$  sont représentées comme des courbes sur un graphe représentant la température en fonction de la fraction d'eau froide (X). Le point où les courbes se croisent donne une estimation de la fraction d'eau froide et de la température de l'eau chaude.

L'application de ce modèle sur les eaux des régions étudiées a révélé que la représentation graphique de la variation de  $X_t$  et  $X_{Si}$  en fonction de la température (Fig. 7) a permis de déterminer la température estimée des eaux thermales et la fraction des eaux froides (le point d'intersection des deux courbes). En effet, pour la région de Kébilli, ce modèle a montré que les eaux de mélange (F. Bled Faroun) présentent une contribution d'environ 57 % des eaux froides provenant du CT et une température estimée du réservoir d'origine (CI) de l'ordre 105°C. Tandis que, la modèle relative de la région de Tozeur a montré que les eaux de mélange (F. Htam) présentent une contribution d'environ 65 % des eaux froides provenant du CT et une température estimée du réservoir d'origine (CI) de 115-120°C. Ce qui confirme bien la drainage des eaux thermales du CI dans les niveaux aquifères du Complexe Terminal dans les deux régions étudiées.

Tab. 3 : Variation de l'enthalpie et de la teneur en silice en fonction de la température [Fournier et Truesdell, 1974].

Température (°C)	Silice (mg/ l)	Enthalpie (cal /g)
50	13.5	50
75	26.6	75
100	48	100.1
125	80	125.4
150	125	151
175	185	177
200	265	203
225	365	230.9
250	486	259.2

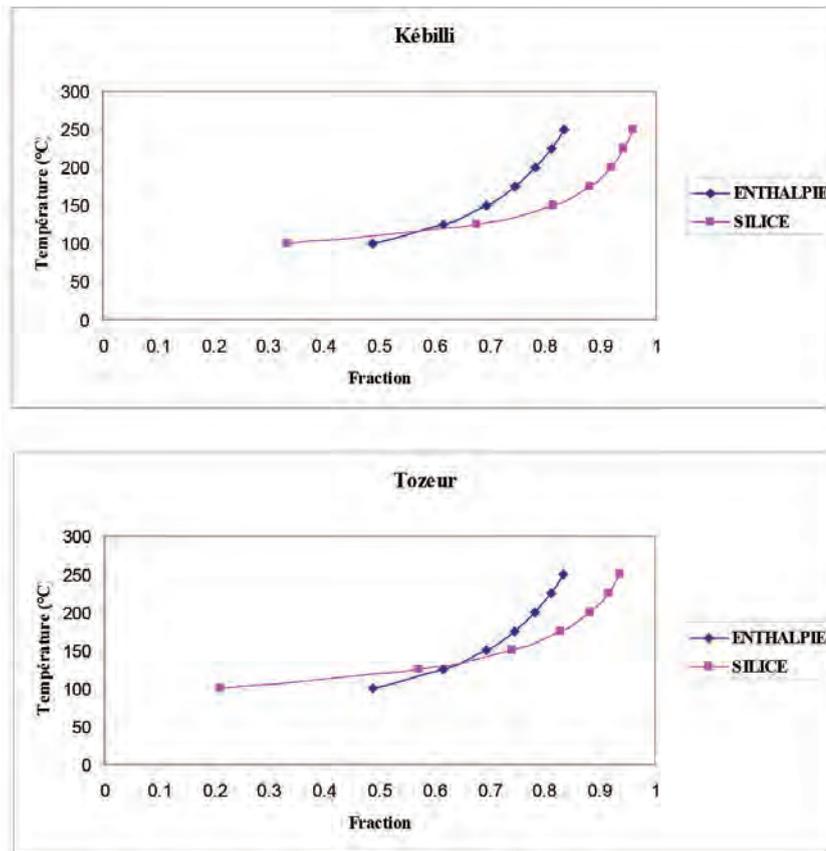


Fig. 7 : Relation entre fraction d'eau froide et la température des eaux thermales.

**V.3. Relation entre teneurs en oxygène-18 et teneurs en chlorure**

Le chlore est considéré comme un traceur chimique conservatif. Ainsi la combinaison entre la teneur en isotopes stable <sup>18</sup>O de la molécule de l'eau et la concentration en chlorure peut fournir des informations relatives sur les mécanismes responsables de l'acquisition de la charge saline des eaux de différentes nappes (phénomène de mélange et d'évaporation) [Kamel, 2007]. En effet, les teneurs en chlorures dans les eaux de la nappe du CT varient entre 4.28 et 28.96 méq/l au niveau de la région de Tozeur et entre 8.65 et 77.11méq/l au niveau de la région de Kébili.

En revanche, les teneurs en chlorures dans les eaux de la nappe du CI varient entre 9.03 et 16.9 méq/l au niveau de la région de Tozeur et de 13.09 et 23.98 méq/l au niveau de la région de Kébili. A partir de cette représentation (Fig. 8) on peut déduire que les eaux du CT sont caractérisées par des faibles concentrations en chlorures et des teneurs en isotopes stables relativement fortes. Cet enrichissement en isotopes stables semble être le résultat de l'infiltration relativement lente des eaux (de précipitation et d'irrigation) ; de même on note la tendance d'un mélange entre les eaux anciennes du CI et les eaux du Miocène inférieur dans la région de Tozeur. Ces eaux sont caractérisées par des concentrations variables en chlorure et teneurs appauvries en

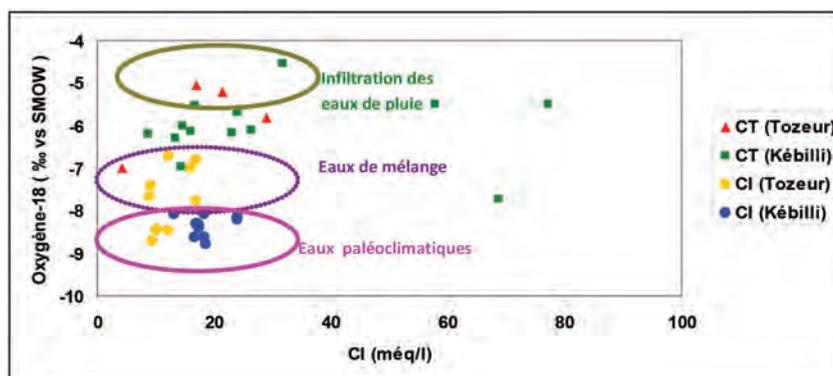


Fig. 8 : Corrélation entre les concentrations en Chlorure et les teneurs en <sup>18</sup>O des eaux souterraines dans le Sud-Ouest tunisien.

isotopes stables. Notons toutefois un mélange d'eau entre le CT et le CI plus prononcé à Tozeur qu'à Kébilli.

#### V.4. Relation entre teneurs en deutérium et teneurs en chlorure

La combinaison entre ces deux paramètres (Fig. 9) a permis de distinguer nettement le processus de mélange entre différents types d'eau de composition isotopique différente. L'infiltration récente des eaux de pluie au sein de la nappe du Sénonien se manifeste par un enrichissement des teneurs en isotopes stables et une diminution des teneurs en chlorure. Ces eaux sont caractérisées par une concentration moyenne en Cl de 30.1 méq/l et une moyenne des teneurs en deutérium de -49.59 ‰. Cependant, l'effet du mélange des eaux du CT avec les eaux profondes de la nappe du CI engendre un net appauvrissement des teneurs en isotopes stables et une légère augmentation dans les teneurs en chlorure.

Toutefois, on note la présence des eaux relativement récentes mais caractérisées par un enrichissement en chlorure témoignant d'un lessivage intense des niveaux évaporitiques du CT dans la région de Kébilli.

#### V.5. Relation $\delta^{18}\text{O}$ / $\delta^2\text{H}$

Sur le diagramme  $^{18}\text{O}/^2\text{H}$  des eaux souterraines des deux nappes étudiées dans la région de Kébilli (Fig. 10a), tous les points représentatifs se placent largement en dessous des droites météoriques mondiale et locale indiquant leur long séjour dans le réservoir, probablement en relation aux périodes de humides du Pléistocène [Mamou, 1990].

D'autre part, si on compare les teneurs moyennes en oxygène-18 et en deutérium des eaux de la nappe du CI (-8.36 et -67.06 ‰ vs SMOW) dans la région de Kébilli avec celles des précipitations pondérées à la station régionale de Sfax (précipitation dont la hauteur dépasse 5mm), favorables à la recharge des aquifères :  $\delta^{18}\text{O} = -4.6$  et  $\delta^2\text{H} = -23.3$  ‰ vs SMOW [Maliki, 2000], on remarque que les eaux de l'aquifère du CI se caractérisent par un appauvrissement relativement importante, ce qui conduit à admettre que les eaux de cette nappe ne sont pas le résultat d'une recharge actuelle.

Une telle différence entre les teneurs isotopiques des eaux de la nappe du CI et celles des pluies actuelles peut être expliquée par la différence entre la température de formation des précipitations actuelles et celles des pluies qui ont contribué à la recharge de l'aquifère du CI.

Cette variation thermique est liée à un effet paléoclimatique [Tarki, 2008]. Cela signifie que la recharge des eaux souterraines de la nappe du CI a été effectuée dans des conditions climatiques plus froides que celles qui règnent actuellement dans la région de Kébilli. Cette recharge ancienne a été évoquée dans plusieurs études intéressantes les eaux anciennes du CI et du CT au Sud tunisien et en Algérie qui se basent, entre autres, sur les datations carbone-14 [Edmunds *et al.*, 2003; Kamel *et al.*, 2005; Kamel, 2007].

Pour la région de Tozeur, les eaux de l'aquifère du CT (Fig. 10b) sont relativement enrichies en isotopes stables par rapport aux eaux du CI (entre -7.9 et -5 ‰ vs SMOW pour l'oxygène-18 et entre -50.55 et 60 ‰ vs SMOW pour le deutérium). Elles se situent en dessous des droites météoriques mondiale et locale (GMWL et SMWL), mais nettement plus proches de la droite météorique mondiale (GMWL). Ceci suggère que les masses de vapeur qui ont participé à la recharge de différentes nappes dérivent probablement d'une origine océanique et non méditerranéenne [Ben Brahim, 2013].

En outre, la figure 10 montre une tendance en suivant une ligne, qui s'étend vers les points d'eaux captant le CI. Les points représentatifs d'échantillons d'eau du CT tracés sur cette ligne, indiquent probablement leur mélange avec la remontée des eaux du CI par l'intermédiaire des fractures abondantes.

## VI. CONCLUSIONS

Suite à cette approche pluridisciplinaire, il a été possible de confirmer le transfert d'eaux inter-aquifères et d'évaluer le taux de mélange entre le CI et le CT caractérisant le Sud-Ouest tunisien. En effet, l'évaluation du taux de mélange est estimée entre 57 et 73 % par la méthode du Chlore et entre 57 % et 65 % par la méthode enthalpique, respectivement dans les régions de Tozeur et Kébilli.

Le traçage des eaux souterraines par le couple  $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$  a permis d'identifier les pôles d'eaux anciennes et des eaux récentes ainsi que la droite de mélange qui relie ces deux pôles.

Rappelons que l'estimation du taux de mélange et les transferts inter-aquifères profonds se base principalement sur certaines caractéristiques des aquifères et sur l'étude de la pression des nappes en question, eux-mêmes dépendent de paramètres naturels et anthropiques et les incertitudes pouvant

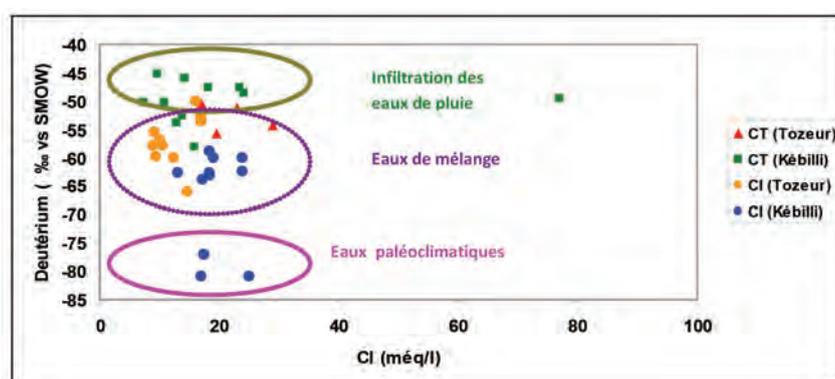


Fig. 9 : Variation des teneurs en deutérium en fonction des concentrations en chlorure des eaux des nappes étudiées.

affecter les résultats obtenus. Remarquons que tout paramètre chiffré est entaché d'une erreur plus ou moins importante et dont l'estimation s'avère très difficile. Dans la présente étude, il est quasi-impossible de trancher entre les résultats obtenus par les deux méthodes. Notons toutefois que la démarche d'estimation du taux de mélange présente, comme toute autre approche, des limites de validation. Ainsi, il est recommandé d'appliquer de multiples méthodes d'estimation et de voir la ligne de convergence des méthodes utilisées.

## VII. REFERENCES

- ABIDI B. (2007) — *Caractérisation hydrogéologique, géochimique et isotopique des systèmes aquifères du synclinal de Tamerza et de la plaine de Chott El Gharsa (Sud ouest de la Tunisie). Thèse de 3ème cycle. Fac. Sci. Sfax*
- BEN BRAHIM F. (2013) — *Caractérisation hydrogéologique, hydrochimique et géothermique des systèmes aquifères du Sud ouest Tunisien Thèse Doctorat en Sciences géologiques Faculté des Sciences de Sfax –Tunisie*
- BESBES M., BABASY M., KADRI S., LATRECH D., MAMOU A., PALLAS P. ET ZAMMOURI M. (2002) — Conceptual framework of the North Western Sahara Aquifer System. *proceedings of the International worksho p. Tripoli, Libye2002*. 164p
- EDMUNDS WM., GUENDOZ AH., MAMOU A., MOULA A., SHAND P., ZOUARI K. (2003) — Groundwater evolution in the continental intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicators. *Appl Geochem*. **18** : 805-822
- ERESS. (1972) — *Nappe du Continental Intercalaire, plaquette n°2, UNESCO, paris*. 47 tabl. 12 pl
- GONFIANTINI R., CONRAD G., FONTES J. CH., SAUZAY G. ET PAYNE B. R. (1974) — Etude isotopique de la nappe du Continental Intercalaire et ses relations avec les autres nappes du Sahara septentrional. In: *Isotope Technique in groundwater, Hydrology, March 1974. proceed. Symp., IAEA, Vienna*. **I** : 227-24
- HAN D.M., LIANG X., JIN M.G., CURRELL M.J., SONG X.F. ET LIU C.M. (2010) — *Evaluation of groundwater hydrochemical characteristics and mixing behaviour in the Daying and Qicun geothermal systems, Xinzhou Basin*
- KAMEL S., DASSI L., ZOUARI K., ABIDI B. (2005) — Geochemical and isotopic investigation of the aquifer system in the Djerid-Nezaoua basin, southern Tunisia. *Environ Geol*. **49(1)** : 159-170
- KAMEL S. (2007) — *Caractérisation hydrodynamique et géochimiques des aquifères du Djérid (Sud Ouest tunisien). Thèse de Doctorat. Es Science, Université, Tunis El Manar*. 230 p
- MAKNI J., BEN BRAHIM F., HASSINE S., BOURI S. ET BEN DHIA H. (2012) — Hydrogeological and mixing process of waters in deep aquifers in arid regions: south east Tunisia. DOI10.1007/s12517-012-0793. *Arab J Geosci*
- MALIKI M. A., KRIMISSA M., MICHELOT J. L. ET ZOUARI K. (2000) — Relation entre nappes superficielles et aquifère profond dans le bassin de Sfax (Tunisie). *C. R. Acad. Sc. paris*. **331** : 1-6
- MAMOU A. (1990) — *Caractéristiques et évaluation des ressources en eau du sud tunisien : thèse de doctorat d'état des sciences naturelles*. 426 p
- OSS. (2003) — *Système aquifère du Sahara septentrional : Observatoire du Sahara et du Sahel. Tech Rep, Tunis*. 9973-856
- SASS (2003) — *Système Aquifère du Sahara Septentrional : Gestion commune d'un bassin transfrontière. Rapport de synthèse*
- TARKI M. (2008) — *Relations hydrauliques entre les aquifères superposés du bassin de Djérid: approches géochimiques et isotopiques. Mémoire de mastère en géosciences appliquées aux ressources et environnements naturels. Faculté des Sciences de Sfax, Université de Sfax, Tunisie*
- TRUESDELL A.H. ET FOURNIER R.O. (1974) — Calculation of deep temperatures in geothermal systems from the chemistry of boiling spring waters of mixed origin. *proceedings, Second U.N. Symposium on Geothermal Resources, San Francisco, CA*. 837-844
- TRUESDELL A.H. ET FOURNIER R.O. (1977) — Procedure for estimating the temperature of a hot water component in a mixed water by using a plot of dissolved silica versus enthalpy. *USGS J. Research*. **5** : 49-52
- ZARGOUNI F., RABIA M CH., ABBES C. (1985) — Rôle des couloirs de cisaillement de Gafsa et de Negrine-Tozeur dans la structuration du Faisceau Sud-atlasique. *C.R. Acad. Sc. paris*. **301(II)** : 831-834