ETUDE DU ROLE DE LA ZONE NON SATUREE DANS LE FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES KARSTIQUES DES MONTS DE TLEMCEN PAR L'UTILISATION DES ELEMENTS DE L'EQUILIBRE CALCO-CARBONIQUES

THE ROLE OF THE UNSATURATED ZONE ON THE FUNCTIONING OF KARST SYSTEMS USING THE CALCO-CARBONIC EQUILIBRIUM ELEMENTS IN TLEMCEN MOUNTAINS (NORTHWEST ALGERIA)

Habib AZZAZ, *Université de Mascara, azzazh@yahoo.fr*
Abdelkader KHALDI, *Université de Mascara, Khaldi3dz@yahoo.fr*
Mohamed MEDDI, *Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique, mmeddi@yahoo.fr*
Belkacem BEKKOUSSA, *Université de Mascara, bekkoub@yahoo.fr*

RESUME : L'objectif de ce travail est d'approfondir des connaissances du fonctionnement des systèmes karstiques dans les Monts de Tlemcen (Nord-Ouest d'Algérie), en s'appuyant essentiellement sur des approches hydrochimiques relatives aux éléments de l'équilibre calco-carbonique. Le suivi mensuel chimique et hydrométrique à l'exutoire des principaux systèmes karstiques sur plusieurs cycles hydrologiques révèle l'influence très nette de l'eau stockée ou en transit dans la zone non saturée. La restitution de ces eaux peut s'étaler sur plusieurs mois ce qui explique l'importance et la relative régularité des débits d'étiage. Les éléments des équilibres calco-carboniques ont mis en évidence pour la majorité des systèmes étudiés un fonctionnement par effet piston au moment de la reprise. La combinaison des informations apportées par les traceurs du temps de séjour de l'eau au sein de l'encaissant tels que le carbone organique total (COT) et le magnésium a permis de définir une typologie qualitative des écoulements au sein des principaux systèmes.

Mots-clés : Taga, Tellout, Zone non saturée, Karst, Hydrochimie.

ABSTRACT: The aim of this work is to improve our knowledge about the functioning of karst systems in the Tlemcen Mountains (Northwest Algeria), using hydrochemical approaches related to calco-carbonic equilibrium elements. The monthly chemical and hydrometric monitoring (2000-2006) at spring outlets of the main karstic systems reveal the very net influence of the water stored in, or transiting through the unsaturated zone. The

restoration of these waters can spread over several months which explain the importance and the relative regularity of the lowest flow. Calco-carbonic equilibrium elements have permitted to demonstrate that the majority of aquifers show a functioning by "piston flow" during flood events. The combination of information provided by the tracer residence time of water within the host rock such as total organic carbon (TOC) and magnesium allowed us a qualitative typology of flows in key systems.The combination of the information gained from tracers of residence time (as Mg and TOC) enabled us a qualitative typology of the flows in the main systems.

Keywords: Karst, Unsaturated Zone, Hydrochemistry, Taga , Tellout .

INTRODUCTION

La genèse du système karstique est étroitement liée aux conditions d'équilibre du milieu, qui sont régies par les lois du système calco-carbonique. Les études effectuées dans ce domaine ont rapidement montré l'importance primordiale du gaz carbonique dans le processus de karstification (Bakalowicz, 1979). En effet, c'est le CO_2 dissous ou acide carbonique qui est à l'origine de la dissolution de la roche calcaire suivant les réactions d'équilibre faisant intervenir pCO_2, CO_2 dissous, Ca^{2+}, HCO_3^- et Mg^{2+}.

L'objectif de ce travail est d'approfondir des connaissances du fonctionnement des systèmes karstiques dans les Monts de Tlemcen (Nord-Ouest d'Algérie), en s'appuyant essentiellement sur des approches hydrochimiques relatives aux éléments de l'équilibre calco-carbonique.

Afin d'étudier le fonctionnement de ces systèmes karstiques à l'aide des différents éléments du cycle du carbone, il est intéressant d'analyser les variations temporelles de ces éléments pour chaque source et de comparer les systèmes entre eux.

UTILISATION DE LA RELATION INDICE DE SATURATION-PRESSION PARTIELLE DE CO_2

L'étude de la variation temporaire des différents éléments de l'équilibre calco-carbonique a permis d'établir des distinctions en particulier sur leur degré d'évolution et leur fonctionnement (Lastennet, 1994).

Les sources Taga et Hassi El Kelb

Les eaux de ces systèmes perchés (**Fig. 1**) montrent des teneurs relativement élevées en bicarbonates (≈ 250 mg/l) et calcium (≈ 75 mg/).

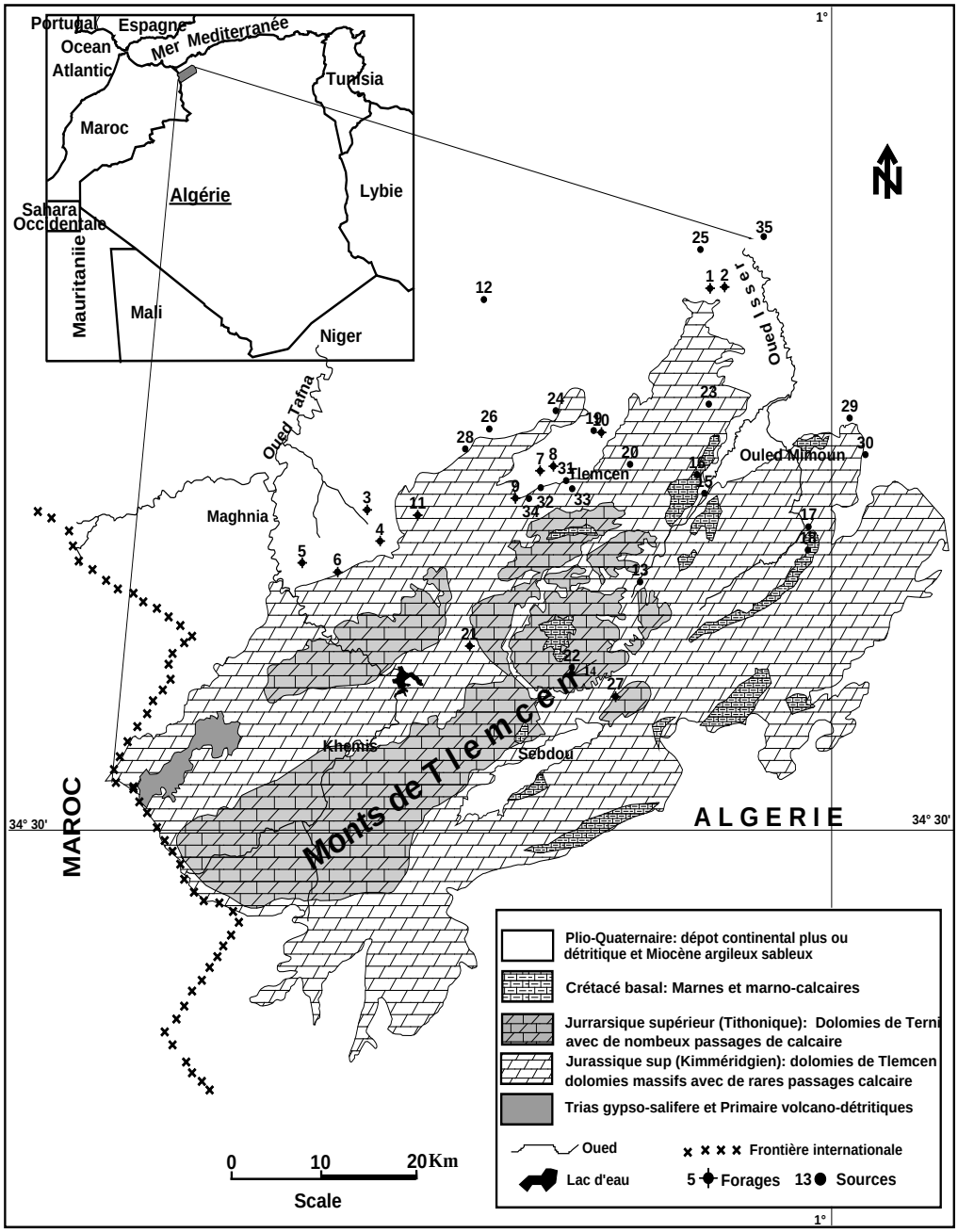

Fig. 1 Carte géologique et localisation de la zone d'étude

Tableau 1 : Caractéristiques des principales sources dans les Monts de Tlemcen

N°	Sources	X (m)	Y (m)	Altitude (m)
1	Taga	654969.17	3840263.45	1090
2	Fouara	654550.85	3859121.49	1006
3	Tellout	686626.31	3866593.34	728
4	El Houtz	653228.98	3866357.52	517
5	Chaffa	662895.46	3889209.94	290
6	El Ourit	658679.05	3858760.15	820
7	Benmimoun	641175.29	3839763.57	730
8	Isser	680710.68	3854578.5	881
9	Karadja	654144.75	3861802.62	720
10	Klebi Hamia	666302.66	3854268.88	870
11	Klebli Barda	666279.21	3854242.54	1000
12	Koubet Djouz	652118.99	3859080.43	1300
13	Medra	639331.2	3837452.94	825
14	Mokdad	651908.69	3859769.49	850
15	Ouallout	685180.69	3865607.73	840
16	Bendou	657353.02	3864343.15	540
17	Hassi Kelb	654999.86	3840165.07	1090
18	Tamechkent	668581.46	3859885.94	765
19	Bouzein	676517.03	3878505.15	420
20	Zidouria	623289.56	3854099.44	315
21	Ghar Boumaza	655914.7	3840368.41	1250

Les eaux sont sursaturées en période de crues, sauf pour quelques points qui se rapprochent de la saturation. Cette eau provient d'horizons superficiels enrichis en CO_2. Ceci a permis à l'eau d'acquérir un potentiel agressif élevé et dissoudre ainsi le calcaire dolomitique à l'origine de fortes teneurs en bicarbonates. Il est à noter que les bassins de ces sources sont parsemés d'indices karstiques. Hydrodynamiquement, les systèmes Taga et Hassi El Kelb réagissent rapidement aux impulsions pluvieuses d'hiver, alors que celles de fin d'été et d'automne sont relativement atténuées. Les constatations de la pression CO_2 (pCO_2), de l'indice de saturation vis-à-vis de la calcite (ISc) et des bicarbonates ont montré une certaine dualité dans le fonctionnement selon les périodes du cycle. L'augmentation synchrone de l'ISc et des HCO_3 avec une pCO_2 moyenne (5.10^{-3} atm), lors des crues de

fin été et début d'automne et pour certaines crues de fin printemps survenant à la suite des étiages de cette dernière saison, devrait correspondre à une chasse d'eau à temps de séjour relativement élevé dans la zone non saturée avec une minéralisation forte essentiellement bicarbonatée calcique. En période de hautes eaux, les crues d'hiver et de printemps engendrent une faible diminution de la charge ionique avec une augmentation de la pCO_2, un léger appauvrissement en HCO_3 et a tendance à la saturation. Il s'agit d'un effet de dilution avec un mélange entre l'eau du réservoir superficiel et l'eau nouvellement infiltrée. Ces observations suggèrent des aquifères fissurés en milieu carbonaté. Cependant, les variations des débits de ces systèmes ne sont pas issues d'un écoulement en milieu fissuré. Celles-ci sont caractérisées relativement par de fortes variations comprises entre 8 et 105 l/s pour Taga et entre 15 et 105 l/s pour Hassi El Kelb. La différence entre le comportement hydrodynamique et hydrochimique à l'exutoire des systèmes pourrait être engendrée par un phénomène de "double porosité" (Emblanch, 1997). Ainsi, le débit serait contrôlé par des fractures ouvertes affectant plutôt les zones calcaires alors que la fissuration fine et la porosité d'interstice des dolomies contrôlerait la minéralisation (Fig. 2).

La source de Fouara

Cette source, située sur le versant Nord des Monts de Tlemcen à 1000 m d'altitude montre de faibles variations des débits observés par rapport aux précédents (15 à 42 l/s). Les eaux sont généralement sursaturées. Les quelques points qui se rapprochent de la sous-saturation sont des prélèvements effectués en hautes eaux (crues d'hiver). Les teneurs moyennes relativement élevées et quasiment stables en bicarbonates (255 mg/l) indiquent la prédominance d'une alimentation par un réservoir superficiel fortement influencé par la pCO_2 du sol. La variation relativement faible des débits et de la minéralisation carbonatée suggère un système à caractère inertiel. En période non influencée, la pCO_2 montre des valeurs moyennes comparables à celles des sources précédentes, ce qui indique la relative similarité des conditions pédologiques des aires d'alimentation.

L'augmentation synchrone de la pCO_2 et de la minéralisation en période de reprise (premières crues d'automne et de fin printemps) traduit un effet de chasse des eaux d'un réservoir superficiel riche en CO_2. Cet accroissement des teneurs s'accompagne d'une légère augmentation de l'ISc pour les reprises de certains cycles (mai 2000, avril 2002 et octobre 2006) alors qu'au contraire on constate une diminution de l'ISc pour d'autres cycles (novembre 2001). Suivant les conditions d'écoulement, donc le

temps de séjour de cette eau dans le réservoir superficiel, on observera soit des eaux sursaturées, soit relativement sous-saturées. Dans les deux cas,

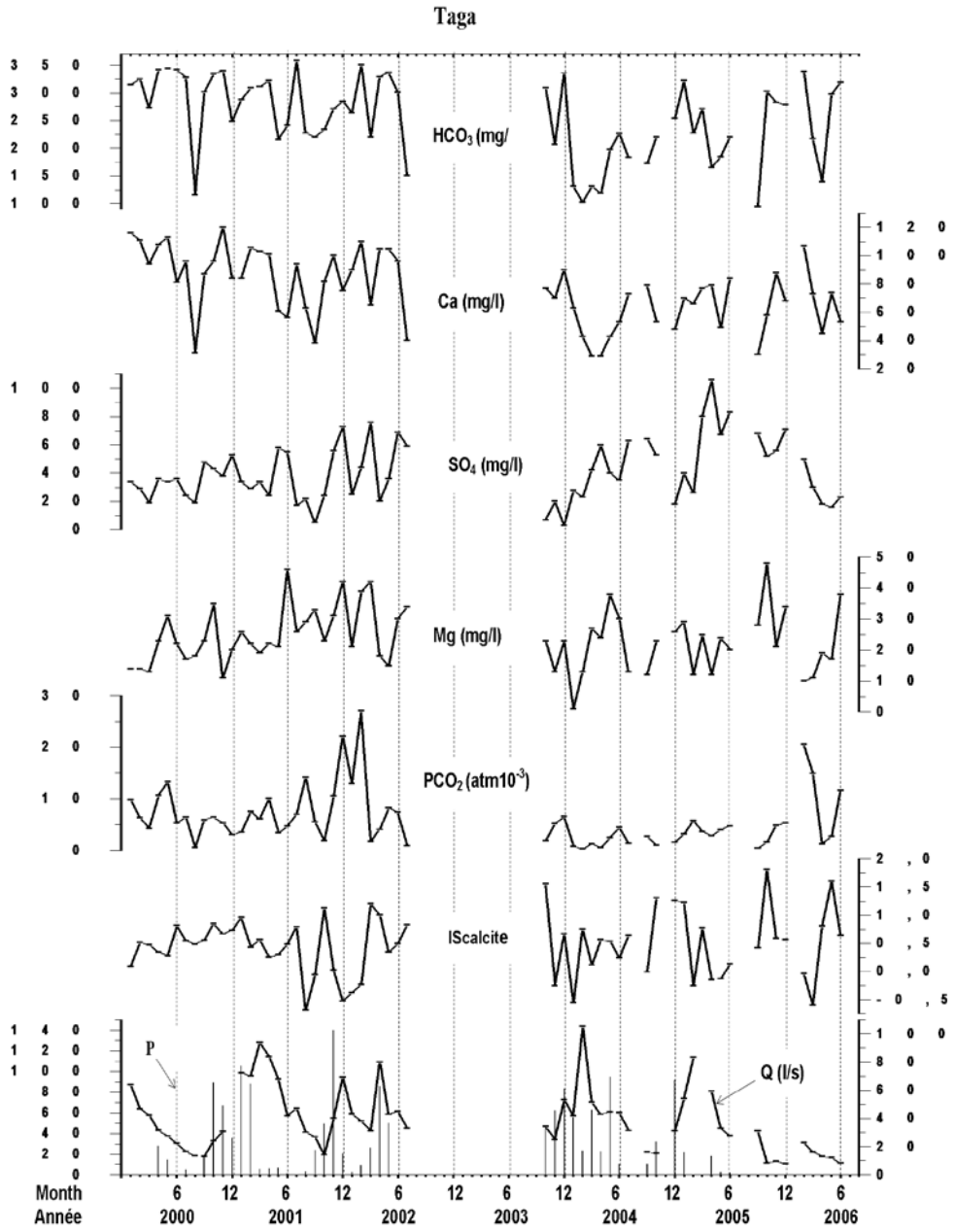

Fig. 2 Evolutions comparées des éléments: Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-} des variables des équilibres calco-carboniques à Taga

il n'y a pas participation immédiate d'une eau nouvelle, ce qui suggère une faible perméabilité de la zone d'infiltration. Cependant, les crues, en périodes de hautes eaux engendrent une baisse de la minéralisation qui s'accompagne d'une instabilité de l'ISc, orientée à la baisse avec une légère augmentation de la pCO_2. Ceci traduit une diminution de la charge ionique par effet de dilution. Il s'agit ainsi, d'un mélange entre l'eau du réservoir superficiel et l'eau nouvellement infiltrée.

Isser et Tellout

Les systèmes d'Isser et de Tellout se différencient du précèdent par leur taille, mais surtout par la présence d'une zone non saturée importante. Les débits varient de 15 à 50 l/s pour Isser et de 6 à 30 l/s pour Tellout. La minéralisation des eaux de Tellout est supérieure à celle d'Isser, mais reste proche en raison des conditions naturelles similaires régnant sur ces bassins. Cependant, les teneurs relativement élevées en calcium pour les eaux de la source Isser (91,5 mg/l) par rapport à celle de Tellout (67 mg/l) peuvent s'expliquer par la nature lithologique de cet aquifère relativement riche en calcaire. Le comportement hydrochimique de ces deux systèmes est semblable. Une légère hausse de la pCO_2 est observée au moment des crues de reprise d'automne, les eaux étant sursaturées à saturées avec une forte minéralisation. Ceci indique de la même façon l'existence d'une zone non saturée relativement riche en CO_2 dont l'eau serait chassée en période de reprise des pluies d'automne.

La crue exceptionnelle de novembre 2001 a chassé des eaux fortement minéralisées avec des teneurs en bicarbonate qui passent à 500 mg/l pour Tellout et 400 mg/l pour Isser et respectivement des pCO_2 de 6,5 à $6{,}7.10^{-3}$ atm. Ces eaux sont généralement à l'équilibre ($ISc \approx 0$). Les prélèvements effectués en période de hautes eaux d'hiver montrent des eaux à teneurs élevées en bicarbonate, sursaturées et à faible pCO_2. La relativement faible pCO_2 observée pour des valeurs importantes en HCO_3 suppose que les eaux infiltrées en automne, initialement riches en CO_2 atteignent les exutoires en hiver. En effet, le CO_2 initial, relativement élevé, a été consommé au cours du trajet de l'eau qui a dissous une quantité importante de carbonate, indiquant un temps de transit suffisamment long.

Les crues de printemps montrent généralement des eaux à faible pCO_2 avec tendance à la sursaturation. La faible pCO_2 peut s'expliquer par l'arrivée à l'exutoire d'eau infiltrée durant l'hiver (la pCO_2 du sol étant alors à son minimum). Comme l'eau est sursaturée, il y a certainement eu un phénomène de dégazage (Fig. 3).

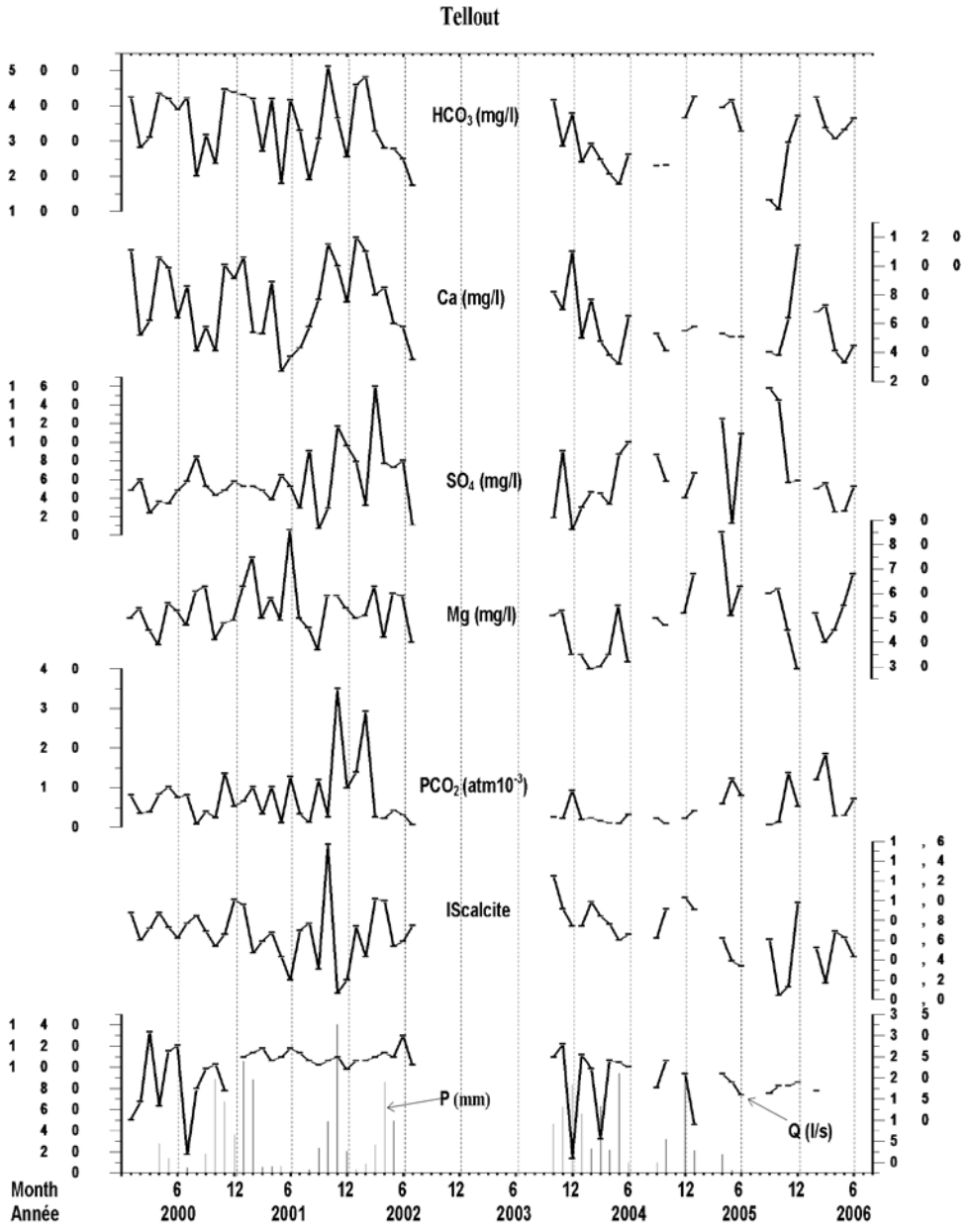

Fig. 3 Evolutions comparées des éléments: Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-} des variables des équilibres calco-carboniques à Tellout

ETUDE DES DISTRIBUTIONS DE FREQUENCE DES CONDUCTIVITES POUR LA CLASSIFICATION DES AQUIFERES CARBONATEES

Bakalowicz (1979), propose une classification des systèmes en milieu carbonaté en utilisant les distributions de fréquence de la conductivité. L'allure de ces courbes renseigne sur les capacités du système à faire transiter les différents types d'eau jusqu'à l'exutoire.

Les systèmes karstiques des Monts de Tlemcen montrent d'une façon générale des courbes plurimodales avec, cependant des plages de variation et des amplitudes plus ou moins importantes selon le système (**Fig. 3**). Chacune de ces sources se caractérise par un mode bien défini correspondant aux eaux de la réserve ou à long temps de transit et par une dissymétrie causée par la participation à l'écoulement de différents types d'eau (Azzaz et al, 2008 ; Azzaz, 2008).

Taga et Hassi El Kelb

Les systèmes de Taga et de Hassi El Kelb montrent un mode bien marqué respectivement à 575 et 525 μScm^{-1} et une dissymétrie avec un étalement vers les faibles valeurs de conductivités. Ce phénomène correspond à l'arrivée d'eau nouvelle à l'exutoire en période de crue, créant un effet de dilution. Cependant, le mode secondaire qui apparaît pour Taga à 675 μScm^{-1} et avec un léger palier et à 625 μScm^{-1} pour Hassi El Kelb, s'explique par l'arrivée d'eau à minéralisation relativement élevée par un effet piston dans la zone non saturée. La présence d'un mode principal et des eaux toujours à l'équilibre traduisent un effet tampon dans le système. Ce constat permet de conclure à un système hydrochimiquement inertiel. Cependant, l'étude précédente a montré que la forte variabilité des débits correspondrait à une forte discontinuité hydraulique. Ces observations corroborent l'hypothèse de double porosité révélée précédemment.

Fouara

Le système karstique Fouara montre un mode principal axé sur la valeur 475 μScm^{-1} et un second à 600 μScm^{-1} avec une faible plage de variation (425 – 725 μScm^{-1}). Le mode principal correspond au drainage des eaux ayant subi un temps de transit relativement important dans la réserve superficielle en période non influencée.

Le mode secondaire vers 600 μScm^{-1} correspondrait aux eaux qui surviennent au moment des crues de reprise par effet de chasse dans le système. Ces variations relativement faibles dans la distribution des conductivités de l'émergence de Fouara soulignent l'importance du caractère inertiel de ce système.

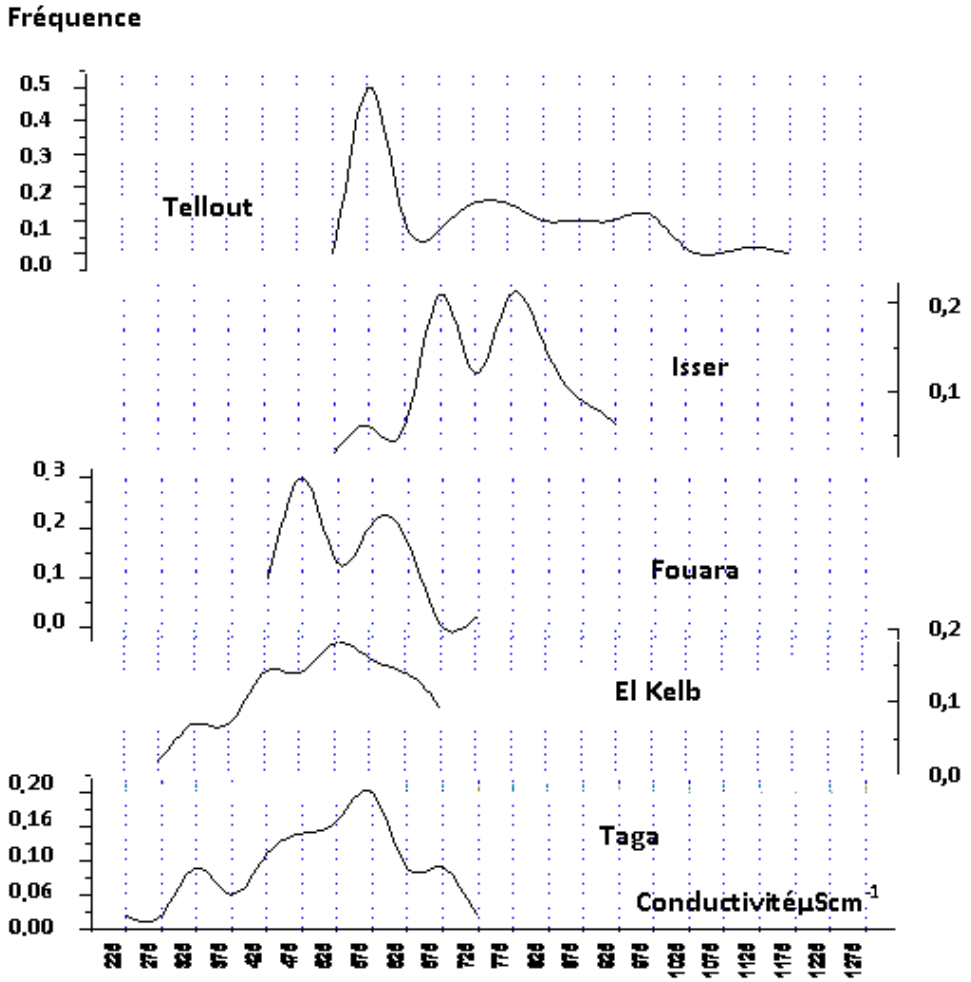

Fig. 4 Distribution des fréquences des sources des Monts de Tlemcen

Isser et Tellout

Le système karstique d'Isser montre deux principaux modes nettement marqués par leur amplitude de variation, axés respectivement sur les conductivités : 675 et 775 µScm^{-1}. Le mode 675 µScm^{-1} correspond aux eaux de la réserve superficielle drainée en périodes non influencée. Le mode 775 µScm^{-1} représente les eaux chassées au moment des fortes crues de reprise. En effet, ces eaux ont eu un temps de séjour plus important au sein de la zone non saturée durant les longues périodes d'étiage. Ce dernier mode confirme l'importance du fonctionnement par effet piston de ce système. Cependant, le mode légèrement marqué vers les faibles valeurs de conductivité (550 µScm^{-1}) pourrait correspondre aux eaux drainées au moment des crues de hautes eaux d'hiver faiblement chargées par effet de

dilution. Les courbes de distribution de conductivité des différents cycles hydroclimatiquement différents montrent des allures relativement contractées en gardant les deux principaux modes. Ceci indique l'aspect karstique du système moyennement inertiel.

Le système de Tellout, relativement plus minéralisé avec une plage de variation plus importante, montre un mode bien marqué à 525 μScm^{-1} avec une forte amplitude (fréquence de 0,5) et un étalement de la distribution vers les fortes valeurs de conductivité. Comme il est constaté dans l'étude des équilibres calcocarbonique, celles-ci surviennent au moment des crues par effet de chasse dans le système. Le mode principal représente 50 % des prélèvements correspondant au drainage de l'eau du réservoir en dehors des influences des crues de reprise. La mauvaise reproductibilité des courbes de fréquence pour les différents cycles confirme le caractère karstique de ce système. Ces constatations, à savoir : la prédominance du mode principal et la relativement mauvaise reproductibilité des courbes de fréquence, suggèrent un système inertiel faiblement karstique.

LE CARBONE ORGANIQUE TOTAL (COT), TRACEUR DE L'INFILTRATION EN MILIEU KARSTIQUE

Le carbone organique total (COT) étant un marqueur intéressant de l'infiltration de l'eau au sein des aquifères karstiques, l'étude de ses variations constitue une approche pertinente de leur fonctionnement. Les systèmes ayant un faible degré d'organisation (dont le comportement rappelle celui de milieu fissurés) et ceux où l'infiltration rapide est quasi absente se caractérisent par des teneurs en COT faibles et des variations peu marquées au cours du cycle hydrologique (Thurman, 1985 ; Batiot, 2002 ; Garry, 2007).

Les systèmes alimentés par des eaux de surface (Taga et El Hout) sont caractérisés par des teneurs moyennes en COT relativement élevées (respectivement : 5,0 et 5,7 mg/l) et des fluctuations importantes au cours du temps (respectivement, les coefficients de variation : 1,12 et 1,18).

Les systèmes Fouara et Tellout caractérisés par une zone non saturée relativement développée et une zone noyée plus importante sont marqués par des teneurs moyennes en COT plus faibles que les précédents (respectivement : 4,3 et 4,0 mg/l). Les variations sont plus atténuées (Cv compris entre 0,72 et 0,92).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bakalowicz M. (1979) *Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de sa karstification*, Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Paris VI, 269 p.

Batiot C. (2002) *Etude expérimentale du cycle du carbone en region karstiques. Apport du carbone organique et du carbone minéral à la connaissance hydrogéologique des systèmes.* Site expérimental de Vaucluse, Jura, Larzac, Région nord-Montpelliéraine, Nerja (Espagne), Thèse, Univ Avignon, 247 pp.

Emblanch C. (1997) *Les équilibres chimiques et isotopiques du carbone dans les aquifères karstiques : étude en région méditerranéenne de montagne.* Thèse Doct. Univ. Avignon, 198 p.

Azzaz H., Cherchali M., Meddi M., Houha B., Puig J.M. & Achachi A. (2008) *The use of environmental isotopic and hydrochemical tracers to characterize the functioning of karst systems in the Tlemcen Mountains, northwest Algeria.* Hydrogeology Journal (2008) 16: 531–546.

Azzaz H. (2008) Caracterisation du fonctionnement de systems karstiques des Monts de Tlemcen par les methods hydrochimiques et isotopiques application à la vulnérabilité. Thèse Doct. USTOran. ????

Lastennet R. (1994) *Rôle de la zone non saturée dans le fonctionnement des aquifères karstiques –Approche par l'étude physico-chimique et isotopique du signal d'entrée et des exutoires du massif du Ventoux (Vaucluse)*. Thèse Doct. Univ. Avignon, 116-117 p.

Garry B. (2007) *Etude des processus d'écoulements de la zone non saturée pour la modélisation des aquifères karstiques (Expérimentatio hydrodynamique et hydrochimique sur les sites du Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB) de Rustrel et de Fontaine de Vaucluse*). Thèse, Univ Avignon. 57-101 p.

Thurman E. (1985). *Organic chemistry of natural waters*. Nijhoff, Junk, Dordrecht, 497 p.

&&&