

Fonctionnement hydrologique et géochimique du système karstique de Bange-L'Eau-Morte

Thibault Mathevet⁽¹⁾, Nevila Jozja⁽²⁾

⁽¹⁾ EDF-DTG - 21, avenue de l'Europe, BP 41 - 38040 Grenoble cedex 9 -
thibault.mathevet@edf.fr

⁽²⁾ Environnement, Traçage et Détection – Polytech'Orléans – 8 rue Léonard de Vinci – 45072
Orléans cedex 2 – nevila.jozja@univ-orleans.fr

I. INTRODUCTION

Michel Lepiller a découvert les Bauges en 1967 [4] et y a consacré sa thèse dès le début des années 1970. Parmi l'ensemble des systèmes karstiques auxquels Michel Lepiller s'est intéressé, le système karstique de Bange-L'Eau-Morte (SKBLM) a été l'objet d'études longues et intensives [2 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; 9 ; 14 ; 15]. Dans le cadre des travaux de recherche, de Michel Lepiller et du laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Orléans, de nombreuses générations d'étudiants sont passées par les bauges et ce système a été l'objet d'études climatiques, hydrologiques, géologiques et géochimiques, auxquelles on peut rajouter de nombreux traçages. Par ailleurs, à partir du début des années 1980, Michel Lepiller a mis en place une station d'acquisition à l'exutoire du SKBLM qui lui a permis de suivre en continue le débit, la température de l'eau et la conductivité électrique de l'eau. Au prix d'un effort constant et de visites régulières à partir d'Orléans, l'acquisition des données s'est faite pendant plus de 20 ans.

L'intérêt de ce système karstique réside dans sa petite taille et sa grande karstification, qui permettent un écoulement très rapide des eaux. Ces deux caractéristiques rendent l'étude de ce système particulièrement intéressante, car les différents signaux hydrologiques et géochimiques enregistrés à l'exutoire de ce système sont particulièrement clairs et nous renseignent sur les différents processus qui ont lieu au sein de ce système karstique. Grâce à la pérennité des observations, nous disposons de chroniques de données inestimables pour l'étude de l'évolution du fonctionnement d'un système karstique au cours du temps, notamment en fonction de l'évolution d'un forçage climatique, comme celle qui concerne la température moyenne de l'air.

Dans cet article nous présenterons les caractéristiques générales de ce système karstique, son fonctionnement hydrologique et géochimique et les tendances récentes observées sur l'exportation carbonatée.

II. LE SYSTEME KARSTIQUE DE BANGE-L'EAU-MORTE

Le système karstique de Bange-L'Eau-Morte est, par sa superficie, le système le plus important du Semnoz (figure 1). Il occupe une superficie de 12.3 km² et s'étend entre 640 et 1699 m d'altitude, avec une altitude moyenne de 1225 m. Sa surface est principalement recouverte par de la forêt. Ce système doit son nom aux deux grottes qui permettent d'accéder directement à la zone saturée, la grotte de Bange et la grotte de L'Eau-Morte, situées proche du seul exutoire pérenne du système, le Nant de la Combe. Le SKBLM est entièrement situé

dans la moitié sud du Semnoz. D'un point de vue stratigraphique et tectonique, ce système est très homogène : sa lithologie est constituée à plus de 90 % par une dalle de calcaire Urgonien et aucune faille majeure ne vient rompre l'homogénéité de la dalle calcaire.

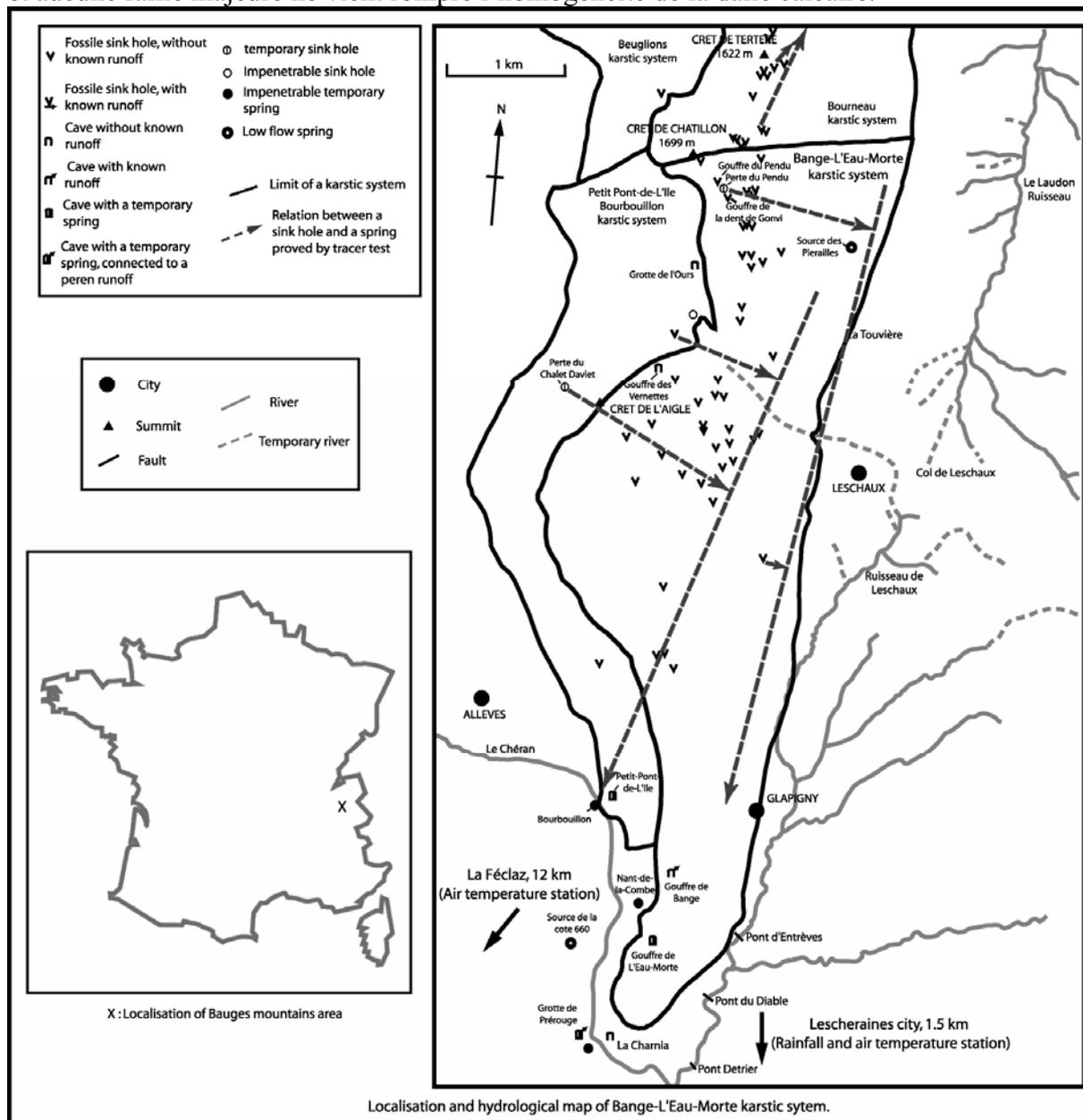


Figure 1 : Localisation et carte hydrogéologique du système karstique de Bange-L'Eau-Morte

Seul un ruisseau issu d'une dépression de type ruz est creusé dans les niveaux marneux et argileux de l'Hauterivien. Les limites latérales du système sont bien connues, car elles ont fait l'objet de campagnes de traçages [4]. A l'est, la limite orientale est constituée par les formations non karstiques (formations de l'Albien au sud et formations tertiaires au nord) qui recouvrent stratigraphiquement les calcaires de l'Urgonien et de l'Aptien. A l'ouest, la limite occidentale est constituée par les affleurements des marnes de l'Hauterivien moyen au sud et par les buttes résiduelles de marnes de l'Hauterivien inférieur au nord du Crêt de l'Aigle. Au sud, la limite méridionale a été placée au niveau de la cote critique de 647 m, surface libre du plan d'eau recoupé par la Grotte de Bange, lorsque le circuit de trop plein de l'Eau-Morte rentre en fonctionnement. Au nord, la limite septentrionale a été déterminée par de nombreux

traçages. Elle se trouve certainement au niveau de la ligne de divergence des pendages de l'Urgonien. Enfin, la limite inférieure, le substratum imperméable, est principalement constituée par les marnes de l'Hauterivien moyen, qui sont continues sur le Semnoz.

Une campagne de terrain récente [14] a permis l'identification des directions principales de drainage [3] par le relevé de tectoglyphes (failles, stylolithes, veines) sur l'ensemble des affleurements du SKBLM. L'interprétation de ces relevés est particulièrement intéressante, car les trois directions principales de drainage (N 15° E, N 75° E, N 120° E) issues de ces analyses sont en accord avec les relevés spéléologiques et la carte du réseau spéléologique explorés par l'entente spéléologique des Bauges.

D'après la classification de Marsaud [13] le système est unaire. La majeure partie de l'alimentation du système (96 % de la surface du bassin versant) est assurée par des apports diffus se réalisant sur les calcaires de l'Urgonien, du Barrémien inférieur et Hauterivien supérieur. Une forte proportion de ces apports diffus est soumise aux différents régimes d'infiltration, qui donnent lieu à un différé plus ou moins long de l'infiltration. Le reste de l'alimentation (seulement 4 % de la surface du bassin versant) se fait sous forme de ruissellement superficiel temporaire sur les affleurements des argiles de l'Hauterivien moyen situés en tête de bassin versant. Ce ruissellement, qui se perd au niveau de l'Hauterivien supérieur et du Barrémien inférieur, alimente en aval le ruissellement souterrain.

D'un point de vue hydrologique (Tableau 1), le SKBLM reçoit une lame d'eau d'environ 1400 mm/an, pour un écoulement de 830 mm/an, ce qui fait un déficit d'écoulement d'environ 570 mm/an. Le SKBLM possède un trop-plein, L'Eau-Morte, située juste au dessus de l'exutoire principal du Nant de la Combe, qui rentre en fonctionnement au cours des principales crues (15% du temps). Sur la surface du SKBLM, le ruissellement des eaux de pluie arrive très rarement et les pluies s'infiltrent majoritairement de manière diffuse dans le karst. Les précipitations, stockées sous forme de neige pendant l'hiver, représente 20% à 50% de l'alimentation en eau du SKBLM qui s'écoule dans le système au printemps.

Site de mesure	Variable	Moyenne inter-annuelle
Nant de la Combe – Allèves (647 m)	Débit	830 mm/an
		320 l/s
Lescheraines (650 m)	Pluie	1400 mm/an
Lescheraines (650 m)	Température de l'air	8.7 °C

Tableau 1 : Bilan hydrologique du système karstique de Bange-L'Eau-Morte

III. FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE DU SYSTEME KARSTIQUE DE BANGE-L'EAU-MORTE

Le fonctionnement hydrodynamique du SKBLM a été étudié par l'analyse des débits classés et des récessions et par l'analyse des séries chronologiques [Mathevet, 2002].

III.1. Analyse des débits classés et des récessions

L'analyse des débits classés [11] permet d'identifier des événements particuliers (fuite, trop-plein) à partir des modifications qu'ils induisent sur l'hydrogramme. L'information obtenue sur le fonctionnement du système est différente selon la position des ruptures et leurs pentes respectives [13]. L'analyse des débits classés présente trois ruptures à 0.8, 2.5 et 2.8 m³/s. La première rupture correspond à la mise en charge des écoulements dans la grotte de Bange et l'entrée en fonctionnement du trop plein de l'Eau-Morte. Les ruptures à 2.5 et 2.8 m³/s sont

plus difficiles à identifier et correspondraient à l'exploitation de réseaux de drainage paléokarstiques plus transmissifs pendant les fortes crues.

L'analyse des récessions [10] permet d'identifier certains paramètres hydrodynamiques du SKBLM, tels que les coefficients de tarissement, d'infiltration et d'hétérogénéité des écoulements, ainsi que le volume dynamique du système. Les analyses réalisées sur la période 1980 – 1996 permettent d'estimer ces paramètres, qui traduisent le caractère bien drainé de ce système, dont les caractéristiques sont proches de celles du système karstique d'Aliou dans les Pyrénées. Le volume dynamique de l'aquifère est très faible, il traduit l'absence de réserve de ce système, qui est d'environ 210 000 m³. D'après la classification des systèmes karstiques de Mangin [12], le SKBLM fait partie des systèmes karstiques possédant un réseau de drainage très développé, avec une zone noyée peu importante, comme celui d'Aliou (Figure 2).

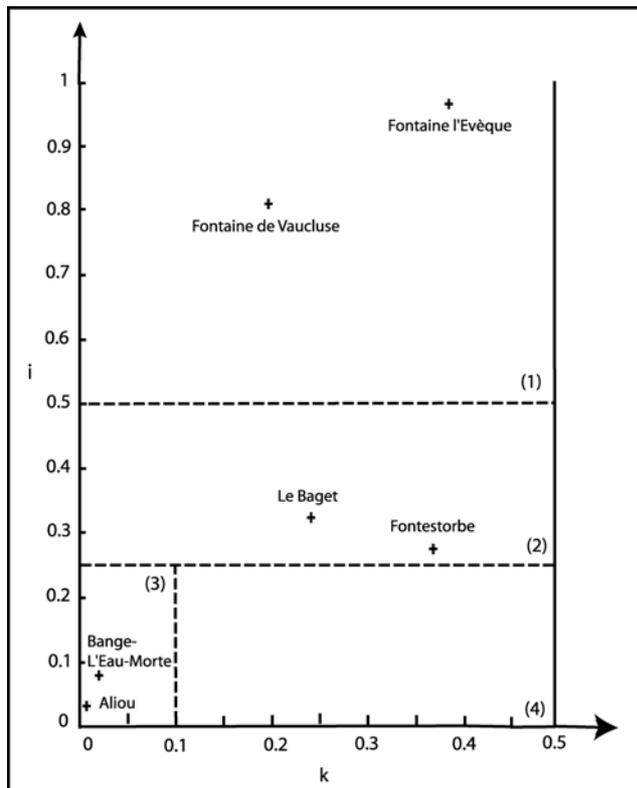


Figure 2 : Classification du système karstique de Bange -L'Eau-Morte dans le diagramme de A. Mangin [1975].

Éléments d'interprétation du diagramme de A. Mangin (1975) :

- 1 : Systèmes complexes ;
- 2 : Systèmes plus karstifiés à l'amont qu'à l'aval, avec des retards à l'alimentation ;
- 3 : Systèmes karstiques possédant un réseau de drainage très développé, avec une zone noyée peu importante ;
- 4 : Réseaux spéléologiques bien développés débouchant en aval sur un important karst noyé ;

III.2. Analyse des séries chronologiques

L'analyse des séries chronologiques, assez classique dans l'étude des systèmes karstiques [Mangin, Labat], nous permet d'explorer les propriétés des différentes variables caractérisant le fonctionnement du SKBLM, tel que la pluie, la température ou le débit, ainsi que les relations entre la pluie ou la température et le débit. L'ensemble des traitements classiques (analyses corrélatoires et spectrales, simples et croisées, analyses en ondelettes) ont été faites pour différentes chroniques du SKBLM [15]. Ces analyses (Figure 3) sont très cohérentes et confirment le caractère très nerveux de ce système avec une très faible autocorrélation des débits (effet de mémoire inférieur à 7 jours, fréquence de coupure inférieure à 5 jours) et une très bonne corrélation croisée pluie-débit pendant la période pluviale (temps de réponse de 1 jour ; $r_{\max} = 0.74$). L'effet de la neige est mis en évidence par la baisse du coefficient de corrélation ($r_{\max} = 0.56$) obtenu sur l'ensemble de la chronique et un effet capacitif traduit par la forme du corrélogramme.

Les caractéristiques de ce système mises en évidence par la très bonne relation pluie-débit sont également révélées par l'analyse de la relation température-débit, pendant la période de fonte (figure 4). En effet, à cette période, la fonte nivale représente une alimentation presque continue en eau du système, rythmée par l'évolution journalière de la température de l'air. Le caractère nerveux de ce système est mis en évidence par la très bonne corrélation température-débit (temps de réponse de 16 heures, $r_{\max} = 0.7$) et la cyclicité à 24 heures très marquée des débits indique sa bonne karstification et de faibles réserves (par sa faible capacité d'atténuation d'un signal d'entrée) (figure 5).

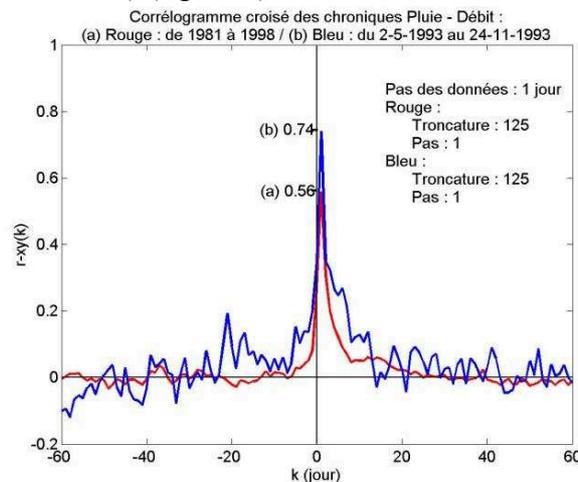


Figure 3 : Corrélogramme croisé pluie-débit, de l'ensemble du cycle hydrologique (a) et de la période pluviale (b).

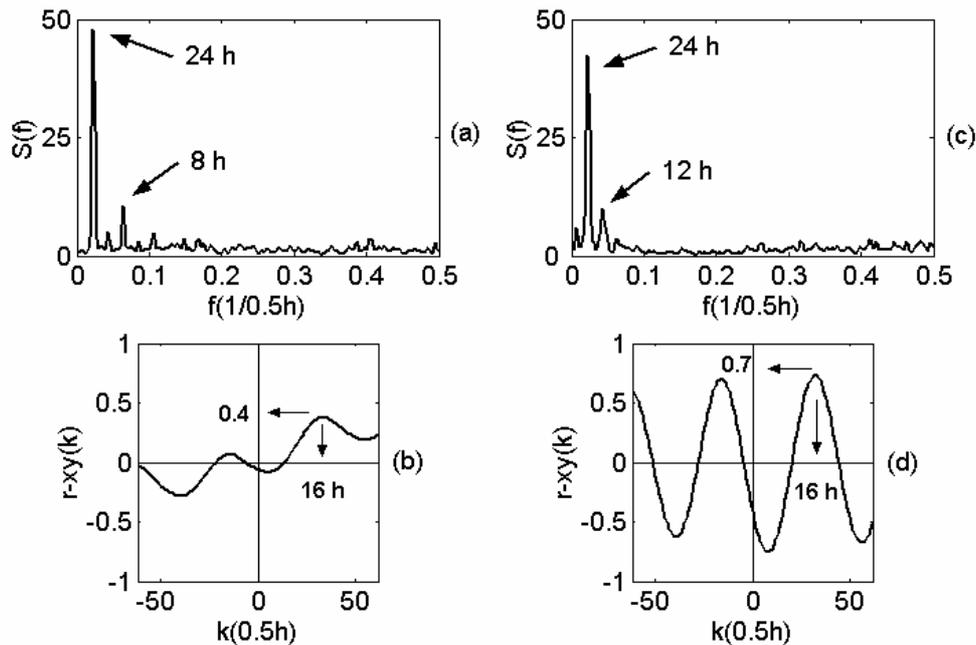


Figure 4 : Pendant la période de fonte (04/2002), (a) Spectre de la chronique de température de l'air ; (c) Spectre de la chronique de débit ; (b) Corrélogramme température-débit ; (d) Corrélogramme température-débit de la composante à 24 h des chroniques, isolées par analyses en ondelettes.

Cette partie a eu pour objet de faire la synthèse de l'ensemble des analyses qu'il est possible de réaliser pour ausculter et comprendre le fonctionnement d'un système karstique. Quel que soit le type d'analyses, le système karstique de Bange-L'Eau-Morte se caractérise donc par une bonne karstification, l'existence de faibles réserves et un caractère très nerveux en réponse à une stimulation par la pluie ou par la température de l'air en période de fonte.

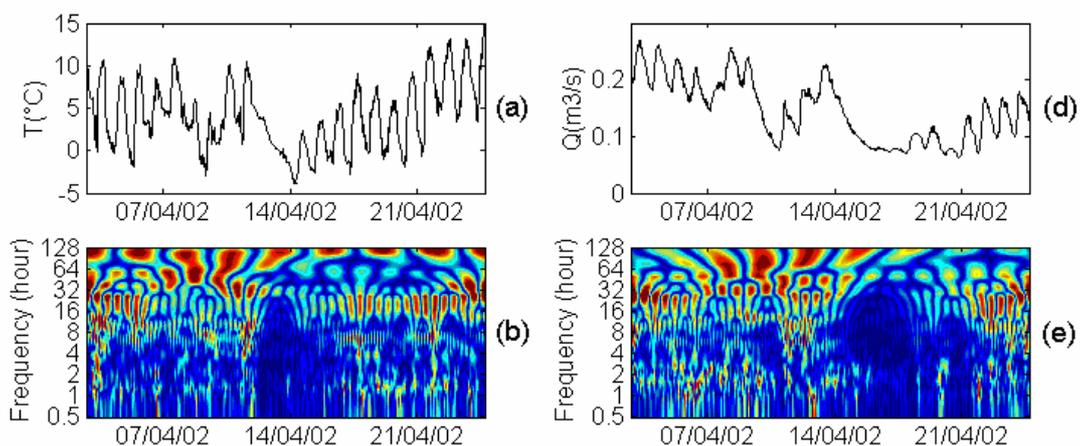


Figure 5 : Pendant la période de fonte (04/2002), (d) Chronique de température de l'air ; (c) Chronique de débit ; (b) Analyse en ondelette de la chronique de température ; (e) Analyse en ondelette de la chronique de débit. La cyclicité de la température et du débit est mise en évidence par l'existence de structures entre 16h et 24h.

IV. FONCTIONNEMENT GEOCHIMIQUE DU SYSTEME KARSTIQUE DE BANGEL'EAU-MORTE

L'analyse du fonctionnement géochimique du SKBLM est la partie la plus intéressante des analyses possibles à partir des données récoltées sur ce système. Ce travail était d'ailleurs le travail préféré de Michel Lepiller, tant les données disponibles et les caractéristiques hydrodynamiques du système permettaient aux signaux géochimiques de délivrer une grande quantité d'information. Sur ce système nous disposons entre autres d'une chronique journalière de plus de 20 ans de conductivité électrique de l'eau (sans lacunes de 1981 à 1996, et avec des lacunes jusqu'en 2002) et d'une chronique de 4 ans (1981-1985) d'ions majeurs (Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Cl^-). Il existe également d'autres chroniques plus ponctuelles (turbidité, pH, température de l'eau, etc.).

IV.1. Analyse de la chronique d'ions majeurs

L'étude hydrodynamique apporte des informations sur la manière dont les transferts d'énergie se font à l'intérieur d'un système karstique. Par contre, l'étude géochimique des eaux, en s'intéressant aux contraintes thermodynamiques et cinétiques de l'acquisition de la charge dissoute et à son transit dans le karst, apporte d'autres informations sur la structure et le fonctionnement des systèmes karstiques, notamment grâce à l'identification des modalités d'infiltration. Les notions de transfert et de transit étant très nettement dissociées dans les systèmes karstiques, la géochimie des eaux apporte donc des renseignements complémentaires sur la structure et le fonctionnement des systèmes karstiques [1 ; 6 ; 17 ; 16 ; 18]. Dans ce cadre, la concentration des ions majeurs à l'exutoire du SKBLM a été mesurée de 1981 à 1985 au pas de temps journalier. Cette chronique, qui représente un travail d'analyse très important, a été malheureusement peu exploitée.

L'analyse de cette chronique d'ions majeurs [14] a été faite grâce à des analyses en composantes principales (ACP) et des analyses factorielles discriminantes (AFD). Ce type d'analyses est classiquement utilisé en hydrogéologie karstique pour traiter de nombreuses données concernant la géochimie des eaux [17].

L'ACP permet de discriminer deux axes de variances principales. Le premier (39.4 % de variance) oppose la conductivité, le Mg^{2+} , le K^+ , la silice au débit, bien que ce dernier soit mal représenté dans le plan F1-F2. Ainsi, cet axe traduit l'opposition entre les eaux peu minéralisées et les eaux très minéralisées, c'est-à-dire les eaux à temps de séjour court (infiltration immédiate) et les eaux à temps de séjour long (infiltration lente), ce qui rend compte des conditions d'écoulement. Le deuxième axe (24.9 % de variance) est représenté par Na^+ et Cl^- . Cet axe traduit, soit les eaux d'origine météorique et/ou anthropique, soit de l'infiltration différée, car ces éléments peuvent être reconcentrés dans la partie supérieure de la zone non saturée. Les variables débit et température sont globalement mal représentées et/ou peu significatives. Leur rôle dans la variation de concentration des ions majeurs n'est pas direct. Par ailleurs, dans l'espace des individus, l'ACP permet de discriminer 6 groupes d'eaux qui confirment le caractère saisonnier du comportement de ce système. Les résultats apportés par l'ACP, vont être testés par une AFD.

En effet, l'AFD est une méthode permettant de discerner des groupes et de tester l'appartenance d'un individu à un groupe, en fonction des valeurs prises par plusieurs variables. Afin de distinguer des groupes choisis a priori, l'AFD consiste à minimiser la variance intra-groupe et à maximiser la variance intergroupe. Dans notre cas, les variables explicatives des groupes sont les variables utilisées précédemment pour l'ACP et les variables

à expliquer sont les groupes d'appartenance à un épisode du cycle hydrologique (groupes 1 à 5).

L'AFD (Figure 6) permet de discriminer deux axes de variances principales, qui représentent la même information que celle apportée par les ACP. Par rapport aux groupes d'individus choisis a priori les résultats de l'AFD sont très intéressants, car seulement 5% des individus sont mal classés. Une aussi bonne discrimination est assez rare pour un système karstique. Cependant, elle ne fait que confirmer les renseignements apportés par l'étude hydrodynamique : le système est très sensible aux conditions extérieures et filtre peu d'informations.

Les cinq groupes se répartissent autour d'un cercle et se succèdent chronologiquement. Les groupes d'eaux de crues (automne, fonte des neiges, printemps), qui sont assez dispersés, se distinguent des groupes d'eaux d'étiages (hiver, été), qui sont assez compactes. La dispersion des eaux de crue est due aux variations extrêmes du chimisme des eaux pendant ces épisodes. Pendant les crues, le chimisme des eaux résulte du mélange d'eau d'infiltration immédiate, d'eau d'infiltration différée et d'eau d'infiltration lente. Pendant les étiages, le système est principalement alimenté par des eaux d'infiltration lente et d'eau provenant du karst noyé, dont le chimisme varie moins fortement que pendant les périodes de crue.

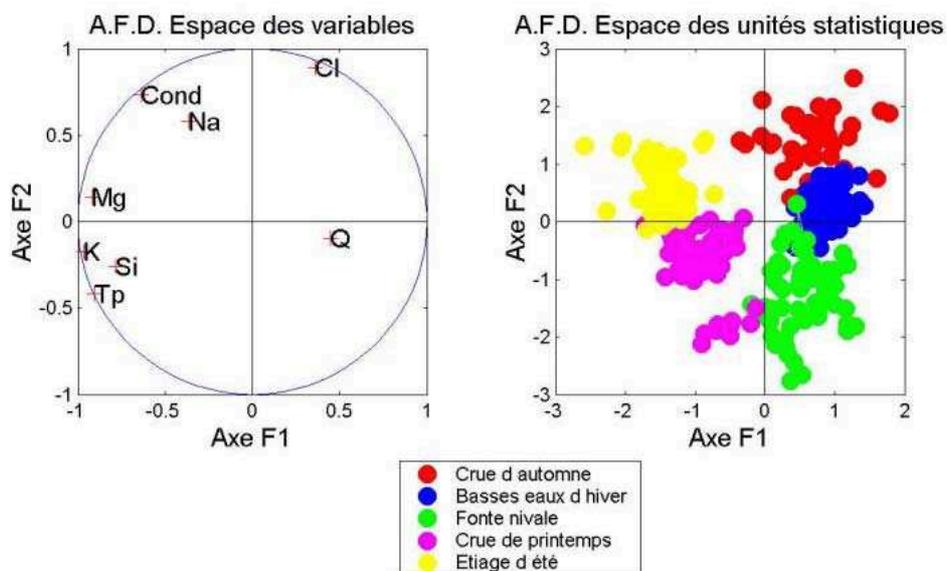


Figure 6 : Analyse Factorielle Discriminante du chimisme de l'eau du système karstique de Bange-L'Eau-Morte

De plus, le stockage des précipitations sous forme de neige pendant l'étiage d'hiver, et la forte évapotranspiration à l'origine de la rétention de forts volumes d'eau dans la zone non saturée pendant l'étiage d'été, jouent le rôle de filtre. Ceci explique la plus faible variabilité du chimisme des eaux pendant ces deux périodes. Par rapport aux individus mal classés, ils apportent également de l'information et permettent de discriminer facilement des épisodes (eaux d'infiltration) assez différents du groupe auquel ils appartiennent.

Les analyses factorielles nous donnent une bonne vision du fonctionnement géochimique global de ce système. Ainsi, les eaux varient de manière cyclique et les cinq groupes correspondant aux cinq périodes du cycle hydrologique se distinguent très bien. Ces analyses rendent bien compte des eaux d'infiltration lente ou des eaux d'infiltration rapide. Cependant, les eaux d'infiltration différées sont mal discriminées. C'est la raison pour laquelle une grande

partie des individus mal classés correspondent à ce type d'eaux et sont reclassés dans d'autres groupes.

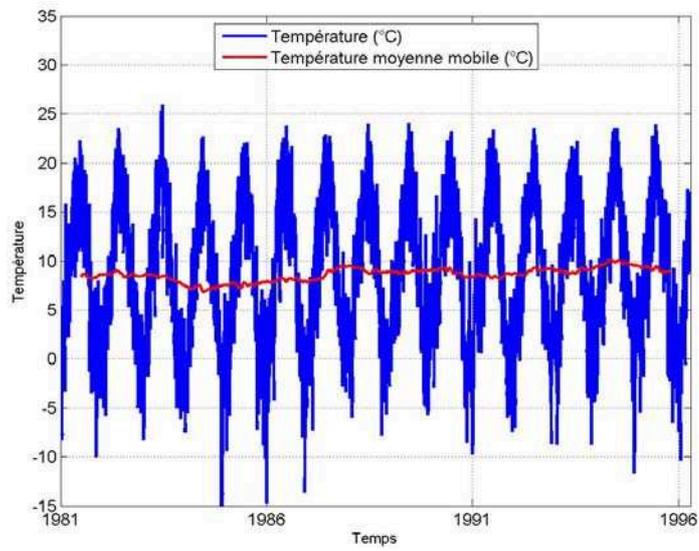
IV.2. Analyse de la chronique de conductivité

L'analyse de la chronique de conductivité au cours du temps était un sujet qui intéressait fortement Michel Lepiller. En effet, l'énergie qu'il a déployée pour maintenir la pérennité des mesures de débit et de conductivité à la station du Nant de la Combe, prenait tout son sens dans la durée. En plus de l'analyse du fonctionnement à court terme du SKBLM et des différentes modalités d'infiltration et d'écoulements, cette chronique permet de comprendre comment la géochimie des eaux, et l'exportation carbonatée, d'un système karstique est influencée par une variable climatique, telle que la température.

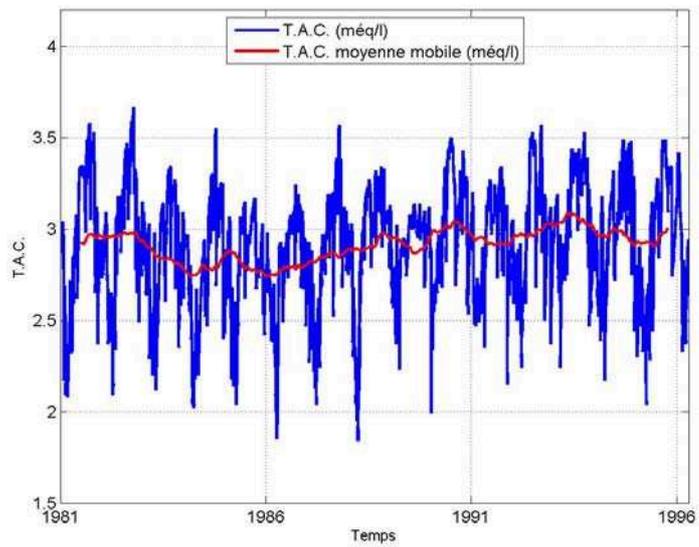
Dans le cadre du SKBLM, la conductivité de l'eau représente très bien la concentration de HCO_3^- (relation linéaire avec un $R^2 = 0.99$). Ainsi, la seule mesure de la conductivité permet de suivre l'exportation carbonatée du système karstique.

La figure 7 montre l'évolution des chroniques de température de l'air et de T.A.C. de 1981 à 1996. Il serait intéressant d'étudier cette chronique jusqu'en 2005, mais l'existence de lacunes rend plus difficile les analyses. La Figure c) montre les chroniques de température de l'air et du T.A.C. lissée par une moyenne mobile et centrée-réduite. On observe tout d'abord sur cette chronique le caractère saisonnier des variations de températures de l'air et de T.A.C., ainsi qu'une tendance sur le long terme à l'augmentation de la température de l'air et du T.A.C.. Cette figure montre une bonne co-fluctuation de ces deux variables, avec un déphasage de 2 à 3 mois. Cette augmentation de température de l'air et du T.A.C., est à mettre en relation avec l'augmentation globale de la température de l'air. L'augmentation de température de l'air est de l'ordre de 3°C en 15 ans, et l'augmentation du T.A.C. est de l'ordre de 0.3 ° d'alcalinité.

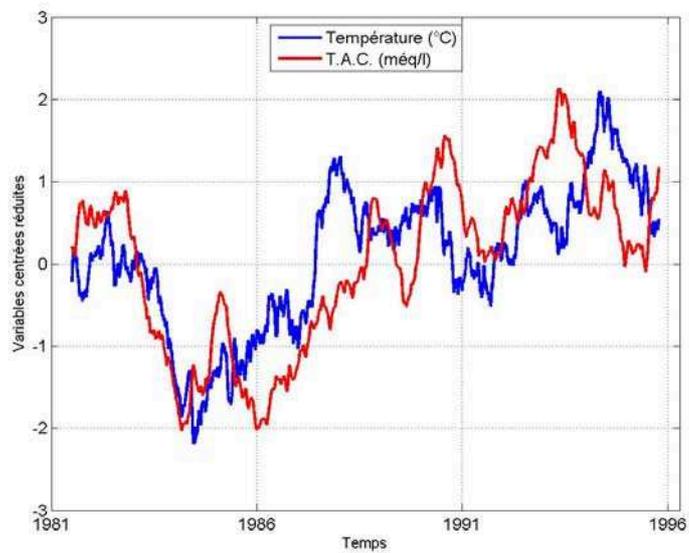
Les analyses corrélatoires et spectrales mettent en évidence le caractère cyclique de la température et du T.A.C., avec une autocorrélation assez forte (Figures 8 a et b). Le corrélogramme croisé entre ces deux variables montre une bonne corrélation ($r_{\max} = 0.6$), avec un déphasage de 2 à 3 mois. Les autres relations du T.A.C. avec la pluie ou les débits sont beaucoup moins bonnes, aussi bien à court terme qu'à long terme.



a)



b)



c)

Figure 7 : Chroniques de température (a) et T.A.C. (b) sur la période 1981-1996. (c) chronique de température et T.A.C. en variables centrées et réduites.

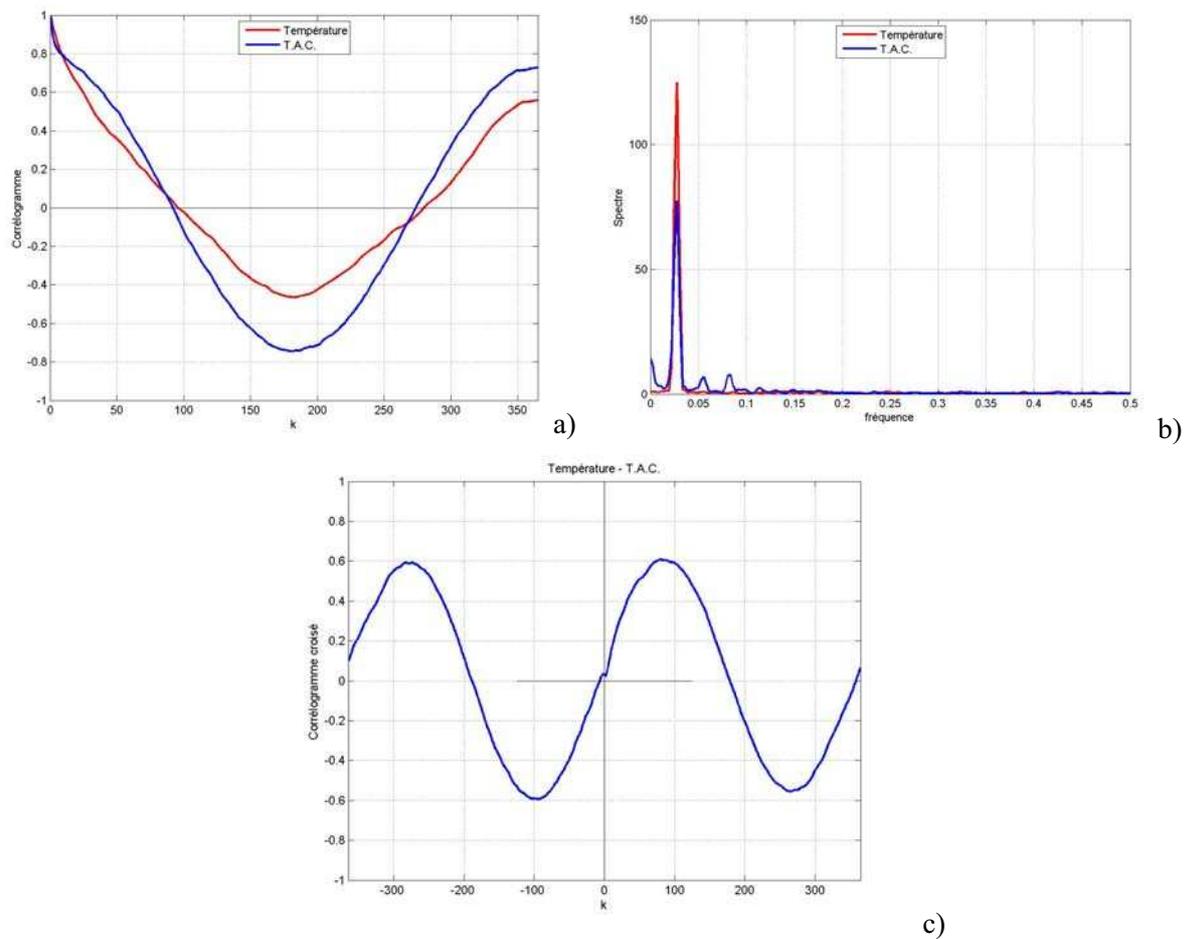


Figure 8 : Corrélogrammes a) et spectre b) de la température de l'air et du T.A.C. (alcalinité en méq/l), c) corrélogramme croisé température – T.A.C.

V. CONCLUSIONS

Le système karstique de Bange-L'Eau-Morte a été suivi pendant plus de 30 ans par Michel Lepiller. La masse et la diversité d'informations recueillies sur ce système permettent d'en analyser finement le fonctionnement hydrodynamique et géochimique. De par sa petite taille, son caractère nerveux et bien karstifié, le fonctionnement du système est bien ausculté par les différents signaux hydrologiques et géochimiques. Ces signaux révèlent assez bien les modalités d'infiltration et d'écoulements des eaux, leurs temps de séjour dans les différentes parties du système karstique.

Enfin, pour revenir à un sujet qui préoccupait fortement Michel Lepiller, la continuité des mesures pendant presque 30 ans a également permis de suivre la réponse du système au réchauffement de la température de l'air. En effet, l'analyse des relations à long terme entre la concentration de HCO_3^- et les variables climatiques indépendantes (pluie, température de l'air) montre que la température de l'air exerce un contrôle non négligeable sur la concentration de HCO_3^- et par conséquent sur l'intensité d'un des processus impliqués – la dissolution du carbonate - dans l'érosion des aires carbonatées (près de 50% de la variance de la concentration de HCO_3^- est expliquée par la variation de la température de l'air entre 1981

et 1995). Néanmoins, les relations mettant en jeu les quantités de chaleur apportées au système par convection et la concentration ou le débit massique de HCO_3^- sont moins étroites.

Le gradient de concentration de HCO_3^- en fonction de l'évolution climatique constatée entre 1981 et 1995 est de 0,08 meq/l / °C. Cette valeur est 8 fois plus faible que celle du gradient de concentration de HCO_3^- en fonction de l'altitude moyenne du bassin versant des systèmes karstiques mis en évidence dans les Bauges ou les Bornes (0,62 meq/l / °C). Cet écart est interprété comme traduisant l'inertie thermique des systèmes karstiques résultant de l'importance des volumes rocheux qui les constituent comparée à la faible valeur du volume d'eau qui les traverse au cours d'un cycle hydrologique.

Il n'en reste pas moins remarquable qu'une augmentation de la température moyenne de l'air de moins de 3 °C en quinze ans entraîne une variation sensible et quasi immédiate (déphasage de 2 à 3 mois) de près de 10% de la charge dissoute des eaux issues des formations carbonatées.

Références bibliographiques

- (1) **Bakalowicz, M.** 1979 - Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse de doctorat d'Etat, Université Paris VI, 269p.
- (2) **Boivent, B.** 1998 - Hydrodynamique et géochimie des eaux des systèmes hydrologiques karstiques du massif subalpin des Bauges (Savoie – Haute-Savoie – France). Rapport de maîtrise de Sciences de la Terre.
- (3) **Eraso,** 1985 - Methodo de prediccion de las direcciones principales de drenaje en el karst. KOBIE, Serie Ciencias Naturales, Bilbao, n° XV, 122 p.
- (4) **Lepiller, M.** 1976 - Résultats et interprétation de cinq opérations de traçage effectuées sur les systèmes karstiques du Semnoz et de la montagne de Bange –Bois de Prépoullain (Massif subalpin des Bauges, Savoie et Haute Savoie, France). 2e Colloq. Hydrol. en Pays Calcaires, Besançon, pp 251-262.
- (5) **Lepiller, M.,** 1979 - Le rôle de l'activité biologique dans l'acquisition de la charge dissoute des eaux d'aquifères carbonatés : Etude sur douze systèmes karstiques des Bauges et des Bornes (massifs subalpins septentrionaux, Alpes Françaises). Actes Coll. Int. « Migrations organo-minérales dans les sols tempérés », Nancy, 1979, 16 p.
- (6) **Lepiller, M.** 1980 - Contribution de l'hydrochimie à la connaissance du comportement hydrogéologique des massifs calcaires. Etude de quelques systèmes karstiques du massif du Semnoz et de la région d'Annecy (Savoie, Haute Savoie, France). Thèse, Univ. Grenoble, 488p.
- (7) **Lepiller, M.** 1982 - La capacité de stockage dans la zone non saturée des aquifères karstiques. Estimation et conséquences pour la localisation de la dissolution dans les systèmes. 3e Colloque d'hydrologie en Pays Calcaires, Besançon.
- (8) **Lepiller, M., Mondain, P.H., Cardin P.,** 1988 - Les recherches en hydrogéologie karstique menées depuis dix ans dans les massifs sub-alpins septentrionaux par le laboratoire d'hydrogéologie de l'université d'Orléans (France). Bulletin du CHYN, pp. 27-48.
- (9) **Lepiller M., Mondain P.-H., Cardin P.,** 1990 - Contribution à la connaissance du karst Urgonien des massifs subalpins des Bauges et des Bornes (Savoie, Haute-Savoie, France). 13ème Réunion des Sciences de la Terre, Grenoble, 2-4 avril 1990, p. 79. Soc. Géol. Fr. édit.
- (10) **Mangin, A.** 1970 - Contribution à l'étude d'aquifères karstiques à partir de l'analyse de courbes de décrues et de tarissement. Annales de Spéléologie, 25, 3, p. 581-609.
- (11) **Mangin, A.** 1971 - Étude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique. Ann. Spéléol., t. 26, fasc. 2, pp 283-329.

- (12) **Mangin, A.** 1975 - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstique. Thèse de Doctorat en Sciences Naturelles. Dijon, (Ann. Spéléol., 1974, 29, 3, p 283-332 ; Ann. Spéléol., 1974, 29, 4, p 495-601 ; Ann. Spéléol., 1975, 30, 1, p 21-24).
- (13) **Marsaud, B.** 1996 - Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Thèse, Univ. Paris XI Orsay.
- (14) **Mathevet, T.,** 2002 -Analyse du fonctionnement du système karstique de Bange-L'Eau-Morte (Bauges, Savoie & Haute-Savoie, France). Rapport de DEA HHGG, École Supérieure des Mines de Paris.
- (15) **Mathevet, T., Lepiller, M., Mangin, A.,** 2004 - Application of time-series analyses to the study of the hydrological functioning of an Alpine karstic system: the case of the Bange-L'Eau-Morte karstic system. Hydrology and Earth System Sciences 8 (6), pp. 1051-1064.
- (16) **Mondain, P.H.** 1991 - Hydrogéologie des systèmes karstiques de l'unité delphino-helvétique inférieure entre les vallées du Fier et du Borne (Massif des Bornes, Haute -Savoie, France). Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 561 p.
- (17) **Mudry, J.,** 1987. Les courbes flux chimique-débit et le fonctionnement des aquifères karstiques. J. Hydrol.,vol. 120 (1-4), pp. 283-294.
- (18) **Plagnes, V.** 1997. Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie des eaux. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 376p.