

Creugenat

Description du phénomène d'intermittence à l'estavelle du Creugenat (JU)

Beschreibung der intermittierenden Quelle des Wechselschlundes der Creugenat (JU)

Un précédent article de Stalactite (H. MORLO, 1999), établissant la liste des sources *intermittentes*¹ possibles en Suisse, conclut que le Creugenat n'en fait pas partie, mais correspond à une source temporaire... ordinaire. Une observation fortuite, confirmée ensuite par des mesures hydrologiques dès juin 1998, révèle que l'*estavelle*² du Creugenat entre dans la catégorie des sources intermittentes.

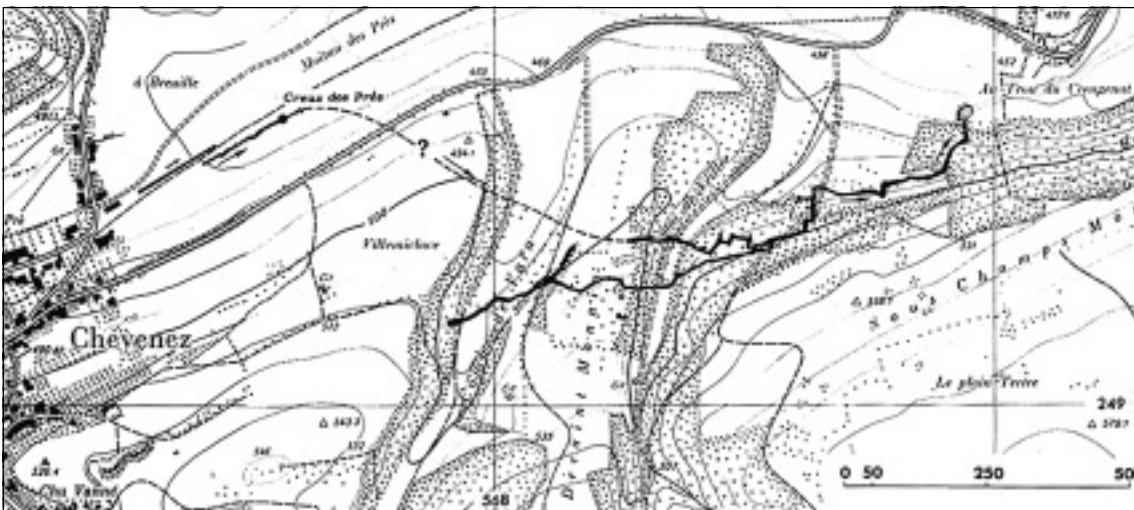
Situation et historique

L'estavelle du Creugenat représente une des manifestations karstiques les plus spectaculaires – et populaires – de la chaîne jurassienne. Ses crues ont marqué les esprits de la région (Creux aux *Djenatsches*, sorcières en patois jurassien (R. GIGON & R. WENGER, 1986)), et aiguisé la curiosité de nombreux spéléologues, chercheurs et scientifiques... Situé à proximité de Courtedoux, à quelques

In einem früheren Artikel in Stalactite (H. MORLO, 1999) wurde eine Liste möglicher *intermittierender*¹ Karstquellen in der Schweiz veröffentlicht. Es wurde angegeben, dass die Creugenat keine solche, sondern eine gewöhnliche temporäre Quelle ist. Eine zufällige Beobachtung, die seit Juni 1998 durch hydrologische Messungen bestätigt wurde, zeigt, dass der *Wechselschlund*² der Creugenat in die Gruppe der intermittierenden Karstquellen einzuordnen ist.

Lage und Geschichte

Der Wechselschlund der Creugenat gehört zu den spektakulärsten – und populärsten – Erscheinungen der Jura-Gebirgskette. Die Hochwasser haben seit jeher die Menschen in der Region beeindruckt ((Creux aux *Djenatsches* – Loch der *Djenatsches*, Hexen in der jurassischen Mundart (R. GIGON & R. WENGER, 1986)), und die Neugierde vieler Höhlenforscher, Forscher und Wissenschaft-



Situation de la partie explorée de l'Ajoulotte. D'après R. Gigon et R. Wenger, 1986. (Plan reproduit avec l'autorisation du géomètre cantonal du 21.10.2002)

► Marc Hessenauer,
MFR Géologie-
Géotechnique
► Pierre Xavier
Meury,
Géo & environ-
nement SARL

Übersetzung:
Marie und Jean-
Louis Regez



Photos: Marc Hessenhauer

Estavelle du Creugenat à l'étiage et en début de crue

Estavelle der Creugenat bei Niedrigwasser und beginnendem Hochwasser

kilomètres à l'ouest de Porrentruy, le Creugenat est une vaste doline de 15 m de profondeur qui se met en charge et alimente un déversoir occasionnel superficiel en période de hautes eaux. A l'étiage, le fond de l'entonnoir est occupé en permanence par un petit plan d'eau. Il donne accès à un siphon, point de départ de nombreuses tentatives d'explorations de l'Ajoulote, nom donné à la rivière souterraine qui draine les nombreuses vallées sèches de la Haute-Ajoie.

La découverte de l'Ajoulote a débuté dans les années 1930 et se poursuit encore aujourd'hui. Au cours de ces années, il a été fait appel alternativement à des scaphandriers, à des plongeurs autonomes puis à des batteries de pompes immergées, sans jamais dépasser le terminus distant de 1'300 m de l'entrée, atteint par les plongeurs à partir des années 1970.

Le Creugenat est en relation directe avec un autre trou émissif situé en amont, le Creux-des-Prés, tandis que leur exutoire commun se trouve en ville de Porrentruy, à la source de la Beuchire. Ces trois éléments constituent ce que l'on peut appeler la partie apparente de l'Ajoulote.

La branche connue de l'Ajoulote, entièrement ou partiellement noyée avec ses trois siphons, se développe en amont du Creugenat, sur près de 2'500 m de galeries

ler angespornt. Die Quelle befindet sich in der Nähe von Courtedoux, einige Kilometer westlich von Puntrut. Die Creugenat ist eine gewaltige Doline von 15 m Tiefe. Sie füllt sich und speist bei Hochwasser ein temporäres an der Oberfläche liegendes Sammelbecken. Bei minimalster Schüttung ist der Boden der Doline permanent mit einer kleinen Wasserfläche gefüllt. Es kann dann ein Siphon erreicht werden. Über diesen Siphon fanden zahlreiche Versuche, der Ajoulote zu erforschen, statt. Der Ajoulote ist das unterirdische Gewässer, das die zahlreichen Trockentäler der Haute-Ajoie entwässert.

Die Erforschung des Ajoulote hat in den 1930iger Jahren begonnen und findet auch heute noch statt. Während dieser Zeit wurden Taucher, autonome Taucher und Unterwasserpumpen eingesetzt, ohne dass der Endpunkt auf 1300m Distanz vom Eingang, der in den 1970iger Jahren von Tauchern erreicht wurde, überschritten wurde.

Die Creugenat steht auch in direkter Verbindung mit einer flussaufwärts gelegenen Quelle, der Creux-des-Prés, obwohl ihr gemeinsamer Abfluss, die Quelle Beuchire, sich in der Stadt Puntrut befindet. Diese drei Erscheinungen bilden den sichtbaren Teil des Ajoulote.

Der bekannte Ast des Ajoulote, voll oder teilweise unter Wasser und mit drei Siphonen, verläuft von der Creugenat flussaufwärts. Es handelt sich um etwa 2500

explorées, compte tenu de la zone topographiée au Creux-des-Prés (jonction non établie).

Contexte hydrogéologique

La rivière souterraine de l'Ajoulotte et son émissaire de la Beuchire à Porrentruy se développent dans un aquifère karstique régional comprenant les formations calcaires du Séquanien supérieur et du Kimméridgien. Cet aquifère est limité à la base par les formations essentiellement marneuses de la partie supérieure du Séquanien inférieur (marnes à Astartes) constituant l'aquiclude (terrains imperméables) local. Cet ensemble aquifère-aquiclude, parcouru par un réseau de failles et reposant en couches quasi horizontales, appartient au Jura tabulaire.

Le bassin d'alimentation de l'Ajoulotte, d'une superficie de 48 km², est limité au sud par les premières manifestations du Jura plissé, et au nord, par le bassin de la Milandrine dans la région de Bure.

La Beuchire, qui constitue le principal exutoire pérenne de la rivière souterraine de l'Ajoulotte, est la plus importante source karstique de l'Ajoie. Les débits d'étiage sont de l'ordre de 60-80 l/s et les débits de crue peuvent atteindre 2'900 l/s (débit moyen 800 l/s). Le trou émissif du Creugenat, distant de 4,25 km, représente le trop-plein de cette rivière souterraine. Cet exutoire de crue de l'Ajoulotte se met en charge à partir d'un débit de l'ordre de 1'450 l/s à la Beuchire, déborde et s'écoule alors dans son déversoir occasionnel jusque dans l'Allaine à Porrentruy³. A ce titre, l'estavelle du Creugenat peut donc être considérée comme une source temporaire, avec des débits de crue pouvant atteindre plus de 20 m³/s (V. KOHLER & AL., 2001).

La vitesse de transit dans le bassin versant, déterminée sur la base des nombreux essais de traçage, est de l'ordre de 20-50 m/h à l'étiage et 200-300 m/h en crue.

Stations de mesures de l'Ajoulotte

Le Creugenat et sa rivière souterraine se révèlent être des éléments essentiels du système hydrogéologique régional (M. MONBARON & J.-C. BOUVIER, 1996). Pour les besoins des études d'impact sur l'environnement (EIE) du projet d'autoroute A16 ou Transjurane, la région a été équipée d'un vaste réseau de stations automatiques d'observation (MFR GÉOLOGIE-GÉOTECHNIQUE SA, 1998). Des enregistreurs hydrométriques ont été installés provisoirement sur de nombreux points d'eau (acquisiteurs de type Madd = module d'acquisition de données).

Celui de la Beuchire fonctionne depuis 1989. Au puits émissif du Creugenat, par contre, une tentative d'installation a échoué après que la sonde de mesures ait été emportée dès la première crue importante. Il faudra attendre juin 1998, et un étiage prononcé, pour voir se réaliser une station capable d'enregistrer de manière continue les montées des eaux et les décrues dans l'estavelle. L'installation et la maintenance de ce dispositif de mesures, qui représentent déjà un exploit en soi, ont été rendues techniquement possible grâce au concours des spéléologues.

C'est durant le montage de la sonde hydrométrique que le phénomène d'intermittence du Creugenat a pu

Meter erforschte Gänge, wenn man die vermessene Zone im Creux-des-Prés berücksichtigt (die Verbindung wurde nicht hergestellt)

Hydrogeologische Umgebung

Der unterirdische Fluss Ajoulotte und sein Abfluss Beuchire in Puntrut liegen in einem regionalen Karstaquifer mit Schichten des oberen Sequanian und des Kimmeridgian. Die Wasserschicht ist gegen unten durch undurchlässige Mergel des unteren Sequanian begrenzt. Diese Zusammensetzung von Grundwasserkörper und undurchlässiger Schicht gehört zum Tafeljura.

Das Einzugsgebiet des Ajoulotte mit seiner 48 km² grossen Fläche reicht nach Süden zum Faltenjura und gegen Norden ans Flussbecken der Milandrine in der Region Bure.

Die Beuchire ist der Hauptabfluss des unterirdischen Ajoulotte und die wichtigste Karstquelle der Ajoie. Der kleinste Wasserfluss beträgt 60-80 l/s und kann bei Hochwasser bis 2'900 l/s (mittlerer Wasserfluss 800 l/s) erreichen. Das wasserführende Loch der Creugenat bildet in einer Distanz von 4.25km den Überfluss des unterirdischen Flusses. Ab einem Wasserfluss von 1'450 l/s in der Beuchire füllt sich die Doline, läuft über und das Wasser fließt in das temporäre Sammelbecken bis in die Allaine in Puntrut³. So betrachtet kann der Wechsellund der Creugenat als temporäre Quelle angesehen werden (mit Hochwasserflüssen, die mehr als 20 m³/s erreichen können (V. KOHLER & AL., 2001)).

Die durch zahlreiche Färbungsversuche bestimmte Transitgeschwindigkeit liegt bei Niedrigwasser um etwa 20-50 m/h und bei Hochwasser bei 200-300 m/h.

Messstationen des Ajoulotte

Die Creugenat und ihr unterirdischer Fluss zeigen sich als Hauptelemente des regionalen hydrogeologischen Systems (M. MONBARON & J.-C. BOUVIER, 1996). Für die Umweltverträglichkeitsuntersuchungen (EIE) der A16 oder transjurassischen Autobahn wurde in der Region ein Netz mit automatischen Beobachtungsstationen eingerichtet (MFR GÉOLOGIE-GÉOTECHNIQUE SA, 1998).



Photo: FX Meury

Installation de la sonde Madd et d'une échelle limnimétrique

Installation der Sonde Madd und einer Wasserpegel Skala

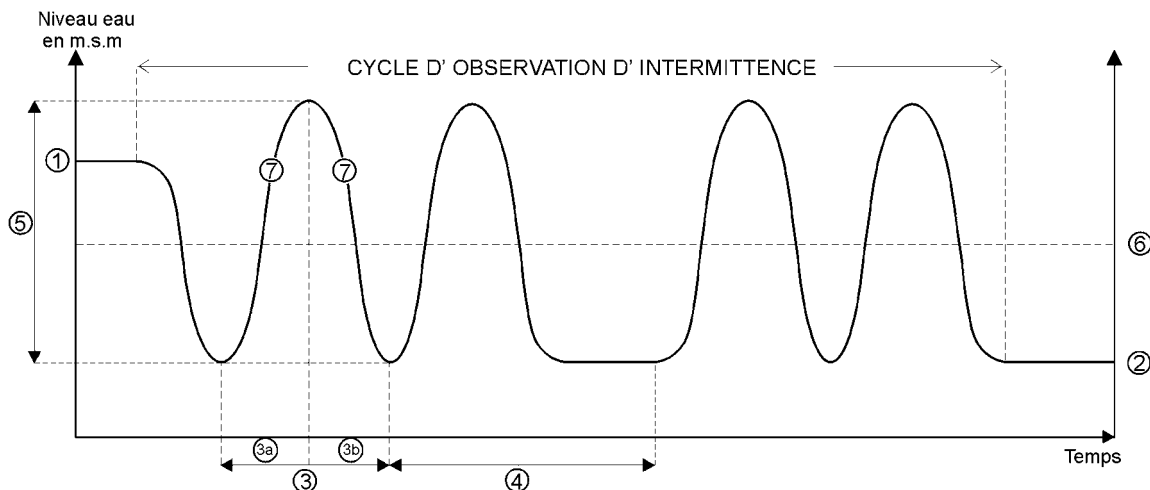


Figure 1 : Paramètres mesurés sur un cycle d'observation d'intermittence

- ① = Niveau d'eau avant intermittence
- ② = Niveau après intermittence
- ③ = Flux : temps pendant lequel le niveau d'eau monte puis descend. On peut distinguer le flux en début et en fin d'intermittence si leurs variations sont significatives ou le flux moyen dans le cas contraire
- ④ = Période : durée séparant les débuts de deux flux successifs. La période est égale au flux s'il n'y a pas d'interruption de l'intermittence
- ⑤ = Amplitude : sur la durée du cycle d'observation de l'intermittence, on peut calculer une amplitude minimum, moyenne et maximum autour d'un niveau moyen ⑥
- ⑥ = Niveau moyen d'eau lors du cycle d'intermittence
- ⑦ = Forme de l'intermittence : elle est caractérisée par la comparaison du flux de montée ③a avec le flux de descente ③b

Abbildung 1 : An einem periodischen Schüttungszyklus gemessene Parameter

- ① = Wasserpegel vor der periodischen Schüttung
- ② = Wasserpegel nach der periodischen Schüttung
- ③ = Flut : Zeitdauer während der Wasserpegel steigt und dann sinkt. Man unterscheidet die Fluten am Anfang und am Ende eines Zyklus' insofern sie sich signifikant unterscheiden. Sonst wird die mittlere Flut angegeben.
- ④ = Periode : Zeitspanne, die zwei Fluten trennt. Die Periode ist gleich der Flut, wenn die periodische Schüttung ununterbrochen abläuft.
- ⑤ = Amplitude : es kann die kleinste, die grösste und eine mittlere Amplitude beidseitig des mittleren Wasserpegels errechnet werden ⑥
- ⑥ = Mittlerer Wasserpegel während eines Zyklus'
- ⑦ = Form des Phänomens : sie wird durch den Vergleich des Flutanstiegs ③a und des Flutsinkens ③b beschrieben.

être observé pour la première fois⁴. Il sera confirmé ensuite par les enregistrements continus du niveau d'eau au fond de l'estavelle, grâce à l'enregistreur Madd (chroniques limnimétriques).

Méthodologie

Entre 1998 et 2002, chaque phénomène d'intermittence, enregistré sur les chroniques limnimétriques au Creugenat, a été décrit et analysé sur la base d'un certain nombre de paramètres (Figure 1). Ces derniers, pour l'essentiel issus de la nomenclature descriptive utilisée dans l'inventaire spéléologique mondial des sources intermittentes (J. CHOPY, 1994), constitueront un outil de comparaison des différents cycles d'intermittence au Creugenat. En outre, ils permettront également, à l'avenir, de comparer le site du Creugenat à d'autres sites présentant le même phénomène.

Descriptions et mesures des cycles d'intermittences

Sur les chroniques limnimétriques au Creugenat, les cycles d'intermittence apparaissent comme de petites oscillations du niveau de l'eau, bien limitées dans le temps, et inscrites sporadiquement dans les variations globales du niveau du Creugenat (Figure 2).

Hydrométrische Registriergeräte wurden provisorisch an vielen Wasserpunkten angebracht (Datenerfassung vom Typ Madd (= module d'acquisition de données), d.h. Datenerfassungsmodul).

Das Gerät bei der Beuchire ist seit 1989 im Betrieb. Dagegen scheiterte bei der Creugenat ein Einrichtungsversuch, nachdem das Hochwasser die Messsonde weggerissen hatte. Es musste bis 1998 und auf ausgeprägtes Tiefwasser gewartet werden, damit eine Messstation eingerichtet werden konnte, die das Steigen und Sinken des Wasserregistrieren sollte. Die Installation und Wartung dieser Messvorrichtung, eine enorme Leistung, wurden technisch durch die Mithilfe der Höhlenforscher ermöglicht.

Während des Einbaus der hydrométrischen Sonde konnte zum erstenmal das Phänomen der periodischen Schüttung beobachtet werden⁴. Dieser Befund wurde in der Folge durch kontinuierliche Aufnahmen des Wasserpegels am Boden des Wechselschlunds dank des Aufnahmeapparates Madd bestätigt (Aufzeichnungen des Pegelstandes).

Methodik

Jedes Auftreten periodischer Schüttungen zwischen 1998 und 2002 wurde an Hand bestimmter Parameter beschrieben und analysiert (Abbildung 1). Diese Parame-

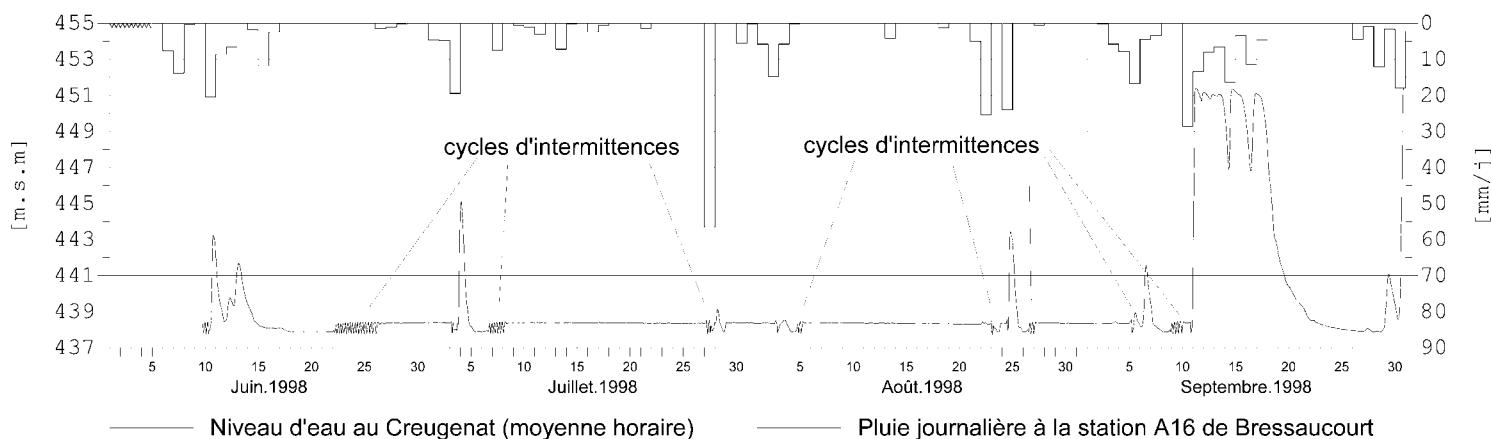


Figure 2 : Chronique limnimétrique au Creugenat en 1998

Les mesures des différents paramètres descriptifs sur chaque phénomène entre 1998 et 2002 au Creugenat ont permis de distinguer trois types d'intermittence : les intermittences typiques ou non perturbées, les intermittences perturbées et les intermittences atypiques.

Les intermittences non perturbées ou typiques

Au cours d'un cycle, les intermittences typiques présentent des variations périodiques du niveau d'eau, non perturbées par un épisode pluvieux. En outre, l'arrêt du cycle d'intermittence ou l'interruption de l'intermittence pendant le cycle ne sont pas consécutifs à des précipitations.

Entre 1998 et 2002, 8 cycles typiques sont observables. Leur durée respective est variable, d'environ 1 jour à un maximum de 10 jours.

En 1998, les paramètres des trois cycles typiques apparaissent dans le tableau ci-après.

En 2001, le seul cycle d'intermittences typique est présenté dans la figure 3. Les paramètres descriptifs mesurés sont particulièrement semblables à ceux des cycles de 1998.

Les intermittences perturbées

Un cycle d'intermittences est perturbé lorsque des précipitations, sur le bassin d'alimentation de l'Ajoulote, provoquent une réaction notable du niveau d'eau. Ainsi, un épisode pluvieux peut induire :

ter stammen aus der Beschreibungsnomenklatur, die im weltweiten speleologischen Inventar für intermittierende Quellen verwendet wird (J. CHOPY, 1994). Mit diesen Parameter können die verschiedene Erscheinungsformendes Phänomens verglichen werden. Ferner dienen sie dem Vergleich von Creugenat mit anderen Objekten, bei denen das selbe Phänomen beobachtet wird.

Beschreibung und Messung der periodischen Schüttungszyklen

Auf den Wasserpegelaufzeichnungen in der Creugenat sehen die periodischen Schüttungen wie kleine Schwankungen aus. Sie sind in der Dauer beschränkt und werden sporadisch in den globalen Schwankungen des Wasserpegels in der Creugenat aufgezeichnet (Abbildung 2).

Die Messung der verschiedenen Beschreibungsparameter des Phänomens zwischen 1998 und 2002 in der Creugenat haben drei verschiedene Typen dokumentiert : die typischen oder nicht gestörten periodischen Schüttungen, die gestörten periodischen Schüttungen und die atypischen periodischen Schüttungen.

Die typischen oder nicht gestörten periodischen Schüttungen

Während eines Zyklus zeigen die typischen periodischen Schüttungen periodische Veränderungen des Wasserpegels, die durch keine Regenphase gestört werden. Ferner sind das Anhalten oder der Unterbruch des Zyklus' nicht die Folge von Regenfällen.

Abbildung 2 : Wasser-spiegelzeichnung in der Creugenat im Jahr 1998

Période d'observation du cycle d'intermittences		22.06.98 – 00 :00 26.06.98 – 23 :00	06.07.98 – 15 :30 08.07.98 – 14 :15	08.09.98 – 17 :30 10.09.98 – 06 :30
Niveau d'eau avant	[m.s.m]	437.88	437.89	437.90
Niveau d'eau après	[m.s.m]	438.36	438.39	438.38
Flux début du cycle	[heure]	4.2	4.9	4
Flux fin du cycle	[heure]	9.5	8	8
Période	[heure]	Idem flux	Idem flux	Idem flux
Amplitude min./moy./max.	[cm]	50 / 60.6 / 68	55 / 60.7 / 68	65 / 68 / 71
Niveau d'eau moyen	[m.s.m]	438.10	438.14	438.13
Forme		Sinusoïde	Sinusoïde	Sinusoïde
Tps montée=f(tps descente)		Tps montée=1.56*tps descente	Tps montée=1.54*tps descente	Tpsmontée=1.37*tps descente

Tableau 1 : Paramètres mesurés sur les cycles d'intermittences typiques au Creugenat en 1998

Tabelle 1 : Bei typischen Zyklen 1998 in der Creugenat gemessene Parameter

Beobachtungsdaten		22.06.98 – 00 :00 26.06.98 – 23 :00	06.07.98 – 15 :30 08.07.98 – 14 :15	08.09.98 – 17 :30 10.09.98 – 06 :30
Wasserpegel vorher	[M.ü.M]	437.88	437.89	437.90
Wasserpegel nachher	[M.ü.M]	438.36	438.39	438.38
Flut am Anfang	[Stunden]	4.2	4.9	4
Flut am Ende	[Stunden]	9.5	8	8
Periode	[Stunden]	wie Flut	wie Flut	wie Flut
Amplitude min./mit./max.	[cm]	50 / 60.6 / 68	55 / 60.7 / 68	65 / 68 / 71
Mittlerer Wasserpegel	[M.ü.M]	438.10	438.14	438.13
Form		Sinuskurve	Sinuskurve	Sinuskurve
Tps Anstieg=f(tps Sinken)		Tps Anstieg =1.56*tps Sinken	Tps Anstieg =1.54*tps Sinken	Tps Anstieg =1.37*tps Sinken

- une interruption momentanée du phénomène d'intermittence par formation d'un pic « parasite » ou par une stagnation du niveau d'eau;
- un arrêt du phénomène d'intermittences par une montée du niveau d'eau plus ou moins conséquente.

Entre 1998 et 2002, 8 cycles perturbés sont comptabilisés. Leur durée respective est variable, de 13 heures à un maximum de 8 jours. Les paramètres descriptifs des intermittences montrent de grandes similitudes avec ceux mesurés pour les cycles non perturbés : la forme sinusoïdale, l'amplitude moyenne d'environ 68 cm, le flux de début de cycle de 4 à 5 heures, le flux de fin de cycle d'environ 7 heures et le temps de montée systématiquement supérieur au temps de descente de flux (environ un facteur 2).

La figure 4 fait apparaître un cycle perturbé en 2001. On remarquera notamment le temps qui sépare l'épisode pluvieux et la perturbation de l'intermittence : il est de quelques heures, dans le cas présent de 4 à 13 heures environ.

Les intermittences atypiques

Les intermittences atypiques sont caractérisées par des amplitudes particulièrement faibles. Deux cycles de ce type ont été observés, l'un en décembre 2001 (durée 1.5 jour) et l'autre en juin 2002 (durée 1 jour). Dans les deux cas, l'amplitude moyenne est d'environ 10 cm. La forme sinusoïdale rappelle celle des intermittences décrites plus haut. Par contre, le temps de montée est soit égal, soit sensiblement inférieur au temps de des-

Zwischen 1998 und 2002 wurden 8 typische Zyklen beobachtet. Ihre Dauer schwankte zwischen 1 Tag und 10 Tagen.

Die Parameter der 3 typischen Zyklen im Jahr 1998 finden sich in folgender Tabelle 1.

Der einzige im Jahr 2001 beobachtete typische Zyklus ist in der Abbildung 3 dargestellt. Die gemessenen Parameter sind denjenigen aus den Zyklen im Jahr 1998 ähnlich.

Die gestörten periodischen Schüttungen

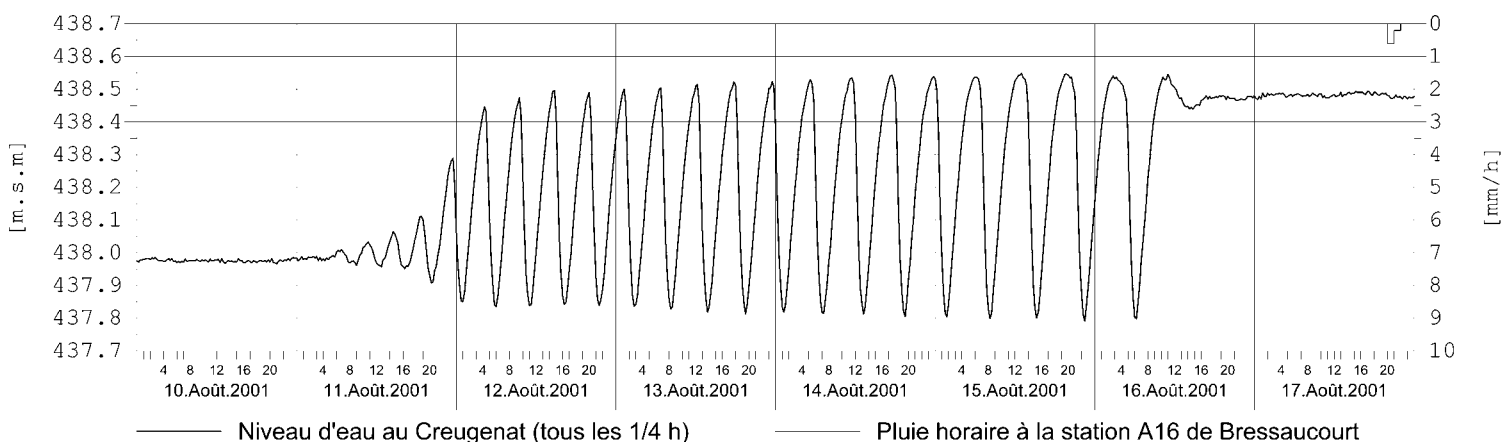
Ein Zyklus wird gestört, wenn Niederschläge im Einzugsgebiet Ajoulote eine bedeutende Veränderung des Wasserpegels verursachen. So kann eine Regenperiode folgendes erzeugen:

- einen vorübergehenden Unterbruch des Phänomens durch die Bildung einer « fremden » Spitze oder durch ein Anhalten der Wasserpegels;
- ein Anhalten der Phänomens durch eine mehr oder weniger markante Erhöhung des Wasserpegels.

Zwischen 1998 und 2002 wurden 8 gestörte Zyklen beobachtet. Ihre jeweilige Dauer schwankte zwischen 13 Stunden und 8 Tagen im Maximum. Die Parameter sind denjenigen aus den ungestörten Zyklen sehr ähnlich : die Sinuskurvenform, die mittlere Amplitude von 68cm, die Steigung am Zyklusanfang zwischen 4 und 5 Stunden, die Steigung am Zyklusende circa 7 Stunden, die Steigdauer ist systematisch grösser als die Sinkdauer (circa ein Faktor 2).

Figure 3 : Détail d'un cycle d'intermittences typique au Creugenat en 2001

Abbildung 3 : Einzelheiten eines typischen Zyklus in der Creugenat im Jahr 2001



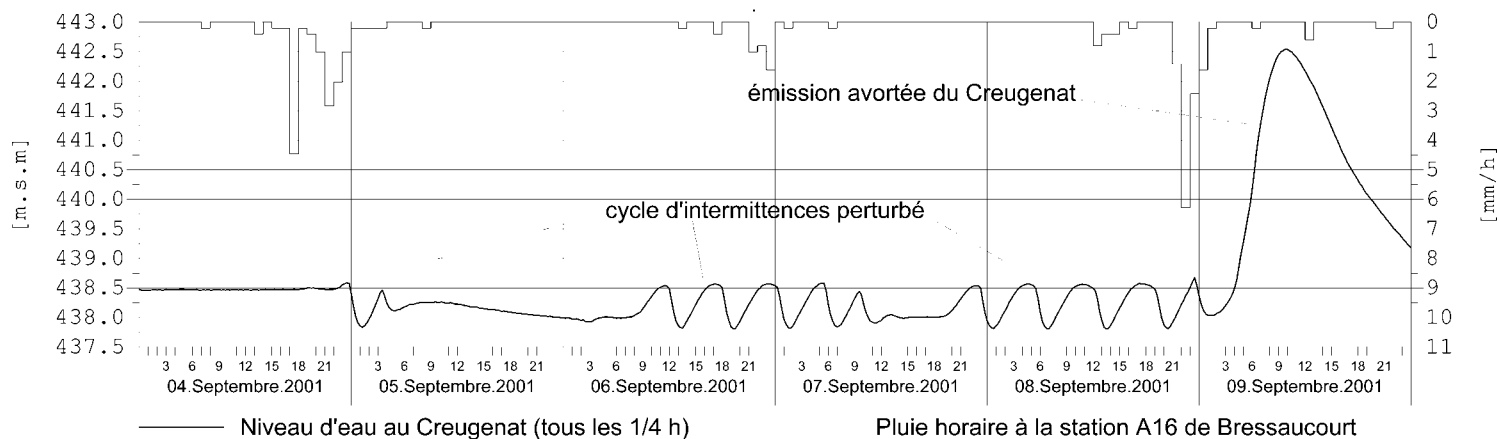


Figure 4 : Cycle d'intermittences perturbé au Creugenat en 2001

Abbildung 4 : Gestörter Zyklus in der Creugenat im Jahr 2001

cente de flux. Le flux moyen est, quant à lui, de l'ordre de 4 heures.

Caracterisation du phénomène d'intermittence au creugenat

Le calcul systématique de chaque paramètre descriptif permet de dégager des caractères communs à tous les cycles d'intermittences observés entre 1998 et 2002 au Creugenat. Avec ces mesures, il est envisageable d'élaborer un modèle descriptif, sorte de « carte d'identité » du phénomène d'intermittences à l'estavelle du Creugenat.

Ainsi, on observe de manière générale que :

- 1- Le phénomène d'intermittences se développe systématiquement lorsque le niveau du Creugenat est au plus bas. Cependant, il est remarquable de constater que toutes les périodes de basses eaux au Creugenat ne font pas apparaître systématiquement le phénomène d'intermittences.
- 2- La durée du cycle d'intermittences est très variable : de moins de 1 jour à 10 jours.
- 3- Les niveaux d'eau avant et après le cycle d'intermittences sont presque toujours semblables, respectivement 437.9 et 438.4 m.s.m.
- 4- La variation des flux au cours d'un cycle d'observation d'intermittences montre presque systématiquement une corrélation mathématique positive marquée par l'augmentation significative du flux : de 4 heures à 8 heures avec un pseudo palier en milieu de cycle.
- 5- La forme sinusoïdale de l'intermittence n'est pas parfaite dans la mesure où la durée du flux de montée est systématiquement supérieure au flux de descente (facteur de 1.5 à 2). Il s'agit là d'un phénomène inverse à une courbe de crue-décruie classique pour une source karstique.
- 6- L'amplitude moyenne des variations est très comparable d'un cycle à l'autre, de l'ordre de 66 cm. Durant un même cycle, les variations d'amplitude ont tendance à suivre une corrélation mathématique marquée par une augmentation de l'amplitude en début de cycle, puis une stabilisation puis éventuellement une décroissance. Pendant la période de suivi (1998-2002), cette amplitude a sensiblement augmenté.

Abbildung 4 zeigt einen gestörten Zyklus aus dem Jahr 2001. Man achte auf die Zeit, die zwischen dem Regenfall und der Störung verstreicht : sie beträgt einige Stunden, im genannten Fall liegt sie zwischen circa 4 und 13 Stunden.

Die atypischen periodischen Schüttungen

Die atypischen periodischen Schüttungen sind durch besonders kleine Amplituden gekennzeichnet. Es wurden zwei solche Zyklen beobachtet, einer im Dezember 2001 (Dauer 1.5 Tage) und der andere im Juni 2002 (Dauer 1 Tag). In beiden Fällen beträgt die mittlere Amplitude circa 10 cm. Die Sinuskurvenform erinnert an die oben beschriebenen Zyklen. Hingegen ist die Anstiegsdauer jeweils entweder gleich lang oder länger als die Sinkdauer. Die mittlere Flut dauert circa 4 Stunden.

Beschreibung des Phänomens in der creugenat

Die systematische Berechnung von jedem Beschreibungsparameter ist die Grundlage für den Vergleich aller beobachteten periodischen Schüttungen in der Creugenat zwischen 1998 und 2002. Es können damit die gemeinsamen Eigenheiten ermittelt werden. Mit diesen Messungen kann ein beschreibendes Model, eine Art « Identitätskarte », für das Phänomen im Wechselschlund der Creugenat ausgearbeitet werden.

So wird folgendes beobachtet :

1. Das Phänomen tritt systematisch bei tiefsten Wasserpegeln auf. Allerdings muss bemerkt werden, dass Niedrigwasser nicht unbedingt zum Phänomen führen.
2. Die Zyklusdauer ist sehr unterschiedlich : weniger als 1 Tag bis über 10 Tage.
3. Die Wasserpegel vor und nach einem Zyklus sind fast immer gleich, jeweils 437.9 und 438.4 m.ü.M.
4. Die Veränderung der Fluten während eines Zyklus zeigt eine Zunahme im Laufe der Zeit : sie steigt von 4 Stunden auf 8 Stunden mit einer horizontalen Pause in der Mitte des Zyklus.
5. Die Sinuskurvenform der Wasserpegel ist nicht perfekt, weil die Anstiegsdauer systematisch länger als die Sinkdauer ist (mit einem Faktor 1.5 bis 2). Es handelt sich hier um das Gegenteil von Anstieg und Sinken bei einer klassischen Karstquelle.

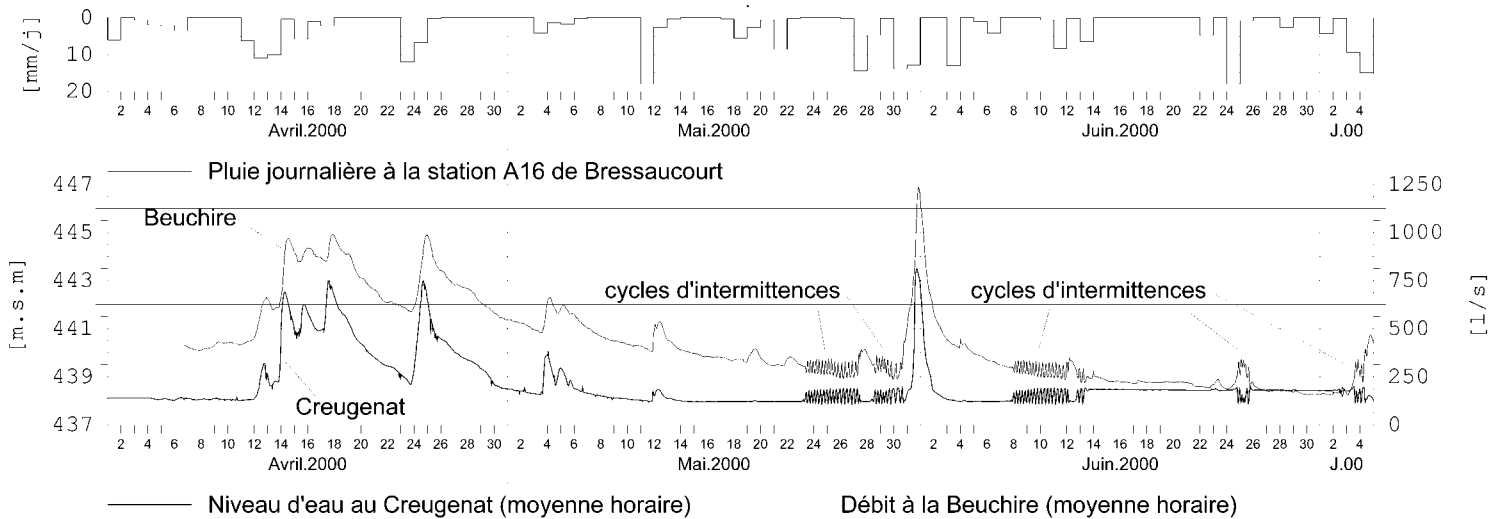


Figure 5 : Chroniques de débit à la Beuchire et limnimétrie au Creugenat en 2000

Abbildung 5 : Wasserfluss bei der Beuchire und Wasserpegel in der Creugenat im Jahr 2000

7- Les phénomènes d'intermittence n'ont aucune répercussion sur les mesures physico-chimiques (conductivité et température)

6. Die mittlere Amplitude der Fluten ändert sich von einem Zyklus zum nächsten kaum. Sie beträgt ungefähr 66cm. Innerhalb eines Zyklus nimmt sie am Anfang zu, stabilisiert sich und nimmt eventuell wieder ab. Während der Erfassungszeit (1998-2002) hat diese Amplitude spürbar zugenommen.

7. Die periodischen Schüttungen haben keinen Einfluss auf die physikalisch-chemischen Werte (Leitfähigkeit und Temperatur)

Relations estavelle du Creugenat – source de la Beuchire a Porrentruy

A Porrentruy, la source karstique pérenne de la Beuchire présente également les mêmes phénomènes d'intermittences. Des comparaisons sont donc possibles entre les deux points d'eau (Figure 5).

Le phénomène d'intermittences a la source de la Beuchire

De la même manière que pour le Creugenat, les paramètres descriptifs des intermittences ont été calculés sur 2 cycles d'observation (1998 et 2001). L'observation des chroniques de débit de 1990 à 1998 permet, en outre, de compléter le modèle descriptif d'intermittences à la Beuchire.

Il en ressort que :

- 1- Le phénomène d'intermittences à la Beuchire se développe presque uniquement en période de décrue (fin décrue – début tarissement), indépendamment des saisons.
- 2- La durée d'un cycle est identique à celle du Creugenat.
- 3- Les débits en début et en fin de cycle ne sont pas reproductibles d'un cycle à l'autre. Le suivi du débit à la Beuchire depuis 1990 permet de montrer que les débits auxquels se déclenche et s'arrête le phénomène sont, contrairement au phénomène observé au Creugenat, très variables d'une année à l'autre (respectivement de 615 à 250 l/s d'une part et 410 à 150 l/s d'autre part). Cette observation pourrait être mise en relation avec la pluviométrie annuelle (une année sèche occasionnerait des intermittences à des débits plus bas).
- 4- De la même manière qu'au Creugenat, la variation du flux est croissante au cours d'un cycle (3 à 10 h).
- 5- La forme sinusoïdale peut s'apparenter, a priori, à une courbe crue-décrue.

Beziehung Wechschlund der Creugenat – Quelle der Beuchire in Puntrut

In Puntrut zeigt die Dauerkarstquelle der Beuchire die selben periodischen Schüttungen. Beide Quellen können verglichen werden. (Abbildung 5).

Das Phänomen periodischen Schüttungen in der quelle Beuchire

Wie bei der Creugenat wurden die Beschreibungsparameter für zwei Beobachtungszyklen (1998 und 2001) berechnet. Die Beobachtung der registrierten Wasserflussdaten von 1990 bis 1998 erlaubt es dazu, das Model für die Beschreibung der periodischen Schüttungen in der Beuchire zu ergänzen. Es stellt sich folgendes heraus:

1. Die periodischen Schüttungen bei der Beuchire ereignen sich nur bei sinkendem Wasserpegel (Ende des Sinkens – Tiefwasser) und sind unabhängig von der Jahreszeit.
2. Die Dauer eines Zyklus ist derjenige in der Creugenat identisch.
3. Die Wasserflussmengen am Anfang und am Ende eines Zyklus sind von einem Zyklus zum Anderen nicht reproduzierbar. Die Beobachtung des Wasserflusses bei der Beuchire seit 1990 zeigt die Wassermengen bei welchen das Phänomen ausgelöst wird. Im Gegensatz zur Creugenat sind sie von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlich (jeweils 615 bis 250 l/s einerseits und 410 bis 150 l/s andererseits). Diese Beobachtung könnte in Beziehung zu der jährlichen gesetzt werden (ein trockenes Jahr könnte das Phänomen bei tieferem Wasserpegel aufweisen).

- 6- L'amplitude moyenne des variations de débit à la Beuchire semble être de l'ordre de 115 l/s.
- 7- Les phénomènes d'intermittence à la Beuchire n'ont aucune répercussion sur les mesures physico-chimiques (conductivité et température).

8.2 Déphasage du phénomène d'intermittences entre les 2 points d'eau

Le calcul du déphasage du phénomène d'intermittences entre les 2 points d'eau a été réalisé sur 2 cycles d'observation non perturbés (1998 et 2001).

Sans entrer dans les détails, il s'avère que les phénomènes d'intermittences à la source de la Beuchire et à l'estavelle du Creugenat se produisent de manière identique avec un déphasage de l'ordre de 3 à 4 heures ; le Creugenat, en amont du système hydrogéologique, est toujours le premier à régir.

9. Conclusions

Dans cet article, nous nous sommes essentiellement attachés à la description du phénomène d'intermittences, observé de manière fortuite lors de l'installation, en 1998, de la sonde de mesures automatiques dans le plan d'eau inférieur de l'estavelle du Creugenat.

A partir du calcul de différents paramètres propres aux intermittences, il est possible de « modéliser » ce phénomène hydrogéologique particulièrement remarquable et peu décrit de par le monde, faute d'observations suffisamment documentées.

Les chroniques de limnimétrie en continu au Creugenat représentent donc une source de données fondamentales pour la description du phénomène. Il en est de même pour la source de la Beuchire à Porrentruy, suivie en continu depuis 1990, qui présente, avec un déphasage de 3 à 4 heures, les mêmes cycles d'intermittences que le Creugenat. Ce double phénomène d'intermittence accroît d'autant plus les liens hydrauliques qui existent entre ces deux points d'eau issus du même système hydrogéologique.

Les mécanismes à l'origine de ces phénomènes ont été abordés dans divers ouvrages (J. CHOPY, 1994 ; H. MORLO, 1999). Leur principe est basé sur un modèle faisant intervenir des siphons et trop-plein (modèle de Mangin), auquel pourraient appartenir l'estavelle du Creugenat et la source de la Beuchire. De tels modèles ont déjà été reproduits en laboratoire avec des résultats fonctionnels et représentatifs du phénomène naturel.

La poursuite des recherches sur ce sujet et des mesures hydrologiques en continu permettra de définir plus précisément le mécanisme d'intermittence, sa réalité hydrogéologique et sa pérennité (exploration spéléologique, modélisation mathématique, simulation hydraulique,...). Ces recherches aboutiront peut-être à une meilleure connaissance du réseau encore inexploré de l'Ajoulotte entre le Creugenat et la Beuchire.

Remerciements

Les auteurs remercient vivement le Département de l'Environnement et de l'Équipement du Canton du Jura, représenté par le Service des Ponts et Chaussées, M. J.-Ph. Chollet, Ingénieur cantonal, ainsi que ses collaborateurs.

4. Wie bei der Creugenat nimmt die Flut während eines Zyklus zu (3 bis 10 h).
5. Grundsätzlich gleicht die Sinuskurvenform dem Anstieg und Sinken eines Hochwassers.
6. Die mittlere Amplitude der Schwankungen der Wassermengen ist circa 115 l/s
7. Die periodischen Schüttungen bei der Beuchire haben keinen Einfluss auf die physikalisch-chemischen Werte (Leitfähigkeit und Temperatur)

Zeitverschiebung der periodischen Schüttungen zwischen den beiden Quellen

Die Berechnung der Zeitverschiebung des Phänomens zwischen den beiden Quellen wurde bei zwei ungestörten Zyklen (1998 et 2001) durchgeführt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die periodischen Schüttungen bei der Quelle der Beuchire und dem Wechselschlund der Creugenat mit einer Verzögerung von 3 bis 4 Stunden identisch verlaufen. Die Creugenat, die hydrologisch flussaufwärts liegt, reagiert zuerst.

9. Schlussfolgerungen

In diesem Artikel haben wir das Phänomen der periodischen Schüttungen beschrieben. Es wurde zufällig bei der Einrichtung der automatischen Messsonde im unteren Wasserbecken der Creugenat im Jahr 1998 beobachtet.

Auf der Basis der verschiedenen errechneten Beschreibungsparameter ist es möglich, dieses bemerkenswerte und wegen karger Messgrundlagen in der Welt wenig beschriebene hydrogeologische Phänomen zu «modellieren».

Folglich bilden die in der Creugenat aufgezeichneten Wasserpegeldaten eine wichtige Grundlage für die Beschreibung des Phänomens. Dies gilt auch für die Quelle der Beuchire in Puntrut, in welcher Daten seit 1990 erfasst werden und welche dieselben Zyklen wie die Creugenat mit einer Verzögerung von 3 bis 4 Stunden aufweist. Dieses zweifache Phänomen erhöht die hydraulischen Beziehungsmerkmale zwischen den beiden Quellen, die zum selben hydrogeologischen System gehören.

Die Mechanismen, die diese Phänomene verursachen, wurden in verschiedenen Arbeiten untersucht (J. CHOPY, 1994 ; H. MORLO, 1999). Das Prinzip ist ein Modell mit Siphons und Überläufen (Modell von Mangin). Der Wechselschlund der Creugenat und die Quelle der Beuchire könnten einem solchen Modell entsprechen. Solche Modelle wurden bereits im Labor gebaut und erreichten Ergebnisse, die dem aktuellen Verhalten entsprechen.

Die weitere Forschung in diesem Gebiet und ununterbrochene hydrologische Messungen bilden die Grundlage zur präziseren Beschreibung der periodischen Schüttungen, deren Hydrogeologie und Dauerhaftigkeit (Höhlenforschung, mathematische Modellbildung, hydraulische Simulation...). Diese Untersuchungen werden vielleicht eine bessere Kenntnis des unerforschten Teils des Systems des Ajoulotte zwischen der Creugenat und der Beuchire ermöglichen.

Le suivi des débits à la Beuchire ainsi que de la limnimétrie au Creugenat font partie d'un réseau de suivi et de mesures hydrologiques établi dans le cadre de l'Etude d'Impact sur l'Environnement (EIE) de l'A16, sections 1 à 3. ■

Danksagung

Die Autoren danken dem Umwelt- und Baudepartement des Kanton Jura, durch das Amt der Strassen und Brücken vertreten, H. J.-Ph. Chollet, Kantonsingenieur und seinen Mitarbeitern. Die Erfassung der Wasserflüsse bei der Beuchire und der Wasserpegel in der Creugenat sind Bestandteil eines hydrologischen Messnetzes, das für die Umweltverträglichkeitsstudien der Autobahn A16, Abschnitte 1 bis 3, errichtet wurde.

Danksagung des Übersetzers

Urs Eichenberger sei für seine technische Hilfe bei der deutschen Übersetzung gedankt. ■

Bibliographie

- CHOPY, J. (1994) : *Les sources intermittentes. Inventaire mondial*. Mémoire du Spéléo-Club de Paris n°19. Club Alpin Français
- GIGON, R. & WENGER, R. (1986) : *Inventaire spéléologique de la Suisse. Tome II : Canton du Jura*. Porrentruy
- GREILLAT, P.-A (1992) : *Aquifères karstiques et poreux de l'Ajoie (Jura, Suisse). Eléments pour la carte hydrogéologique au 1 :25'000. Volume 1 et 2*. Thèse, Université de Neuchâtel
- JEANBLANC, A & SCHNEIDER, G. (1981) : *Etude géologique et hydrogéologique du Risoux – Mont-d'Or*. Thèse, Faculté des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté
- KOHLER, V., FLURY, F., GROBET, D. & HESSENAUER, M. (2001) : *Projet de viaducs A16 à proximité de l'estavelle du Creugenat et de la rivière souterraine l'Ajoulotte : caractérisation hydrogéologique et impacts*. Bulletin de Géologie appliquée 6/2, Décembre 2001

- MFR Géologie-Géotechnique SA (1998) : *A16 section 2. EIE sur les eaux souterraines. Projet définitif. Rapport d'impact*. Service des Ponts et Chaussées Delémont. Rapport inédit
- MONBARON, M. & BOUVIER, J.-C. (1996) : *L'estavelle du Creugenat et le fonctionnement du système karstique de la Haute-Ajoie (JU), état des lieux*. Actes du colloque SSGM-AFK, Rapports de Recherche, Institut de Géographie de Fribourg, vol. 8, 109-120
- MONBARON, M. & BOUVIER, J.-C. (1999) : *L'estavelle du Creugenat (Canton du Jura, Suisse) : chroniques des crues et dispositif moderne d'observation*. Colloque européen « Karst 99 ». Etudes géographie physique. Suppl. n°XXVIII. CAGEP, Université de Provence
- MORLO, H. (1999) : *Les sources intermittentes et leur interprétation à travers les âges*. Stalactite 49, 1, 1999. p.15-34

¹ sources dont le débit varie - à certains moments - de manière rythmique ou périodique (H. MORLO, 1999)

² ou puits émissif : ouverture naturelle qui peut être un aven ou une source selon le niveau d'eau de la nappe souterraine ; ce terme a été introduit chez nous à la fin du siècle dernier pour éviter l'utilisation peu glorieuse de trou du Creugenat

⁴ Pour fonctionner, la sonde hydrométrique doit être immergée sous le niveau d'étiage, qui est situé dans un goulet d'étranglement au fond de l'estavelle. Or, au Creugenat, ce goulet présente une difficulté de taille, à savoir le violent courant qui le franchit quand l'estavelle déborde.

En effet, avec les 2 m² de surface de cette étroiture et les 20 m³/s et plus du débit de crue, on réalise aisément que la vitesse du courant à cet endroit peut atteindre 10 m/s, soit près de 40 km/h, pouvant tout emporter sur son passage. La présence d'un important dépôt de graviers et galets roulés de plusieurs kilogrammes atteste d'ailleurs de la violence des flots lors des crues. La solution retenue a donc été d'installer la sonde électronique, vulnérable, dans un porte-sonde en acier inox solidement ancré, capable de résister aux chocs des galets «volant» littéralement dans le goulet pendant les crues.

Après avoir conçu et préparé minutieusement le matériel, les spéléologues descendent au fond du Creugenat pour l'installation de la station hydrométrique, lors d'une longue période d'étiage en juin 1998. Pendant le travail dans le plan l'eau, il est soudainement constaté que le niveau remonte lentement, mais régulièrement. Stupéfaits, les spéléos s'empressent alors d'achever l'installation, avant que la montée des eaux ne les en empêche. A leur retour de la pose de midi, s'attendant à voir le porte-sonde submergé, les spéléos découvrent cependant que le niveau d'eau s'est à nouveau abaissé à son point le plus bas. Au cours des deux journées nécessaires à l'installation du dispositif, le niveau du Creugenat oscille ainsi régulièrement à plusieurs reprises, avec une amplitude d'environ 70 cm. A ce moment, l'hypothèse d'une crue subite et inexplicable en pleine période d'étiage est abandonnée, et le phénomène est classé au rang de curiosité supplémentaire du Creugenat.

¹ Quellen, deren Schüttung rhythmisch oder periodisch schwankt (H. MORLO, 1999)

² oder Estavelle: die Öffnung kann – je nach Pegel des Karstaquifers – eine Balm oder eine Quelle sein; dieses Wort wurde am Ende des letzten Jahrhunderts geprägt, um die unschöne Bezeichnung «Loch der Creugenat» zu vermeiden.

³ Durchschnittlich 9 Hochwasser/Jahr (M. MONBARON & J.-C. BOUVIER, 1999)

⁴ Damit sie funktioniert, muss die Messsonde unterhalb des Minimalpegels installiert werden. Dieser Pegel befindet sich in einer Verengung am Grund der Estavelle. Im Fall der Creugenat bedeutet die starke Strömung bei überlaufendem Wasser eine grosse Erschwernis.

Bei einem Querschnitt von 2 m² an dieser Engstelle und einer Schüttung von 20 m³/s und mehr erreicht das Wasser nämlich eine Geschwindigkeit von 10 m/s (40 km/h), so dass alles weggespült wird. Die Gewalt der Strömung bei Hochwasser wird durch die vorhandenen runden Steine und eine grosse Kiesablagerung belegt. Deswegen wurde die Lösung gewählt, die empfindliche Messsonde in eine fest verankerte Verschalung aus Edelstahl einzubauen. Die Verschalung konnte somit den «fliegenden» Steinen während der Hochwasser widerstehen.

Nach sorgfältiger Vorbereitung des Materials stiegen die Höhlenforscher in die Creugenat ab und installierten die hydrometrische Messstation während einer Periode mit minimaler Schüttung im Juni 1998. Während der Arbeit im Wasserbecken wurde plötzlich festgestellt, dass der Pegel langsam aber regelmässig stieg. Verblüfft beendeten die Höhlenforscher eilig die Installation, bevor das steigende Wasser es unmöglich machte. Sie erwarteten, die Messstation nach ihrer Mittagspause unter Wasser vorzufinden. Der Pegel war jedoch wieder auf den tiefsten Punkt gesunken. Dieses Phänomen trat mit einer Amplitude von 70cm während der zwei Tage, die für die Installation benötigt wurden, mehrmals auf. Aus diesem Grund wurde die Hypothese eines während minimaler Schüttung auftretenden Hochwassers verworfen und das Phänomen als weitere Besonderheit der Creugenat eingestuft.