

Exportation des carbonates et dissolution spécifique dans le système karstique de Boumaza (Monts de Tlemcen - NO algérien)

Fouzia Bensaoula

Citer ce document / Cite this document :

Bensaoula Fouzia. Exportation des carbonates et dissolution spécifique dans le système karstique de Boumaza (Monts de Tlemcen - NO algérien). In: Karstologia : revue de karstologie et de spéléologie physique, n°52, 2e semestre 2008. Les escargots souterrains, marqueurs des hydrosystèmes karstiques. pp. 31-38;

doi : <https://doi.org/10.3406/karst.2008.2635>

https://www.persee.fr/doc/karst_0751-7688_2008_num_52_1_2635

Fichier pdf généré le 15/03/2019

Résumé

Le calcul de la dissolution spécifique permet de quantifier l'érosion dans un système karstique. De nombreux auteurs ont cherché à établir différentes formules permettant de calculer la tranche théorique de calcaire dissous. A partir de formules classiques et de l'intégration du débit et de la charge dissoute, nous avons calculé la masse des carbonates dissous qui atteint 48 t/km²/an et estimé la dissolution spécifique qui est de 18 mm/1 000 ans pour le système karstique de Ghar Boumaza dans les monts de Tlemcen. Ce dernier est drainé par l'une des plus longues rivières souterraines d'Afrique, la Tafna souterraine. Il est situé dans une structure en synclinal dans les formations carbonatées du Tithonien. Le calcul de la dissolution spécifique aussi bien annuel que mensuel, dans ce système karstique, effectué pour deux années hydrologiques très contrastées, a permis de montrer que les conditions dans lesquelles s'est formé le réseau souterrain ont été probablement différentes. En effet, même si les données restent très fragmentaires, il apparaît que le régime pluviométrique actuel et par conséquent le débit des sources semble très faible par rapport à ce qu'il a été pendant les phases climatiques anciennes.

Abstract

Carbonates Transport and specific dissolution rates in the karstic system of Boumaza (Tlemcen Mountains - Nw Algeria)

The calculation of specific dissolution rates makes it possible to quantify the erosion in a karstic system. Many authors tried to establish various formulae that allow to calculate the theoretically dissolved limestone. By using the classical formulae and the integration of discharge and dissolved matter, we calculated the mass of dissolved carbonates (48 t/km²/year) and estimated the specific dissolution rate to be 18 mm/ka for the karstic system of Ghar Boumaza in the Tlemcen Mountains. This system is drained by one of the longest underground rivers of Africa, the underground Tafna River. It is located in a syncline structure of carbonate formations of Tithonian age. The calculation of the annual as well as the monthly specific dissolution rate in this karstic system, for two years with contrasting precipitation, has shown that the conditions that allowed the formation of the underground network were probably different. Indeed, even with the fragmentary data that are available, it seems that the present precipitation and consequently the spring outflow is very small compared to what it was during the past climatic phases (Lower Quaternary and Pliocene).

Fouzia BENSAOULA

Département d'Hydraulique,
Faculté des Sciences de l'Ingénieur,
Université Abou Bekr Belkaid,
BP 230, Tlemcen, Algérie.
et
Laboratoire n° 25, Promotion
de Ressources Hydriques,
Minières et Pédologiques,
Législation de l'Environnement
et Choix Technologiques
(Université de Tlemcen).
Fbensaoula@gmail.com

Exportation des carbonates et dissolution spécifique dans le système karstique de Boumaza (Monts de Tlemcen-NO algérien)

RÉSUMÉ: Le calcul de la dissolution spécifique permet de quantifier l'érosion dans un système karstique. De nombreux auteurs ont cherché à établir différentes formules permettant de calculer la tranche théorique de calcaire dissous. A partir de formules classiques et de l'intégration du débit et de la charge dissoute, nous avons calculé la masse des carbonates dissous qui atteint 48 t/km²/an et estimé la dissolution spécifique qui est de 18 mm/1000 ans pour le système karstique de Ghar Boumaza dans les monts de Tlemcen. Ce dernier est drainé par l'une des plus longues rivières souterraines d'Afrique, la Tafna souterraine. Il est situé dans une structure en synclinal dans les formations carbonatées du Tithonien. Le calcul de la dissolution spécifique aussi bien annuel que mensuel, dans ce système karstique, effectué pour deux années hydrologiques très contrastées, a permis de montrer que les conditions dans lesquelles s'est formé le réseau souterrain ont été probablement différentes. En effet, même si les données restent très fragmentaires, il apparaît que le régime pluviométrique actuel et par conséquent le débit des sources semble très faible par rapport à ce qu'il a été pendant les phases climatiques anciennes.

MOTS CLEFS: système karstique, dissolution spécifique, hydrochimie, hydrologie, Monts de Tlemcen.

ABSTRACT: CARBONATES TRANSPORT AND SPECIFIC DISSOLUTION RATES IN THE KARSTIC SYSTEM OF BOUMAZA (TLEMEN MOUNTAINS – NW ALGERIA). The calculation of specific dissolution rates makes it possible to quantify the erosion in a karstic system. Many authors tried to establish various formulae that allow to calculate the theoretically dissolved limestone. By using the classical formulae and the integration of discharge and dissolved matter, we calculated the mass of dissolved carbonates (48 t/km²/year) and estimated the specific dissolution rate to be 18 mm/ka for the karstic system of Ghar Boumaza in the Tlemcen Mountains. This system is drained by one of the longest underground rivers of Africa, the underground Tafna River. It is located in a syncline structure of carbonate formations of Tithonian age. The calculation of the annual as well as the monthly specific dissolution rate in this karstic system, for two years with contrasting precipitation, has shown that the conditions that allowed the formation of the underground network were probably different. Indeed, even with the fragmentary data that are available, it seems that the present precipitation and consequently the spring outflow is very small compared to what it was during the past climatic phases (Lower Quaternary and Pliocene).

KEY WORDS: karstic system, specific dissolution rate, hydrochemistry, hydrology, Tlemcen Mountains.

الانتقال و الذوبان الخاص في النظام
الكارستي لغار بومعزة
(سلسلة جبال تلمسان – الشمال الغربي
الجزائري)
ملخص

إن حساب الذوبان الخاص يساعد على تقدير كمية التآكل في نظام كارستي. حاول عدد من الباحثين إعطاء عبارات مختلفة تسهل حساب الكس المذاب. انطلاقا من عبارات كلاسيكية و إدماج الصبيب والحمولة المذابة، قمنا بحساب كتلة الفحمات المذابة التي تقارب 48 طن / كلم² / 1000 سنة للنظام الكارستي لغار بومعزة بسلسلة جبال تلمسان. ينضم هذا الأخير إلى أطول الوديان الجوفية في إفريقيا " تافنة الجوفية " المتواجد في بنية مقعرة مكونة من صخور كلسية/التيتونية. فحساب نسبة الذوبان الخاص، الشهري و السنوي، في هذا النظام الكارستي المنجز خلال سنتين هيدرولوجيتين جد متباينتين أظهر احتمال اختلاف الظروف السانحة لتكوين تلك الشبكة الجوفية. بالرغم من أن المعطيات لا تزال جد جزئية، يبدو أن معدل تساقط الأمطار الحالي و تأثيره على صبيب الينابيع، جد ضئيل بالنسبة إلى ما كان عليه خلال الأطوار المناخية القديمة.

الكلمات الأساسية:

- النظام الكارستي - الذوبان الخاص -
هيدروكيمياء - هيدرولوجية - سلسلة جبال
تلمسان

Introduction

Le calcul de la dissolution spécifique permet de quantifier l'érosion. C'est un thème récurrent de la littérature karstologique depuis Corbel [1957]. De nombreux auteurs ont cherché à établir

diverses formules permettant de calculer la tranche théorique de calcaire dissous à partir de diverses données, en particulier les précipitations, les volumes écoulés et la charge dissoute moyenne [White, 1984; Jaillat, 2000 et 2001].

Le calcul réel de la dissolution spécifique est une intégration du débit et de la charge dissoute à chaque instant [Drake et Ford, 1973; Ford et Williams, 1989]. Nous avons calculé la masse des carbonates dissous et estimé la

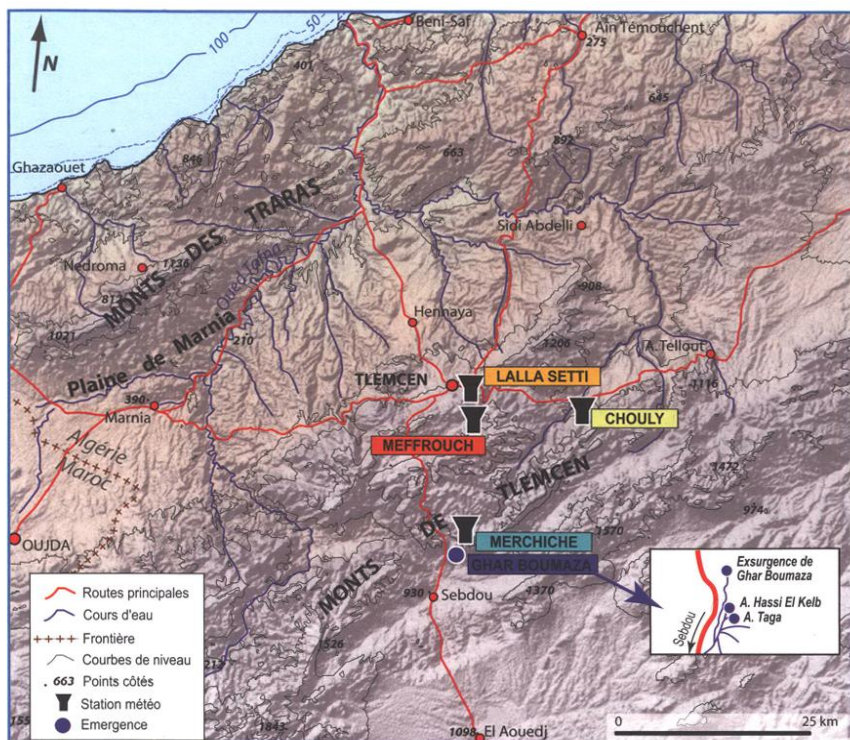


Figure 1: Situation géographique du secteur étudié (extrait de la carte topographique Tlemcen au 1/500 000). *Geographic localization of the studied area (excerpted of the topographic map of Tlemcen, 1:500'000).*

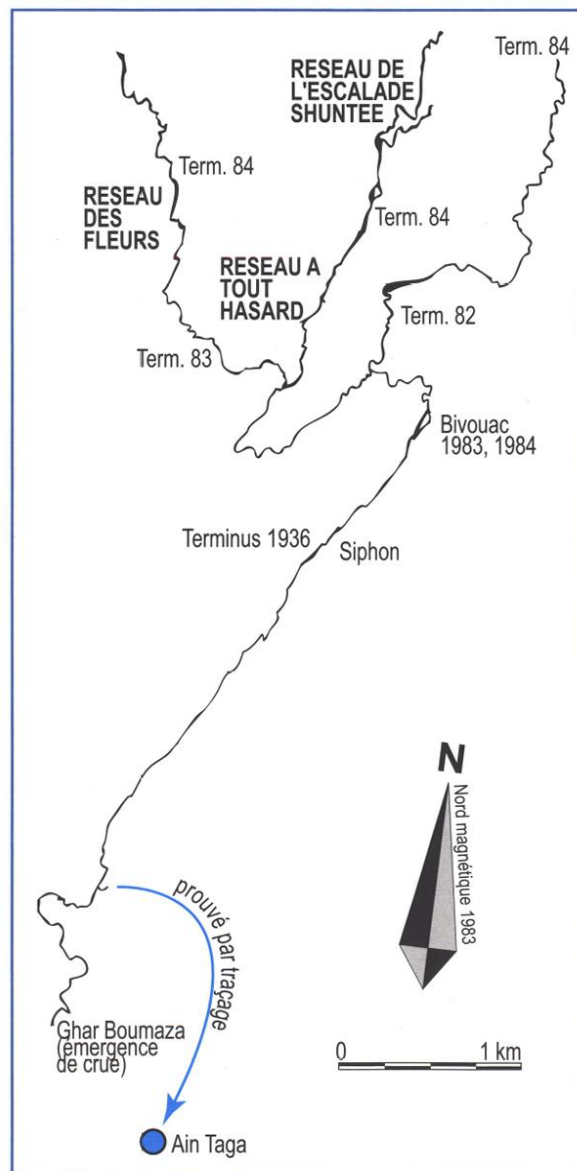


Figure 2: Le réseau de la Tafna souterrain (18 km) est un des plus grands réseaux souterrains d'Afrique. Il est drainé par Ain Taga et l'émergence temporaire de Ghar Boumaza. *Topographie Collignon, 1991. The underground Tafna River (18 km) is one of the longest underground rivers of Africa. This system is drained by Ain Taga and temporary by Ghar Boumaza.*

dissolution spécifique pour le système karstique de Ghar Boumaza dans les monts de Tlemcen (figure 1). Ce dernier est drainé par l'une des plus longues rivières souterraines d'Afrique (18 400 m), la Tafna souterraine (figure 2, photos 1 et 2).

Des mesures de débits et des analyses physico-chimiques des eaux drainant ce système, effectuées mensuellement par les services de l'Agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH), sont interprétées.

I. Contexte climatologique du site étudié

A. La climatologie au Quaternaire

Par l'utilisation de certains indicateurs notamment la présence de paléosols, de croûtes calcaires et de dépôts de sources et lacustres, Remaoun [1996], dans ses travaux de thèse, a pu mettre en évidence directement ou indirectement les caractères de l'environnement du bassin versant de la Tafna. Les paléosols par leur présence sont indicateurs d'une amélioration climatique surtout dans le sens d'une augmentation de la pluviométrie. De même les paléolittératures dans les tufs et travertins de Lalla Setti (à environ 20 km au nord de Ghar Boumaza) sont des marqueurs des phases bioclimatiques les moins arrosées sur les plus hauts reliefs du bassin versant de la Tafna [Remaoun, 1996]. Les dépôts de sources se sont formés pendant les phases d'amélioration climatique, à pluviométrie assez élevée succédant à des périodes plus arrosées pendant lesquelles se sont déposés des matériaux détritiques puis des altérites. En effet à travers les Monts de Tlemcen, on a pu inventorier plus d'une trentaine d'affleurements de travertins, d'une étendue parfois considérable (El Ourit, Lalla Setti, Ain Ouchba, Ain Fezza, Ain Taga, Beni Bahdel...). Ils sont facilement repérables car ils sont rarement couverts de végétation et engendrent des ruptures de pentes (photo 4). Ils soulignent l'emplacement de sources actuelles ou disparues liées aux massifs jurassiques [Bensaoula, 2006].

Les travaux tant sur la géomorphologie que sur la palynologie dans le bassin méditerranéen [Camps, 1974; Remaoun, 1996], dans le Maghreb ou en Algérie [Rognon, 1980; Barathon, 1989] permettent de mettre en évidence trois grandes phases bioclimatiques:

- la phase quaternaire récente antérieure à 40 000 ans BP où la pluviométrie a augmenté d'une manière générale;
- la période fini-quaternaire (40 000 à 10 000 BP) où l'aridification a été progressive;

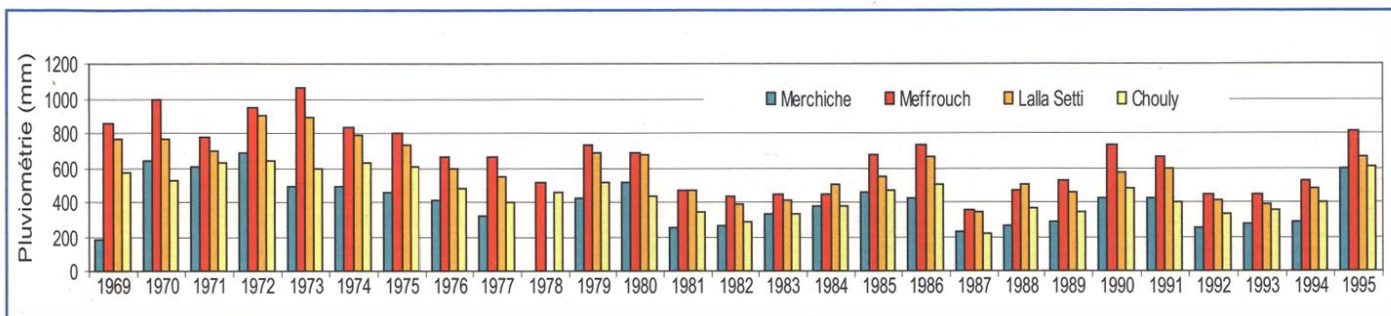


Figure 3: Variabilité interannuelle de la pluviométrie sur le bassin de Ghar Boumaza (1969-1995, données ANRH).
Interannual variation of precipitation in the Ghar Boumaza basin (1969-1995).

- la période holocène, d'abord un peu humide avec ensuite une dégradation générale des conditions pluviométriques c'est-à-dire une aridification.

Le système karstique a probablement commencé à fonctionner dès le Pliocène inférieur (-5,3 à -3,4 millions d'années), le climat étant plus humide [Remaoun, 1996].

B. Climatologie actuelle

Trois stations pluviométriques (la station du Meffrouch, la station de Lalla Setti et la station de Chouly, respectivement MEF, SET et CHO sur la figure 1) existent au nord du secteur d'étude, une seulement (station du Merchiche, MER) dans la partie aval du bassin. Dans la figure 3, il apparaît clairement que la station du Meffrouch est la plus arrosée. Elle représente la partie amont et la plus élevée du bassin de Ghar Boumaza. Pour les quatre stations, les mois les plus arrosés sont décembre, janvier, février et mars qui reçoivent environ 50 % de la pluviométrie annuelle. Les mois de juillet et août sont les plus secs.

Les précipitations, dans cette région, sont caractérisées par une variabilité interannuelle assez notable (figure 3). A titre d'exemple, pour la période étudiée (1965-1995), la pluviométrie annuelle varie entre un minimum de 177 mm et un maximum de 682 mm (au niveau de la station de Merchiche), 281 mm et 1 062 mm (station du Meffrouch), 269 mm et 974 mm (station de Lalla Setti).

L'étude de la pluviométrie annuelle et mensuelle effectuée sur quelques stations voisines de celles utilisées dans ce travail, a montré une forte variabilité aussi bien annuelle que mensuelle, qui se traduit par des coefficients de variation élevés [Bouanani, 2004].

Le climat est de type méditerranéen à hiver froid et tempéré et été chaud et sec.

II. Contexte géographique géologique et hydrogéologique

L'entrée du réseau souterrain de Ghar Boumaza (ou Tafna souterraine) se trouve à une trentaine de kilomètres, au sud de la ville de Tlemcen dans les Monts de Tlemcen.

Ce réseau a été exploré par plusieurs équipes spéléologiques, depuis 1930. Le premier levé topographique complet jusqu'au premier siphon (sur une longueur de 3 887 m) a été dressé en 1948 par J. Birebent. En décembre 1982, B. Collignon et d'autres franchissent le siphon et 2 km de plus sont explorés. En 1983, la même équipe topographie encore 2 500 m [Collignon, 1987]. En 1984, une autre expédition permet d'explorer d'autres parties du réseau (figure 2). Le réseau souterrain de la



Photo 1 : Réseau de la Tafna souterraine, grand lac à 1 kilomètre de l'entrée de la source de Ghar Boumaza. Cliché Bernard Collignon. *Underground lake in Tafna river, 1 km above the spring of Ghar Boumaza.*



Photo 2 : Progression à la palme dans la rivière souterraine de la Tafna. Cliché Bernard Collignon. *Swimming exploration of the underground Tafna River.*



Photo 3 : La Tafna souterraine (18 km de développement) sourd en crue par la résurgence temporaire de Ghar Boumaza. The underground Tafna River (18 km length) when high waters well up by Ghar Boumaza.

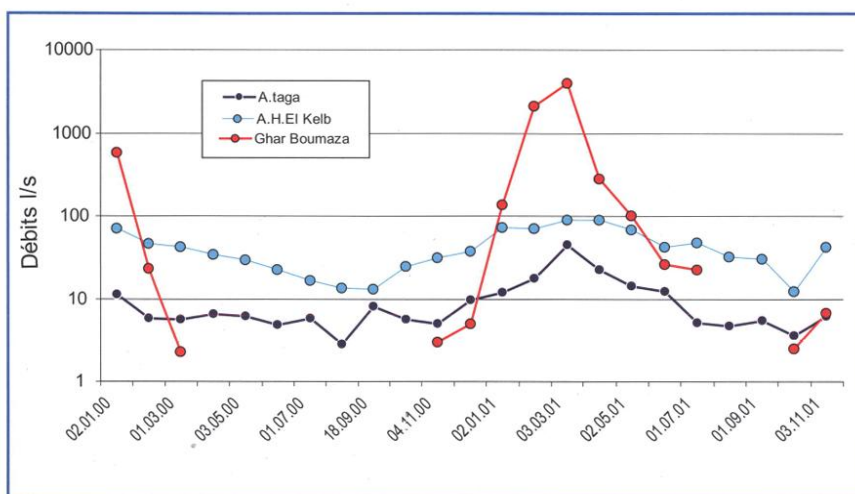


Figure 4 : Variabilité des débits des sources du système karstique de Ghar Boumaza : l'échelle logarithmique est choisie pour pouvoir visualiser les grandes amplitudes de débits de Ghar Boumaza par rapport aux deux autres sources. Variability of the springs of the karst system of Ghar Boumaza. The logarithmic scale has been chosen to visualize the large differences in discharge of Ghar Boumaza compared to the other springs.

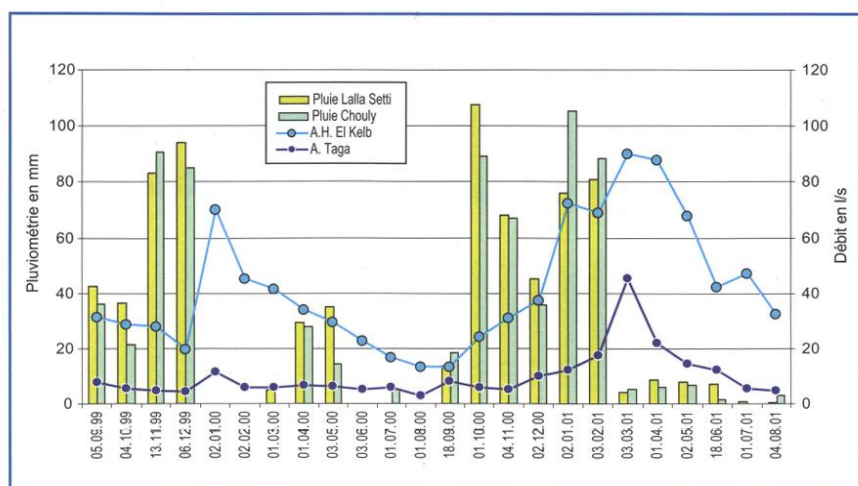


Figure 5 : Evolution du débit des sources de la Tafna avec la pluviométrie (1999-2001). Evolution of the discharge of Tafna spring compared to precipitation (1999-2001).

Tafna se constitue finalement d'une galerie principale assez rectiligne qui se termine par un siphon ; au-delà, trois autres galeries s'étendent vers le nord. La longueur finalement topographiée est de 18400 m avec 50 m de dénivelé. C'est un des plus longs réseaux spéléologiques en Afrique [Collignon, 1991].

Le système karstique s'est développé à travers des formations calcaires-dolomitiques, dans une structure en synclinal, présentant la particularité d'être limitée entièrement par des terrains imperméables. Il est donc perché avec comme exutoire principal les sources de Ain Taga et Ain Hassi El Kelb qui sont distantes de 500 m environ à l'aval d'une exurgence de trop-plein, Ghar Boumaza, par laquelle cette rivière est accessible. Les galeries sont creusées dans le membre calcaire-dolomitique supérieur ou dolomie de Terni du Tithonien et les marno calcaires de Ilariga (avec très peu de marnes) difficiles à séparer à cause de la dolomitisation [Benest, 1985].

A. Fonctionnement hydrologique des sources de la Tafna

Des mesures de débit et des prélèvements d'échantillons d'eau sont effectués mensuellement par les services de l'ANRH. Des débits sont enregistrés à la sortie du réseau souterrain de Ghar Boumaza où l'écoulement se fait à l'occasion de grosses pluies (photo 3). Les variations de débit sont parfois spectaculaires : 90 l/s à 12,3 l/s à Ain Hassi El Kelb, 4000 l/s à 0 l/s à Ghar Boumaza, 45 l/s à 2,8 l/s à AinTaga (figure 4). Les crues sont rapides et violentes. La mise en charge se fait quelques heures après les précipitations [Collignon, 1987].

Le système connaît des amplitudes de débits très importantes bien corrélées aux précipitations. Il faut noter que les mesures, étant mensuelles ne permettent pas de voir l'évolution des débits avec précision (figure 5).

B. Fonctionnement hydrochimique actuel des sources

Les paramètres mesurés sont ceux d'une analyse physico-chimique classique c'est-à-dire Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- , NO_3^- , conductivité et résidu sec. Les eaux de ces trois sources sont représentées sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff (figure 6).

Ce sont des eaux bicarbonatées calciques caractérisées par une minéralisation relativement faible (300 mg/l). Les données de conductivité sont corrélées avec la dureté totale, la relation obtenue est relativement significative dans la mesure où ce sont des données mensuelles qui ne permettent pas

de voir des variations rapides du débit et du chimisme des eaux (figure 7) [Bensaoula, 2006].

Ce sont des eaux identiques qui drainent effectivement le même système aquifère. Ain Taga présente une minéralisation légèrement plus forte (322 mg/l) par rapport aux deux autres (Boumaza: 291 mg/l, Ain Hassi El Kelb: 296 mg/l). En effet elle présente un débit plus faible et relativement plus stable. Ses eaux circulent probablement plus profondément et le temps de séjour serait plus long.

III. Le calcul de la dissolution spécifique dans le système karstique de Boumaza

Dans le réseau de Ghar Boumaza, un suivi réalisé par les services de l'ANRH a permis de collecter des mesures de débit et des résultats d'analyses physico-chimiques à pas de temps mensuels.

A. Calcul des carbonates exportés au niveau de Ain Taga

Nous avons effectué ce calcul pour les années hydrologiques 1999-2000 et 2000-2001. L'année 1999-2000 étant une année sèche, l'année 2000-2001 étant relativement

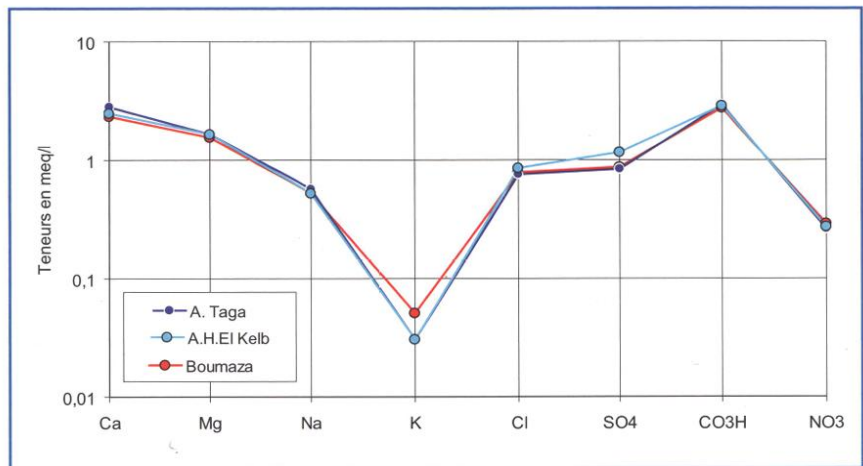


Figure 6: Représentation sur diagramme de Schoeller-Berkaloff, des ions majeurs des eaux de sources de la Tafna (teneurs moyennes pour la période décembre 2003-octobre 2004).
Representation on Schoeller-Berkaloff diagram of major ions of the Tafna spring water (averaged content for the period december 2003 to october 2004).

humide. Nous avons tout d'abord calculé la masse réelle exportée dans l'année ensuite la dissolution spécifique par quelques formules classiques basées essentiellement sur :

- les données pluviométriques et la dureté totale de l'eau (formule de Corbel 1957, tableau 1) ;

Tableau 1 : Calcul de la dissolution spécifique au niveau d'Ain Taga.
Calculation of the specific dissolution rates of Ain Taga.

		Formule	Année 99/00	Année 00/01
a	Précipitation annuelle (mm/an)	-	325.7 mm 239.1 mm	419.3 mm 556.9 mm
b	Evapotranspiration calculée (formule de Turc)(mm/an)	$b=P/\sqrt{(P^2/(300+25T+0.05T^3)^2)+0.9}$	321.8 mm 239.2 mm	386.7 mm 464.7 mm
c	Infiltration efficace (mm/an)	$c = a - b$	3.9 mm 0.0 mm	32.6 mm 92.2 mm
d	Module (débit moyen annuel) (12 valeurs)	-	5.79 l/s	13.4 l/s
e	Volume écoulé dans l'année (million de m ³)	$e = d \times 0.031536$	0.183 10 ⁶ m ³	0 423 10 ⁶ m ³
f	Conductivité moyenne de l'année (µS/cm)	-	568.7 (µS/cm)	574.0 (µS/cm)
g	Dureté totale moyenne de l'année (12 valeurs)	-	309.3 mg/l	322.4 mg/l
h	Débit carbonaté g/s	$h = 5.79 \times 309.32$	1.8 g/s	4.3 g/s
i	Masse réelle exportée dans l'année intégrale (en tonnes)	$i = 309.32 \times 0.183 \ 10^6$	56.5 t/an	136.4 t/an
j	Masse réelle exportée dans l'année rapportée au km ² (en t/ km ²)	$j = i / 109 \text{ km}^2$	0.5 t/km ² /an	1.3 t/km ² /an
k	Dissolution spécifique réelle de l'année (mm/1 000 ans ou m ³ /km ² /an)	$k = j/2.7$	0.2 mm/1 000 ans	0.5 mm/1 000 ans
l	Dissolution spécifique calculée (formule de Corbel 1957) en mm/1 000 ans ou m ³ /km ² /an	$l = 0.4 \times c \times g/1000$	0.5 mm/1 000 ans 0 mm	4.2 mm/1 000 ans 11.4 mm/1 000 ans
m	Dissolution spécifique calculée (formule de Williams, 1963) en mm/1 000 ans ou m ³ /km ² /an	$m = (e \times g) / (10 \times 2.7)$	2.1 mm/1 000 ans	5.1 mm/1 000 ans
n	Dissolution maximale potentielle DMP (formule de Gombert, 1988) (en mm/1 000 ans ou m ³ /km ² /an)	$n = 0.0019 \times P^{1.4}$	6.3 mm/1 000 ans 6.2 mm/1 000 ans	8.9 mm/1 000 ans 10.3 mm/1 000 ans

Calcul de la dissolution spécifique réelle et application de quelques formules classiques au système de Ghar Boumaza (Ain Taga), pour deux années hydrologiques. Surface du BV: 109 km², température moyenne annuelle: 16.3°C (station lalla Setti 1956-1998), pluviométrie (station Lalla Setti). Les formules de Corbel, Williams et Gombert ont été tirées de Jailliet 2000.

La première valeur correspond à la station pluviométrique de Lalla Setti, la seconde à celle du Meffrouch).

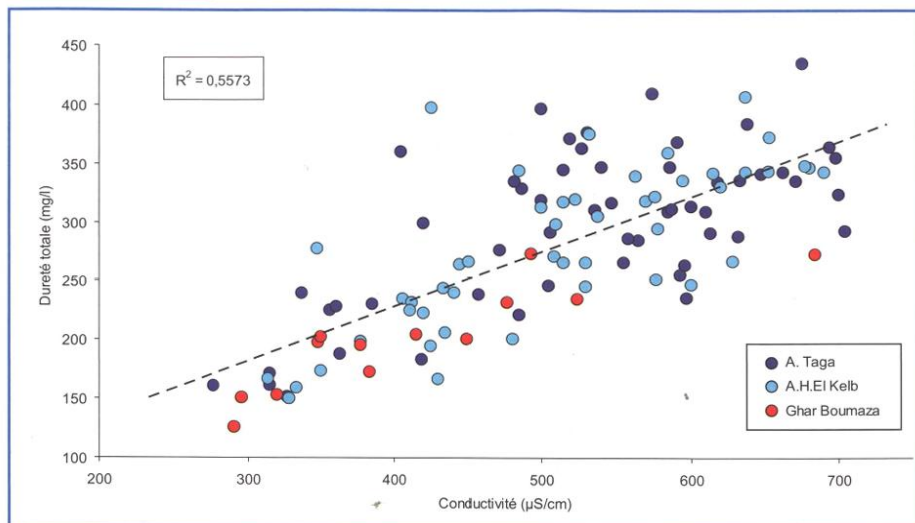


Figure 7 : Relation unissant les conductivités et la dureté totale des eaux d'Ain Taga, Ain Hassi El Kelb et Ghar Boumaza (les résultats de 115 analyses ont été utilisés). *Relationship between conductivity and total hardness of the Taga, Hassi El Kelb and Ghar Boumaza waters (results of 115 analyses were used).*

- le volume d'eau écoulé dans l'année et la dureté totale (formule de Williams 1963, tableau 1).

Ensuite nous avons effectué le calcul de la dissolution maximale potentielle par la formule de Gombert 1988. Les résultats sont récapitulés dans le tableau 1.

L'estimation de la masse carbonatée exportée mensuellement a été effectuée en affectant au débit mensuel la valeur de la dureté totale instantanée qui lui correspond. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 8.

B. Calcul de la masse des carbonates exportés au niveau du système de Ghar Boumaza

Pendant onze mois par an, toute l'eau de la rivière souterraine se perd avant d'arriver à l'exutoire de Ghar Boumaza. Tant que le débit est inférieur à quelques centaines de litres par seconde, il est entièrement absorbé par le « Déversoir », une perte située en rive gauche, à 1 600 m de l'entrée de la grotte. Une

coloration effectuée par Birebent dans les années 1950 a prouvé que tout cet écoulement se retrouve à Ain Taga après quelques jours [Collignon, 1987] (figure 2).

Etant donné qu'au niveau du point Ghar Boumaza nous ne disposons pas de données de dureté pour l'année hydrologique 2000-2001, et comme les eaux de ces trois points d'eau sont identiques (figure 6), nous utiliserons les valeurs moyennes concernant les deux sources Ain Taga et Ain Hassi El Kelb, données dans les tableaux 2 et 3.

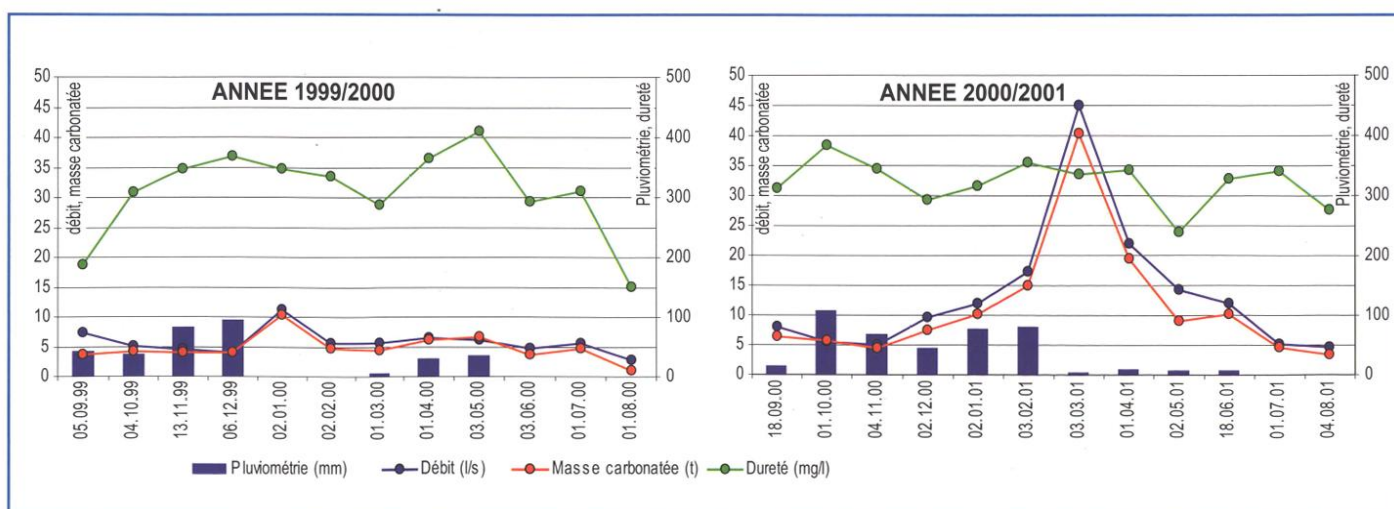
L'année hydrologique 2000-2001 a été marquée par des événements pluviométriques qui dépassent les moyennes mensuelles, 112 mm pour le mois d'octobre 2000 et 131 mm pour le mois de janvier 2001. Cela représente respectivement 20 % et 26 % du total annuel (419 mm) dont 93 % sont tombés au cours des sept premiers mois de l'année. Ces fortes pluviométries ont engendré des augmentations des débits des sources Ain Taga et Ain Hassi El Kelb et surtout des crues de la Tafna souterraine (environ 4 000 l/s en mars 2000).

Parallèlement à cela, l'année hydrologique 2001-2002 a enregistré une pluviométrie annuelle plus forte (514 mm) que la précédente mais plus uniformément répartie. Ainsi on note 45 % des précipitations annuelles qui sont tombées au cours des quatre premiers mois et ont engendré une petite crue de la rivière souterraine (100 l/s). Ces observations expliquent bien la grande différence entre les débits moyens du tableau 3. Si nous considérons la totalité des flux sortants du système de Ghar Boumaza, pour effectuer nos calculs, nous obtenons les résultats présentés dans le tableau 4.

IV Discussion des résultats

A la station d'Ain Taga, le suivi des débits et de la physico-chimie des eaux nous a permis

Figure 8 : Evolution de la masse carbonatée (tonnes), du débit (l/s), des précipitations (mm) (au niveau de la station de Lalla Setti) et de la dureté (mg/l) sur deux périodes de référence (années 1999-2000 et 2000-2001). *Evolution of the carbonate mass, the discharge, the precipitation (station of Lalla Setti) and the hardness with time (years 1999-2000 and 2000/2001).*



d'estimer le débit des carbonates par l'utilisation de la dureté totale de l'eau. Sur l'année hydrologique 1999-2000, l'exportation des carbonates est de 0,5 t/km²/an soit une dissolution spécifique de 0,2 mm/1 000 ans (par comparaison, en 2000-2001, 1,2 t/km²/an, soit 0,5 mm/1 000 ans).

La figure 8 (année 1999/2000) montre que l'évolution du débit traduit une bonne réponse de la source aux précipitations. Le délai de réponse peut être très court, de quelques heures à quelques jours. La masse carbonatée évolue de la même manière que le débit. Par contre la dureté ne suit les autres paramètres que sur la période janvier-août. Du mois de septembre à décembre la dureté augmente alors que le débit diminue. L'augmentation des précipitations, et donc de l'écoulement, dilue la charge carbonatée [Audra, 2001]. Inversement, dès que le débit commence à diminuer, la dureté commence à reprendre sa valeur normale.

La figure 8 (année 2000/2001) traduit un comportement du système assez différent du précédent. En effet, l'année 2000-2001 est relativement humide par rapport à la précédente. On note que la masse carbonatée évolue de la même manière que le débit. On enregistre un pic en mars 2001. Cette augmentation traduit une réponse à la période pluvieuse qui a duré de novembre à mars. La dureté fluctue entre les deux valeurs extrêmes de 238 mg/l et 383 mg/l, sans pour autant montrer une dépendance avec les autres paramètres.

Des calculs analogues effectués sur les trois exutoires du système karstique de Ghar Boumaza (Ain Taga + Ain Hassi El Kelb + Ghar Boumaza) permettent de voir que pour l'année 2000-2001 la masse réelle des carbonates exportée du système est de 47,8 t/km²/an soit une dissolution spécifique de 17,7 mm/1 000 ans (5,7 t/km²/an soit 2,1 mm/1 000 ans pour l'année 2001-2002).

L'analyse de Ain Taga sur deux années hydrologiquement contrastées montre que la dissolution apparaît très sensible à la recharge (figure 8). Une simple régression linéaire les met en relation [Bensaoula, 2006]. Des résultats similaires ont été obtenus par d'autres auteurs tels que Gams, 1972 ; White, 1984 ; Yoshimura et Inokura, 1997 ; Liu *et al.*, 1999.

La dissolution spécifique réelle calculée pour le système karstique en question est très faible. Selon les travaux de Pulina dans le nord algérien, la dissolution potentielle (*potentiel karst denudation*) varie dans une fourchette de 10 à 15 mm/1 000 ans [Pulina, 1974]. Pour des régions à pluviométrie similaires, Drogue et Daoxian [1987] trouvent des valeurs de la dissolution spécifique qui varient de 22,3 à 20,6 mm/1 000 ans.

Nom de la source	Dureté totale moyenne (mg/l) (1999-2000)	Dureté totale moyenne (mg/l) (2000-2001)	Dureté totale moyenne (mg/l) (2001-2002)	Dureté totale moyenne pour 117 valeurs*
A.Taga	309.32	322.43	334.09	-
A.H.El Kelb	228.37	286.2	327.00	-
Ghar Boumaza	non mesurée	non mesurée	non mesurée	-
Moyenne	244.56	268.21	285.70	279.67

Tableau 2 : Dureté totale moyenne des trois sources du système karstique de Ghar Boumaza. *Averaged total hardness of the three springs of the Ghar Boumaza karst system.*

N.B : Pour le calcul de la moyenne nous avons pris pour Ghar Boumaza la valeur de 196 mg/l (moyenne de la période de mesure disponible : de décembre 2003 à octobre 2004).

* 117 valeurs correspondent à l'ensemble des données de dureté pour les mesures effectuées entre février 1999 et septembre 2004.

Paramètre	Période	2000-2001	2001-2002	Toute la série de données (117 valeurs)
Débit moyen (l/s)		616.5	69.2	297.8 (38 valeurs)
Dureté totale moyenne (mg/l)		268.2	285.7	279.7

Tableau 3 : Paramètres retenus pour le calcul de la dissolution spécifique au niveau du système karstique de Ghar Boumaza. *Parameters used for the calculation of specific dissolution rates within the Ghar Boumaza karst system.*

Il serait délicat de chercher à comparer le karst de Ghar Boumaza avec les autres systèmes karstiques du monde à partir des résultats que nous avons obtenus. Par ailleurs, d'autres auteurs, dans d'autres régions à climat humide et chaud (avec des précipitations qui varient de 3 m à 12 m/an !), ont évalué cette dissolution à des valeurs beaucoup plus élevées qui s'étalent entre 120 à 760 mm/1 000 ans, [Maire, 1981 ; James, 1980 ; Sweetings, 1979 in Audra, 2001, p. 77].

Il faut enfin noter que les débits des sources de ce système sont très variables. Ainsi, les plus fortes valeurs de dissolution apparaissent au moment des crues [Bensaoula, 2006]. L'évolution du débit de carbonates en fonction du temps est très proche de l'hydrogramme. On peut dire que le transit de matière

Tableau 4 : Dissolution spécifique dans le système de Ghar Boumaza. *Specific dissolution rates in the Ghar Boumaza system.*

		Formulation	Année 2000/2001	Année 2001/2002
a	Module (débit moyen annuel) (12 valeurs)	Débit moyen des 3 sources	616.5 l/s	69.2 l/s
b	Volume écoulé dans l'année (million de m ³)	$b = a \times 0.031536$	$19.441 \times 10^6 \text{ m}^3$	$2.182 \times 10^6 \text{ m}^3$
c	Dureté totale moyenne de l'année (12 valeurs)	-	268.2 mg/l	285.7 mg/l
d	Débit carbonaté g/s	$d = a \times c$	165.4 g/s	19.8 g/s
e	Masse réelle exportée dans l'année (intégrale) (en tonnes)	$e = c \times b$	5 214.3 t/an	623.5 t/an
f	Masse réelle exportée dans l'année (en t/km ²)	$f = e / 109 \text{ km}^2$	47.8 t/an/km ²	5.7 t/an/km ²
g	Dissolution spécifique réelle de l'année (mm/1 000 ans ou m ³ /km/an)	$g = f / 2.7$	17.7 mm/1 000 ans	2.1 mm/1 000 ans



Photo 4: Travertins à l'aval du système karstique de Ghar Boumaza. Travertine deposit downstream the karstic system of Ghar Boumaza.

dissoute (débit de carbonates) est plus fonction des volumes d'eau que de la charge dissoute (tableau 4).

Conclusion

Il ressort de cette première étude de ce type, pour le système karstique de Ghar Boumaza, que la masse réelle des carbonates exportée est de 47,8 t/km²/an ce qui donnerait une dissolution spécifique de 17,7 mm/1 000 ans pour une année hydrolo-

gique à pluviométrie moyenne. Cette valeur est huit fois plus faible pour une année hydrologique relativement déficitaire où la pluviométrie est réduite de moitié.

Il serait erroné de penser que ces résultats obtenus à partir de mesures mensuelles puissent conduire à des conclusions définitives. Il est donc important de penser à constituer des séries de données hydrochimique à des pas de temps plus courts (journaliers ou hebdomadaires) ne serait-ce que pour une ou deux années hydrologiques. Il serait aussi très utile de remettre en marche la station pluviométrique qui se trouve dans la partie aval du bassin (station Merchiche), qui ne fonctionne plus depuis 1996. Cependant il est évident que les chiffres dégagés à la fin de cette étude nous permettent déjà de voir que les conditions dans lesquelles s'est formé le réseau souterrain de Ghar Boumaza ont été probablement différentes voire plus favorables.

En effet, même si les données sont vraiment très fragmentaires, il apparaît que le régime pluviométrique actuel et par conséquent le débit des sources est très faible par rapport à ce qu'il a pu être pendant les phases climatiques anciennes.

Remerciements

Je tiens à remercier M. Fadi Nader et un lecteur anonyme pour avoir bien voulu assurer une relecture constructive qui a permis d'améliorer ce travail.



AUDRA P., 2001 - Valeur et répartition de la dissolution spécifique dans les karsts des montagnes Nakanaï, 77-86 in Audra P, De Coninck P, Sounier J-P, (Ed): Nakanaï 1978-1998, 20 ans d'exploration. Ed. Hémisphère sud, 224 p.

BARATHON J.-J., 1989 - Bassins et littoraux du Rif oriental (Maroc) : évolution morphoclimatique et tectonique depuis le Néogène supérieur. Etudes médit. 13, Centre universitaire d'études médit., Poitiers, 531p.

BENEST M., 1985 - Evolution de la plate-forme de l'Ouest algérien et du Nord-est Marocain au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé: Stratigraphie, milieux de dépôts et dynamique sédimentaire. Thèse, docum. Labo. Géol. Lyon, n° 95, 581p. 145 fig., 23 pl.

BENSAOULA F., 2006 - Karstification, hydrogéologie et vulnérabilité des eaux karstiques. Mise au point d'outils pour leur protection (Application aux Monts de Tlemcen - Ouest Oranais), Thèse, Université de Tlemcen, 216 p.

BIREBENT J., 1948 - Explorations souterraines en Algérie. Campagne

1946- 1947, *Ann. spé.* 1948; III: 112-123.

BOUANANI A., 2004 - Hydrologie, transport solide et modélisation: étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW- Algérie), Thèse, Univ. d'Oran.

CAMPS G., 1974 - Les civilisations préhistoriques de l'Afrique du Nord et du Sahara, Paris, éd. Douin, 1974, 373 p.

COLLIGNON B., 1987 - Ghar Bou Maza premiers éléments de synthèse sur la géologie et l'hydrogéologie, *Spéléologie algérienne*, n°4.

COLLIGNON B., 1991 - Rhar Boumaza, The underground river Tafna. *The international caver* (1) 24-30.

CORBEL J., 1957 - Les karsts du nord-ouest de l'Europe. Thèse, Lyon, 541 p., 100 pl.

DRAKE J. AND FORD D., 1973 - The dissolved solids regime and hydrology of two mountain rivers. *Proc. 6th Int. Cong. speleol.* (Olomouc), 4, 53-56.

DROGUE C. ET DAOXIAN Y., 1987 - Genèse des magasins karstiques, analyse comparative des valeurs actuelles de la dissolution naturelle

des roches carbonatée d'après des exemples en Chine et dans d'autres parties du monde, *Carsologia Sinica*, Vol.6, n°2, p. 127-136.

FORD D. ET WILLIAMS P.-W., 1989 - Karst geomorphology and hydrology. London Unwin Hyman, 1989, 601p.

GAMS I., 1972 - Effect of runoff on corrosion intensity in the northwest Dinaric karst. *Trans. Cave Res. Gp GB* 14(2), 78-83.

JAILLET S., 2000 - Un karst couvert de bas plateau: Le Barrois, *Structure-Fonctionnement, Evolution*. Thèse Université Bordeaux 3, 710p.

JAILLET S., 2001 - Le rôle des crues dans la morphogénèse d'un système karstique sous couverture non carbonatée: le Rupt-du-Puits (Lorraine-Champagne, France), 7ème conf. *Terrains calcaires et milieux fissurés*, Besançon, 2001.

LIU Z., YUAN D. AND ZHAO J., 1999 - Contribution of Carbonate Rock Weathering to the Atmospheric CO₂ Sink. In *Karst processes and the carbon cycle*, Final report of IGCP379, 1999, Geological publishing house, Beijing, China.

PULINA M., 1974 - Denudacja chemiczna na obszarach krasu węglanowego (Chemical denudation on the carbonate karst areas). Thèse, Polska academia Nauk, institute Geografii, Prace geograficzne n°105, Wrocław, 159 p.

REMAOUN K., 1996 - Evolution géomorphologique du bassin versant de l'Oued Tafna (Algérie occidentale). Thèse, Université d'Oran 1996, 596 p.

ROGNON P., 1980 - Une extension des déserts (Sahara et moyen orient au cours du Tardiglaciaire (18000-10000 ans), *Rev. Geog. phys. et Géol. dyn.* 1980, 22: 313-329.

WHITE W.-B., 1984 - Rate processes: chemical kinetics and karst landform development: La Fleur RG (ed.), *Groundwater as a geomorphic agent*. Allen and Unwin, London Boston Sydney 227-248.

YOSHIMURA K. AND INOKURA Y., 1997 - The geochemical cycle of carbon dioxide in a carbonate rock area, Akiyoshi-dai Plateau, Yamaguchi, Southwestern Japan: *Proceedings 30th Int. Geol. Congress*, 1997, 24: 114-126.