

La mesure autonome des hauteurs et des températures de l'eau
dans les drains des systèmes karstiques. Outils de suivi et
approches méthodologiques simples adaptés au milieu
souterrain

Didier Cailhol

Citer ce document / Cite this document :

Cailhol Didier. La mesure autonome des hauteurs et des températures de l'eau dans les drains des systèmes karstiques. Outils de suivi et approches méthodologiques simples adaptés au milieu souterrain. In: Collection EDYTEM. Cahiers de géographie, numéro 19, 2017. Monitoring en milieux naturels. Retours d'expériences en terrains difficiles. pp. 147-159; doi : <https://doi.org/10.3406/edyte.2017.1376>

https://www.persee.fr/doc/edyte_1762-4304_2017_num_19_1_1376

Fichier pdf généré le 22/04/2020

Résumé

La compréhension du fonctionnement d'un système karstique et de ses évolutions nécessite des approches croisées, pluridisciplinaires. Actuellement, les connaissances acquises montrent toute la pertinence de cette démarche pour décrire la complexité des systèmes, les relations installées et les différentes modalités de leurs fonctionnements. À cet effet, il convient de disposer de mesures et d'indicateurs à haute résolution à même de contribuer à la description, à l'étude et à la définition des processus en jeu et de leurs niveaux et grandeurs. Les variations des hauteurs et des températures de l'eau au sein d'un système karstique permettent des démarches diachroniques et synchroniques à l'échelle d'une cavité, d'un réseau karstique ou d'un territoire. L'acquisition et le suivi de ces paramètres sont de plus en plus simples et précis du fait des évolutions techniques des matériels. Cet article présente les matériels utilisés et la méthodologie de mesure employée au niveau du système karstique, du réseau et du drain. Il est fait, en première partie, un état des approches possibles et des stratégies de mesures à mener. La seconde partie fait un comparatif des matériels actuellement disponibles et de leurs caractéristiques. En troisième partie, il est traité des conditions d'instrumentation d'un site de mesure et des procédures et techniques pour assurer et garantir qualité des mesures.

Abstract

Today, the description and the understanding of a karst system should be approach by a multidisciplinary characterization to understand the complexity of the links and their dynamics inside a cave network or in a karst area. A hight density monitoring is necessary to have a precise description of the intensity and the characteristics of the phenomena. Long term and multi parameters monitoring are necessary to study and establish the organization and the relationships inside a cave or a karst system. Thus, water level and temperature variations are two easy parameters to record in cave. Their continuous monitoring allows a diachronic and synchronic at the scale of a cave or a karst system. The evolution of the measurement devices and loggers makes it easy to acquire the long-term data in many places in cave or in karst aquifers. This article presents the equipment and the measurement strategy. The first part describes the monitoring strategy in cave and at the scale of a karstic territory. The second part compares the different devices (accuracy, size, price). The third part explains how to install a monitoring sites in a cave, the calibration processes and the technical for protection, to get a standard of quality in the data recorded.

LA MESURE AUTONOME DES HAUTEURS ET DES TEMPÉRATURES DE L'EAU DANS LES DRAINS DES SYSTÈMES KARSTIQUES

OUTILS DE SUIVI ET APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES SIMPLES ADAPTÉS AU MILIEU SOUTERRAIN

*AUTONOMOUS MEASURING SYSTEM
FOR TEMPERATURE AND LEVEL OF THE WATER
IN THE DRAINS OF THE KARST SYSTEMS
SIMPLE TOOLS AND METHODOLOGIC APPROACH USED IN SPELEOLOGY*

DIDIER CAILHOL

Laboratoire EDYTEM CNRS, Université Savoie Mont Blanc, Pôle Montagne, 73380 Le Bourget-du-Lac cedex.

Contact : didier.cailhol@univ-smb.fr

RÉSUMÉ

La compréhension du fonctionnement d'un système karstique et de ses évolutions nécessite des approches croisées, pluridisciplinaires. Actuellement, les connaissances acquises montrent toute la pertinence de cette démarche pour décrire la complexité des systèmes, les relations installées et les différentes modalités de leurs fonctionnements. À cet effet, il convient de disposer de mesures et d'indicateurs à haute résolution à même de contribuer à la description, à l'étude et à la définition des processus en jeu et de leurs niveaux et grandeurs. Les variations des hauteurs et des températures de l'eau au sein d'un système karstique permettent des démarches diachroniques et synchroniques à l'échelle d'une cavité, d'un réseau karstique ou d'un territoire. L'acquisition et le suivi de ces paramètres sont de plus en plus simples et précis du fait des évolutions techniques des matériels. Cet article présente les matériels utilisés et la méthodologie de mesure employée au niveau du système karstique, du réseau et du drain. Il est fait, en première partie, un état des approches possibles et des stratégies de mesures à mener. La seconde partie fait un comparatif des matériels actuellement disponibles et de leurs caractéristiques. En troisième partie, il est traité des conditions d'instrumentation d'un site de mesure et des procédures et techniques pour assurer et garantir la qualité des mesures.

MOTS-CLÉS : SYSTÈME KARSTIQUE, DRAINS, MÉTROLOGIE, HYDROLOGIE, STRATÉGIE ET QUALITÉ DE MESURE.

ABSTRACT

Today, the description and the understanding of a karst system should be approached by a multidisciplinary characterization to understand the complexity of the links and their dynamics inside a cave network or in a karst area. A high density monitoring is necessary to have a precise description of the intensity and the characteristics of the phenomena. Long term and multi parameters monitoring are necessary to study and establish the organization and the relationships inside a cave or a karst system. Thus, water level and temperature variations are two easy parameters to record in cave. Their continuous monitoring allows a diachronic and synchronic at the scale of a cave or a karst system. The evolution of the measurement devices and loggers makes it easy to acquire the long-term data in many places in cave or in karst aquifers. This article presents the equipment and the measurement strategy. The first part describes the monitoring strategy in cave and at the scale of a karstic territory. The second part compares the different devices (accuracy, size, price). The third part explains how to install a monitoring site in a cave, the calibration processes and the technical protection, to get a standard of quality in the data recorded.

KEYWORDS: KARST SYSTEM, KARSTIC DRAIN, METROLOGY, HYDROLOGY, QUALITY STRATEGY FOR MONITORING .

INTRODUCTION

Le karst et le milieu souterrain constituent des systèmes et des objets naturels complexes aux interactions multiples. Ils abritent des écosystèmes avec des relations, des niveaux d'échanges et d'énergie hérités du contexte géologique et des évolutions environnementales. Leurs structurations entraînent, d'un point de vue hydrogéologique, des interrelations évolutives entre les milieux de surface et souterrains qui contribuent à l'installation de masses conséquentes au sein des aquifères qui leurs sont associés. Rendre compte de ces fonctionnements, de leurs dynamiques et évolutions nécessite de pouvoir disposer de mesures et d'indicateurs à haute résolution à même de contribuer à la description, l'étude et la définition des processus en jeu et de leurs niveaux et grandeurs. L'hydrogéologie a développé, des méthodes et des approches pour la caractérisation des systèmes karstiques à partir de l'hydrochimie et de la physique qui s'appuient sur des traçages, la réalisation de forages et de pompages ainsi que sur le suivi en continu de

paramètres spécifiques aux entrées et sorties des systèmes. Ces méthodologies très efficaces, demandent des procédures souvent lourdes et coûteuses, mobilisant des compétences et des technologies pointues pour appréhender les caractéristiques des aquifères karstiques. Ces approches demeurent globales et avec une résolution restreinte aux entrées et sorties du système ou à quelques points instrumentés à partir de piézomètres ou d'accès ponctuels. La caractérisation des systèmes spéléologiques et karstiques correspondants, ne se fait que par des approches indirectes qui n'apportent qu'une description mathématique des structures et des fonctionnements des hydrosystèmes et écosystèmes en place.

Dans ce contexte, la question traitée dans cet article porte sur les stratégies et les moyens d'appréhender, à partir d'indicateurs simples, à savoir les variations de la hauteur de l'eau et celles de la température de l'eau, les modalités des dynamiques karstiques en jeu.

LES APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES

La compréhension et la description de la structuration d'un système karstique et spéléologique passent par des approches disciplinaires variées, qu'il faut croiser.

Les méthodes géologiques s'appuient sur l'étude de la lithologie, la stratigraphie, du contexte tectonique à différentes échelles pour aborder les questions de taille et de structuration du réservoir considéré. Il faut pour cela, s'appuyer sur des méthodes de géophysique, des sondages suivis d'analyses géochimiques en laboratoire, accompagnés d'une démarche de modélisation 3D.

Pour l'hydrogéologie, la démarche doit prendre en compte le suivi de la recharge à partir de la connaissance fine des précipitations et des écoulements sur le bassin d'alimentation. La documentation des variations de débits et des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines vient compléter ce protocole. Cela s'appuie plus particulièrement sur les méthodes de l'hydrologie avec le suivi en continu des variations des flux, de l'hydraulique à partir de forages dans le réservoir, des pompages, des traçages et des analyses hydrochimiques et isotopiques des eaux suivies. Toutefois, il est nécessaire de les adapter à la complexité et à l'hétérogénéité du karst et des systèmes spéléologiques.

Les méthodes issues de la spéléologie s'appuient sur l'exploration et la documentation des réseaux spéléologiques, c'est-à-dire des drains et conduits que peut parcourir le spéléologue. Avec le travail de cartographie du réseau, le suivi des évolutions hydrologiques dans les drains permet de pouvoir appréhender *in situ*, l'organisation des écoulements et les

modalités des relations entre les zones d'introduction (épikarst), les zones de transfert et de battement (vadose) et la zone saturée à partir des émergences ou des regards de la grotte. La compréhension des dynamiques s'appuie sur la mesure en continu et à haute densité des variations de hauteur et de température de l'eau, des traçages et des mesures de débit. L'analyse des données recueillies apporte alors une meilleure appréhension des dynamiques et des interrelations en jeu dans la structuration des systèmes karstiques, du contexte hydrogéologique à l'échelle d'un système ou d'un bassin d'alimentation et de leurs évolutions. Cela a été plus particulièrement développée en France avec le projet baptisé *luirographe*, démarré en 1995 par Laurent Morel pour le Groupe Spéléologique Valentinois qui souhaitait disposer d'un système pour mesurer les niveaux d'eau dans la cavité souterraine de la Luire dans le Vercors. Ce déversoir occasionnel du système Arbois-Bournillon, connu pour ses crevaisons, a pu être abordé avec la conception d'un système de mesure autonome : le *luirographe* (Morel, 1996 ; Morel et al., 2006). Cette étude hydrospéléologique a permis la compréhension du fonctionnement d'un système de grande ampleur avec un bassin d'alimentation de 230 km² et les descriptions des dynamiques de crue et des mises en charge dans le réseau qui sont de l'ordre de 475 m entre l'émergence d'Arbois et la grotte de la Luire. L'équipement développé à cet effet, le *luirographe*, pèse 400 g pour un volume inférieur à 30 cm³. Il a une autonomie de plus de 3 ans et peut stocker 160 000 données soit l'enregistrement de la température et la pression toutes les 15 minutes pendant deux ans.

LES MESURES

À propos des mesures de la pluviométrie

Le suivi et la mesure de la pluviométrie en continu sont des paramètres indispensables pour la compréhension du fonctionnement hydrologique des systèmes karstiques et des modalités d'échanges au sein des aquifères considérés. Il ne sera pas détaillé dans cet article les stratégies et processus de mesure de ces paramètres. À titre d'information, il convient de rappeler que le réseau de pluviomètres de Météo France dispose de 5238 stations de mesure avec plus de 10 ans de chroniques journalières. Des observatoires à vocation régionale sont également mis en place comme l'Observatoire Hydro-météorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais (OHM-CV). C'est un Service National d'Observation de l'INSU-CNRS, porté par l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble

(OSUG). Celui-ci fédère les compétences de chercheurs de disciplines variées pour améliorer les connaissances et les capacités de prévision du risque associé aux pluies intenses et aux crues éclairs en région méditerranéenne.

Des mesures précises à l'échelle du bassin d'alimentation peuvent être parfois nécessaires pour une compréhension fine des processus en jeu et le calage de modèles à partir des images radar de précipitations. Un réseau de pluviomètres est alors à installer pour appréhender cette variabilité climatique spatio-temporelle. Dans ce contexte, les pluviomètres automatiques à augets basculants disposés en réseau sont les plus appropriés. Ils fournissent une mesure fiable avec une incertitude maximale moyenne de 10 % (Leroy, 2000 ; Pautier et *al.*, 2014).

Un réseau de suivi dans le système spéléologique et/ou karstique

L'installation d'un réseau dense de mesures demande de procéder au choix de paramètres significatifs pour caractériser les dynamiques de fonctionnement et d'évolution des systèmes spéléologiques et karstiques. Les mesures automatiques et programmées des variations de hauteur et de température de l'eau avec un pas de temps serré sont des indicateurs pertinents et fiables pour rendre compte du fonctionnement hydrogéologique d'un système karstique (Palmer, 2007). Il est alors nécessaire de définir une stratégie de mesures et d'acquisition de données pour choisir les emplacements et les équipements qui répondent aux objectifs fixés : variables mesurées, rapidité d'acquisition, capacité de mémoire nécessaire, degré de précision, mode de communication avec le logger, complexité et contraintes d'utilisation de la sonde de mesure, du logiciel de gestion et de récupération des données.

La nécessité d'une démarche de qualité de mesure

Pour assurer la qualité de mesure réalisée sur un site, il convient de pouvoir connaître les caractéristiques suivantes pour les appareils mis en œuvre :

- étendue de mesure : c'est le domaine de variation possible de la grandeur à mesurer) ;
- la précision : les fabricants parlent de la précision comme étant l'erreur maximale faite sur la mesure. Pour exprimer qu'un capteur ou qu'une mesure donne un résultat très proche de la « valeur vraie », on dit que ce capteur ou que cette mesure est exacte. L'exactitude est la concomitance de deux concepts : la fidélité et la justesse. L'exactitude ou la précision d'un capteur est donc une donnée statistique qui caractérise la dispersion et la moyenne d'une série de mesurages répétés sur un même mesurande ;

- la résolution : pour un capteur c'est la plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible de l'indication délivrée par celui-ci ;

- la justesse : l'erreur de justesse est l'erreur globale résultant de toutes les causes pour chacun des résultats de mesure pris isolément. C'est donc l'aptitude du capteur à donner des résultats qui ne sont pas entachés d'erreur. Dans le cas de mesures multiples, c'est l'écart entre le résultat moyen et la valeur vraie ;

- la fidélité : c'est l'aptitude d'un capteur à donner des mesures exemptes d'erreurs accidentelles. Elle se définit par la dispersion des résultats. Si on n'effectue qu'une seule mesure, la fidélité représente la probabilité qu'elle soit représentative du résultat moyen. Ce dernier aurait été obtenu en effectuant une infinité de mesures. Il faut garder en vue que le résultat moyen est lui-même entaché de l'erreur de justesse. Un capteur mis en place pendant un certain temps pour enregistrer une donnée, ne doit, bien entendu, pas dériver. On corrige les effets de dérive par des étalonnages réguliers.

La nécessité de l'étalonnage des sondes de mesure

Malgré les spécifications des constructeurs, il est nécessaire de pouvoir disposer de sondes de mesures étalonnées entre elles pour suivre de manière significative des variations de niveau et de température d'une même masse d'eau ou la propagation d'une crue dans un réseau de drainage. La vérification de ces écarts de mesure entre les instruments doit permettre de leur affecter des coefficients de compensation pour obtenir une précision optimale et éviter des erreurs d'interprétation quant aux dynamiques des événements et des phénomènes observés.

LES MATÉRIELS EXISTANTS

La station OTT Orpheus Mini™

La station de données OTT Orpheus Mini™ est conçue pour une utilisation à long terme dans le cadre de la surveillance des eaux souterraines. Les paramètres mesurés sont les variations de pression (niveau d'eau) et de température de l'eau. Elle comprend une cellule de mesure à membrane céramique stable à long terme, installée dans un boîtier en acier inoxydable résistant à la corrosion et à l'eau salée, un câble de longueur variable permet la connexion avec le logger qui constitue également la cellule de communication. La station Orpheus Mini est également utilisée pour le suivi des eaux de surface. Elle convient parfaitement à l'instrumentation de forages à partir de 1 pouce de diamètre. L'alimentation est assurée par des piles au lithium ou alcalines remplaçables sur site. L'installation, le remplacement des piles et la communication sont simples, car l'unité de communication est aisément accessible via le corps du logger situé en partie haute, plusieurs mètres au-dessus de la surface d'eau suivie. Il existe plusieurs plages de mesures : 0 à 4 m, 10 m, 20 m, 40 m et 100 m. La précision donnée par le fabricant est de $\pm 0,05\%$ de la valeur finale de la plage de mesure.

Les piles au lithium ont une tension 3,6 V, leur capacité peuvent être de 13 A/h ou de 26 A/h. Au pas de mesure horaire, la durée de vie est de 5 ans avec une

capacité de 13 A/h. Elle passe à 10 ans avec une capacité de 26 A/h. Dans le cas d'une alimentation avec des piles alcalines de grande qualité, la durée de vie est d'une année. La précision de l'horloge est de $\pm 8s$ par mois à la température de 25°C.

Le dialogue avec la sonde et la gestion des données se font avec le logiciel OTT *Water level operating program*. La mémoire du logger est de 4 Mo et permet l'enregistrement de 500 000 données. Les données peuvent être lues à partir du logiciel dans des fichiers au format propriétaire Hydras 3 ou exportées au format CSV (Figure 1a). La connexion entre l'ordinateur et le logger se fait par une tête de lecture reliée à un port série via USB et qui communique avec le logger par infrarouge (interface IrDA). La tête de lecture est parfaitement adaptée pour une utilisation sur des loggers en position de travail, que ce soit en station ou au sommet d'un tube de forage. Le coût de cet ensemble en 2017 est de 1 300 € HT.

La sonde OTT PLS qui compose la partie acquisition de cet ensemble est également livrable avec différentes sorties : sorties analogiques 4 à 20 mA ou sorties numériques SDI-12 ou RS-485 pour être installée en relation avec une station Campbell Scientific. Il s'agit dans ce cas d'une installation fixe, plus lourde d'organisation et de maintenance.

Les sondes Hobo™

Le modèle de data logger U20 water level de la marque Hobo™ est un enregistreur étanche de niveau d'eau et de température (Figure 1b). Il existe différents modèles conçus pour 4 plages de mesures différentes (0-3 m, 0-9 m, 0-30 m et 0-76 m). La précision de la mesure de hauteur d'eau est de 0,5 cm, l'erreur typique est de $\pm 0,05\%$ de la valeur finale, l'erreur maximale est de $\pm 0,1\%$ EP, soit 1,0 cm de hauteur d'eau. La précision de pression brute est de $\pm 0,3\%$ EP, soit 0,62 kPa d'erreur maximale. La précision est inférieure à 0,02 kPa, soit 0,21 cm de hauteur d'eau. Le temps de réponse dans 90% des cas est inférieur à 1 s, la précision de mesure dépend aussi du temps de réponse de la température.

L'équilibre thermique de la sonde avec la masse d'eau est obtenu après 5 mn d'immersion (fiabilité

de la mesure à 90%). La dérive de température est de 0,1°C par an.

L'alimentation du système est assurée par une pile au lithium de 3,6 V. La durée de vie est de 5 ans pour un pas d'acquisition d'une minute ou plus. Son remplacement est possible, mais le changement doit se faire normalement chez le fabricant. Le logger est équipé d'une mémoire (non-volatile) de 64K bytes qui permet approximativement 21 700 mesures de pression et de température. La dérive de l'horloge est de ± 1 minute par mois dans la plage de température de 0° à 50°C

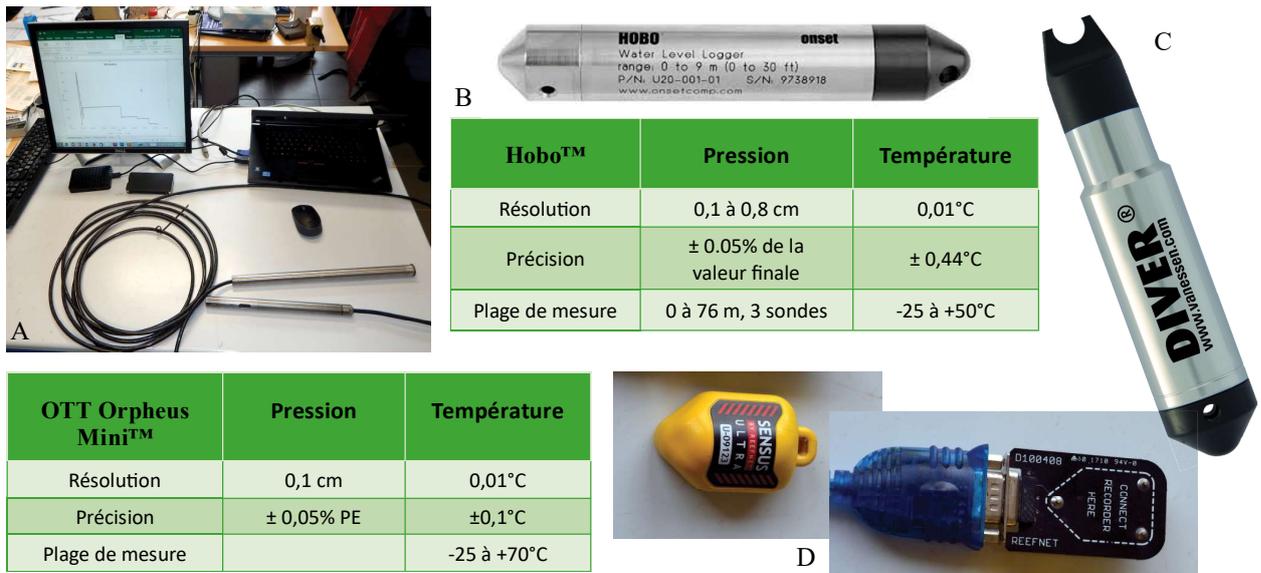
Le poids de ce matériel est de 210 g, ses dimensions sont de 2,46 cm de diamètre et 15 cm de longueur. Le tarif est variable suivant la nature du corps de la sonde. En version titanium, le coût en 2017 est de 982 € HT ; en version composite il est de 487 € HT.

Les sondes Diver™

La société Van Essen Instruments propose deux modèles de sondes issues des Séries DI8xx : le Diver TD et le Baro-Diver. Les deux modèles mesurent la pression absolue et la température.

Le TD-Diver mesure la pression et la température à un pas de temps programmé et enregistre ces valeurs

dans sa mémoire de longueur fixe ou mémoire continue (Figure 1c). Il est disponible dans les plages de pression 10 m, 20 m, 50 m et 100 m. Cette sonde est fabriquée dans un corps en acier inoxydable de 22 mm de diamètre. Le TD-Diver est prévu pour enregistrer au maximum 72 000 mesures (date-heure, pression



Hobo™	Pression	Température
Résolution	0,1 à 0,8 cm	0,01°C
Précision	± 0.05% de la valeur finale	± 0,44°C
Plage de mesure	0 à 76 m, 3 sondes	-25 à +50°C

OTT Orpheus Mini™	Pression	Température
Résolution	0,1 cm	0,01°C
Précision	± 0,05% PE	±0,1°C
Plage de mesure		-25 à +70°C

Figure 1 - A) Sonde OTT Orpheus, reliée par un câble de 15 m au logger. Un logiciel dédié permet de paramétrer la sonde et de récupérer des données après une campagne de mesures. B) Sonde de mesure et logger Hobo U-20™. C) Sonde de mesure et logger TD Diver™. D) Sonde de mesure et logger Reefnet Sensus Ultra™. Les sondes mesurent et enregistrent les variations de hauteur et de température de l'eau. Un dispositif de connexion permet de faire l'interface avec le logiciel dédié pour paramétrer la sonde et récupérer les données.

et température) dans sa mémoire de travail et 72 000 mesures dans sa mémoire de stockage. L'équilibre thermique de la sonde avec la masse d'eau est obtenu après trois minutes d'immersion (fiabilité de la mesure à 90%). Le tarif est variable suivant la nature du corps de la sonde. En version titanium, le coût en 2017 est de 510 € HT ; en version CERA, il est de 732 € HT.

Le Baro-Diver mesure la pression atmosphérique et est utilisé pour compenser les variations de pression mesurées par les autres sondes Divers de la gamme

(TD, CTD). Il peut également être utilisé pour mesurer des niveaux d'eau peu profonds inférieurs à un mètre. Le Baro-Diver mesure la pression et la température à intervalles réguliers et enregistre ces valeurs dans sa mémoire de longueur fixe ou mémoire continue. Le Baro-Diver est fait pour enregistrer au maximum 72 000 mesures (date/heure, pression, température) dans sa mémoire de travail et 72 000 mesures dans sa mémoire de stockage. Cette sonde est conçue avec un corps en acier inoxydable (316 L) de 22 mm de diamètre.

Les sondes Reefnet™ Sensus Ultra

Ce modèle est constitué d'une sonde de mesure et d'enregistrement de la pression et de la température (Figure 1d). Ce matériel a été initialement conçu pour l'enseignement et le suivi de plongées sous-marines, il est maintenant de plus en plus utilisé pour des suivis et des mesures en hydrogéologie. Avec l'évolution des capteurs de pression, leur précision s'est considérablement améliorée, au point d'être dans les mêmes niveaux que les autres matériels conçus pour les mesures de 0 à 150 m de hauteur d'eau. La résolution est de 1,27 cm. La précision est donnée, sans compensation, pour 30 cm. La plage de mesure de la température est de -20°C à +40°C. Ces sondes sont données par le fabricant avec une précision de +/- 0,8°C et de 1 hPa pour les valeurs de pression. Leur coût est de 190 € HT.

Le logger comprend une mémoire flash non volatile de 2 MB. La capacité de stockage est de 15872 bytes qui permet une capacité d'enregistrement de 1500 h avec un pas de temps à 10 s. Cela permet 540000 enregistrements de pression et de température. Mais actuellement, une limitation interne du logiciel Sensus manager (juillet 2013, V2.61) interdit d'exploiter des

chroniques dépassant les 300000 enregistrements. Il est cependant possible, en introduisant quelques lignes de programme, de récupérer les données enregistrées au-delà et de générer un fichier au format CSV.

La mise en charge maximale qu'il est possible de mesurer est de 152 m. Cependant, les retours d'expérience montrent que la sonde peut enregistrer des valeurs plus importantes comme au Puits des Bans dans le Dévoluy où elle a mesuré 240 m de hauteur d'eau lors des débordements du déversoir du système des Gillardes (Lismonde et al., 2004).

La durée de vie de la pile lithium est donnée jusqu'à 10 ans, mais l'expérience montre qu'elle peut être nettement plus courte en fonction des usages ou des séries. Il est possible de démonter et d'échanger la pile, mais cela oblige à un recollage des deux ensembles de la coque qui sont initialement thermo-soudés.

Le logiciel dédié Sensus Manager est très pratique pour paramétrer les sondes et récupérer les données. Celles-ci sont ensuite exportées au format CSV pour être exploitées avec un tableur ou un logiciel de mesures hydrométriques comme Spéléograph.

L'évaluation des sondes Reefnet

L'utilisation de ces sondes dans différents champs disciplinaires scientifiques s'est largement répandue depuis plus de 10 ans. Les retours d'expérience sur le milieu souterrain sont nombreux, parfois pour des programmes ambitieux (Gayet, 2016). Toutefois, l'expérience montre un manque de fidélité pour les mesures de température. Régulièrement, on relève des différences de l'ordre de 0,5 à 0,7°C entre les sondes pour une même valeur de température. Les écarts observés sont moindres pour la pression, de l'ordre de 3 à 5 hPa.

Test d'immersion dans une citerne

Un test d'immersion avec un protocole de profondeur et de durée de paliers défini, permet de rendre compte des performances des capteurs de pression et de température. Au cours de cette opération, les deux sondes testées sont réglées avec un pas de temps de mesure de 10 s et une pression de déclenchement de 500 hPa. Elles sont fixées au point zéro d'un ruban métré et immergées dans une citerne enterrée de 20 m³, alimentée par l'eau pluviale, avec le protocole suivant : une descente rapide à 0,5 m de profondeur, un temps de palier de 20 s, puis une descente à 1 m avec un temps de palier de 20 s. Les sondes sont remontées ensuite à une profondeur de 0,35 m pour être redescendues ensuite par paliers de 0,1 m toutes les 30 s depuis la profondeur 0,5 m jusqu'à 1 m de profondeur. Elles sont ensuite amenées à la profondeur de 1,5 m pour un palier de 180 s. Un palier à la profondeur d'un mètre est effectué durant 60 s. Un test de faible remontée de 0,05 m durant 300 s fait suite. Une remontée rapide à 0,3 m de profondeur puis une immersion à 1,5 m suivi d'un retour à la surface boucle le cycle de mesure. (Figure 2a).

Suivi de la température

Au cours de ce cycle d'immersion, on observe qu'il faut 360 s pour que la sonde affiche la valeur de température de l'eau de la citerne. Le corps de la sonde en résine époxyde amène une certaine inertie thermique. La citerne utilisée pour le test est enterrée. Sa profondeur est de 2,5 m. Elle reçoit une partie des eaux pluviales d'un toit. Comme on peut l'observer sur les courbes, il existe une certaine stratification des températures d'eau en fonction de la profondeur. Au cours du

test, les changements rapides et les retours à des profondeurs identiques n'ont pas été enregistrés par les sondes. L'inertie thermique liée au corps de la sonde ne permet pas d'enregistrer des changements qui surviennent dans des laps de temps inférieurs à la minute. Par ailleurs, il est important de noter les comportements différents des deux capteurs de température pourtant soumis aux mêmes variations (Figure 2b).

À partir de ces tests, il apparaît que les sondes Sensus Ultra Reefnet™ montrent une relativement bonne précision et fidélité pour la mesure de la pression. En revanche, il est observé des écarts importants d'une sonde à l'autre pour la mesure de la température et l'inertie thermique des sondes doit être prise en compte si l'on envisage des mesures avec des pas de temps inférieurs à 10 minutes.

L'étalonnage d'une série de sondes, une procédure simple et rapide

Pour faire travailler de manière précise un réseau de sondes, il est donc nécessaire de vérifier et de quantifier entre elles les écarts de mesure et de leur affecter des coefficients de compensation. Le banc d'essai peut être facilement fait avec un pulvérisateur de jardin rempli d'eau avec une température autour de 20°C.

Les sondes sont paramétrées pour un enregistrement à 15 s et un déclenchement à 500 hPa. On immerge le lot à tester dans le pulvérisateur, puis une fois celui-ci fermé, on fait monter la pression doucement jusqu'à ce que la soupape de sécurité se mette en fonction. Après environ 60 mn, on procède au dégonflage progressif du pulvérisateur avec un pas de temps de 15 mn pour laisser le temps aux sondes de faire une série de mesures significatives durant cet intervalle (Figure 3a). Cette procédure est suivie jusqu'au retour à la pression atmosphérique. Les données sont extraites à l'aide du logiciel Sensus Manager puis exportées en données brutes au format CSV pour être analysées ensuite avec un tableur (Figure 3b). Ensuite, il s'agit d'organiser les comparatifs entre les différentes sondes pour chacune des valeurs. Cela permet de pouvoir attribuer un coefficient de correction entre les différentes sondes, pour unifier les valeurs mesurées de température et de pression. Cette opération est à entreprendre systématiquement lors de la mise en place d'un réseau fin de mesures (Figure 4).

LA QUALITÉ DE L'IMPLANTATION DE LA STATION DE MESURE SUR LE SITE

Implantation du point de mesure

L'implantation du site de mesure doit répondre à des besoins de :

- stabilité : il doit être choisi pour ne pas subir de changements géométriques trop importants au cours de la période de suivi. Les aspects de comblement par la charge solide ou d'affouillement sont à prendre en

compte. Les ancrages des sondes doivent être solides et fixes. L'utilisation de supports rigides, cornières métalliques ou tiges en matériaux composites tels que des piquets de clôture électrique pour le pâturage des bovins et des ovins constituent des solutions solides, économiques et faciles à mettre en œuvre. Ce type de piquets est d'une longueur de 1,4 m et pèse 300 g. Ils

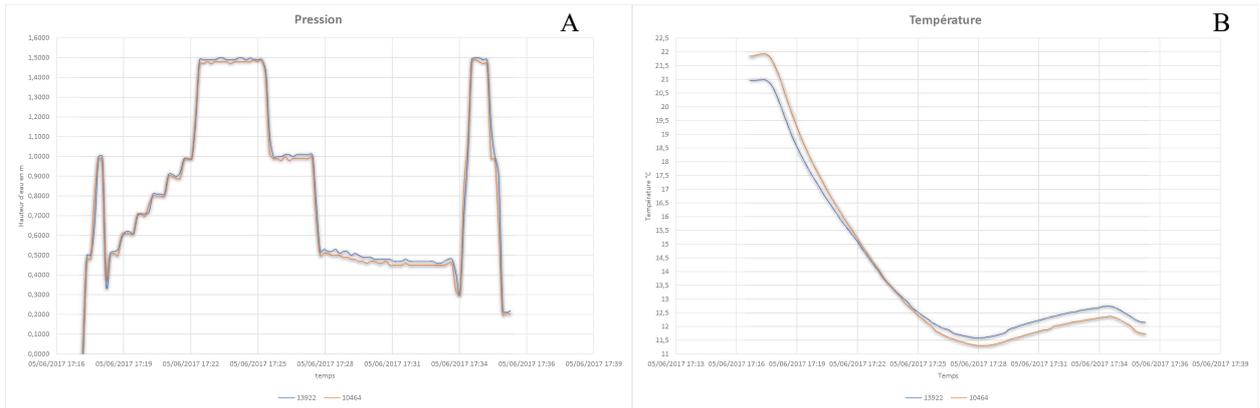


Figure 2 - A) Graphes des variations de hauteur d'eau lors d'un test d'immersion de deux sondes Reefnet Sensus Ultra™. Les valeurs enregistrées sont relativement bien corrélées d'une sonde à l'autre. Les capteurs de pression sont relativement bien étalonnés, justes et fidèles. B) Graphes des variations de température d'eau lors d'un test d'immersion de deux sondes Reefnet Sensus Ultra™. Les valeurs enregistrées ne sont pas bien corrélées d'une sonde à l'autre. Les capteurs de température ne sont pas bien étalonnés et présentent des problèmes de justesse et de fidélité. Il est à noter l'inertie thermique de la sonde, liée au corps en résine. Il faut environ 7 mn pour que l'équilibre thermique s'installe entre la sonde et la masse d'eau suivie.

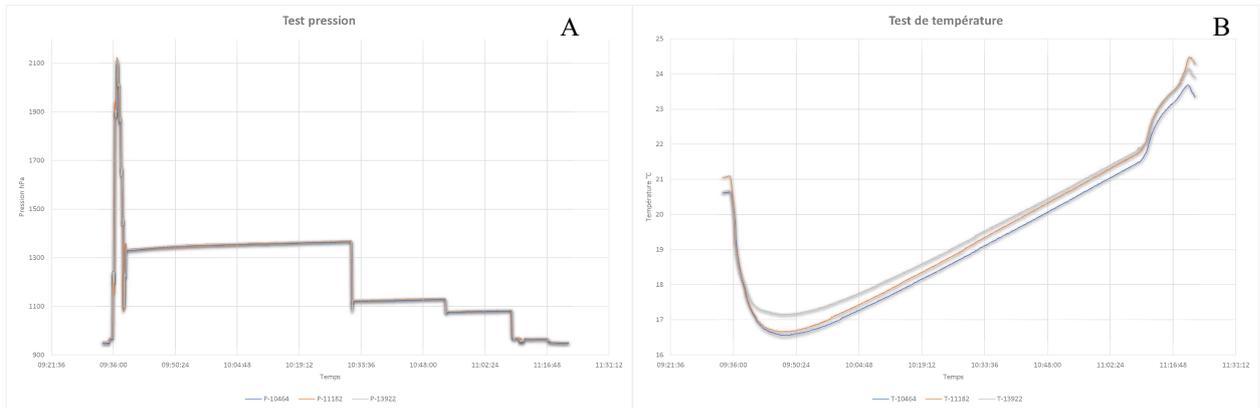


Figure 3 - A) Graphe des variations de pression entre différentes sondes lors d'un test d'immersion simulée à l'aide d'un pulvérisateur de jardin. La montée en pression et le retour à la pression atmosphérique sont effectués de manière progressive avec des temps variables pour permettre de comparer la justesse des sondes entre elles. B) Graphe des variations de température entre différentes sondes lors d'un test d'immersion simulée à l'aide d'un pulvérisateur de jardin. Les variations de température sont obtenues en exposant le pulvérisateur au soleil ou au froid en fonction de la saison pour permettre de comparer la justesse des sondes entre elles.

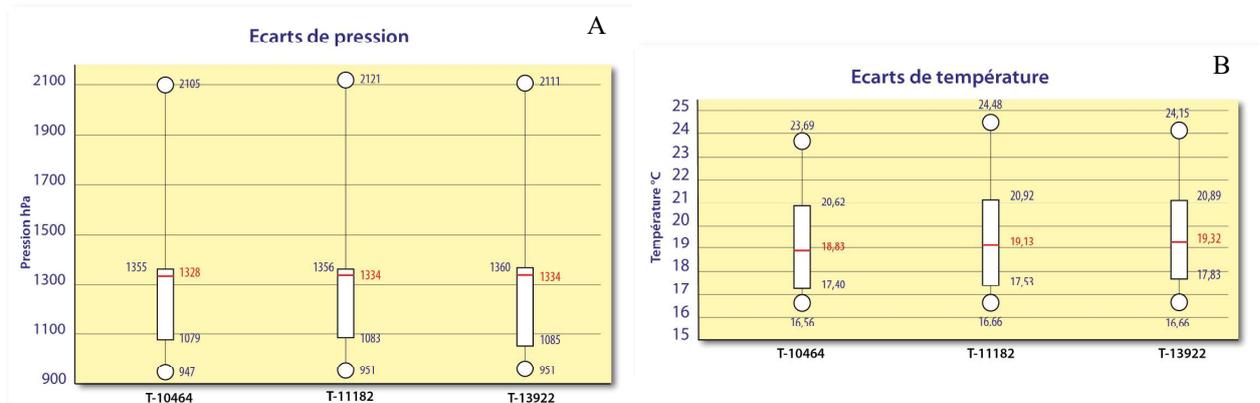


Figure 4 - A) Diagramme en boîte des variations de pression enregistrées par les sondes lors du test de simulation d'immersion. Sur les trois sondes testées on peut observer le très faible écart des valeurs de médiane. Deux d'entre elles sont identiques et la troisième est inférieure de 4 hPa. B) Diagramme en boîte des variations de température enregistrées par les sondes lors du test de simulation d'immersion. Sur les trois sondes testées on peut observer un écart de 0,19°C, de 0,3°C et de 0,49°C des valeurs de médiane entre les sondes. L'écart extrême des médianes est de 0,49°C. L'écart minimal est de 0,19°C.

sont en fibre de verre ce qui évite les problèmes de corrosion ou d'interférence sur les mesures dans le cas de la conductivité électrique, du pH ou de l'oxygène dissout. La fixation à la paroi se fait par l'intermédiaire de goujons de 6 ou 8 mm de diamètre avec une plaquette en usage en spéléologie ou en escalade. Il est souhaitable de mettre en place une double fixation, soit si cela est possible, en haut et en bas du support ou le plus souvent en doublant l'ancrage de la partie supérieure. L'installation des sondes ou des systèmes de tranquillisation sur les supports se fait au moyen de brides plastiques telles que les colliers utilisés en électricité ou dans l'industrie. (voir page suivante, en haut à gauche) ;

- sensibilité du site : il est important de choisir un site de mesure qui dispose d'une variation importante de la hauteur d'eau pour une faible augmentation de débit. Cela permet de disposer d'une meilleure appréciation des successions d'événements (crues ou étiages) et d'une plus grande précision des mesures. Le cas échéant, il pourra être procédé à un aménagement pour renforcer l'effet à l'aide d'un barrage ou d'un seuil (voir page suivante, en haut à droite) ;

- représentativité du site : la hauteur mesurée doit correspondre à la hauteur vraie de la lame d'eau. Il ne faut pas que la dynamique d'écoulement suivant la hauteur d'eau influence la hauteur vraie de cette lame. Pour éviter ce type d'interférence, la distance du site de mesure par rapport à un seuil déversoir a son importance. Elle doit être de 3 à 4 fois la hauteur maximale de la lame d'eau pour éviter ces perturbations de mesure ;

- la localisation du point : pour un suivi hydrométrique fin et la compréhension des processus en jeu à l'échelle d'un système karstique ou d'un territoire, les points de suivi doivent être incorporés à un système de géoréférencement. Cela se fait à partir de mesures topographiques complémentaires qui viennent se boucler sur les données topographiques du système spéléologique ou des différents réseaux installés sur un territoire. Les techniques de levés en spéléologie permettent de disposer d'une résolution métrique à l'échelle d'un réseau. Pour les positionnements des émergences ou des entrées de cavité, l'usage du GPS différentiel permet un gain de temps et de précision appréciable.

Nécessité de compenser la pression atmosphérique

La compensation de la pression atmosphérique est indispensable dès lors qu'on aborde les suivis d'étiages ou que l'on inclut des piézomètres dans le réseau de suivi. En effet, au niveau d'un puits de forage ou pour le suivi des faibles variations d'un niveau d'eau, les évolutions de la pression atmosphérique peuvent correspondre à des hauteurs d'eau de plusieurs cm. Pour les suivis de réseaux importants avec une forte dénivellation ou sur des systèmes très étendus, il est indispensable de prévoir des sondes

de suivi de la pression atmosphérique multiples pour compenser au plus près les écarts rencontrés aux différents endroits suivis.

À l'intérieur des grands réseaux spéléologiques des effets de barrage ou venturi peuvent également intervenir en fonction de la morphologie des galeries (étroitures) ou des interconnexions entre les différentes branches ou galeries (ouvertures - fermetures de siphons).

Nécessité des chambres de tranquillisation

Pour rester également dans la qualité de mesure, il peut être utile de placer les sondes dans des chambres de tranquillisation afin d'obtenir un signal le moins bruité possible. Ceci est d'autant plus nécessaire que le point de mesure se trouve dans un écoulement turbulent avec la formation de vaguelettes à la surface de la vasque ou de turbulences liées à la présence de contre-courants ou de mouvement d'eau tourbillonnants (voir page suivante, en bas à gauche).

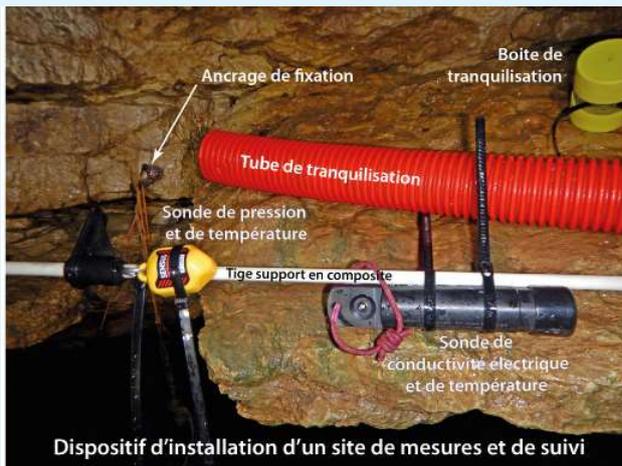
Protection contre les effets de la charge solide

Dans certains contextes où l'on a un bassin d'alimentation qui dispose d'un stock sédimentaire facilement mobilisable et des morphologies favorables à l'installation de conditions hydrologiques, avec des temps de concentration très rapides et les débits de pointe élevés, le transport de la charge solide peut être important. La quantité des matériaux transportés est alors importante, dans un contexte de forte énergie, ce qui va modifier d'un épisode pluvieux à l'autre, les conditions hydrologiques dans les drains avec de fortes évolutions du lit, des plages de dépôt et un risque élevé de détérioration des sites et des installations de mesure. L'installation des sondes dans des gaines plastiques utilisée dans les travaux publics pour le passage des câbles de type Janolène™, présente des conditions de mise en œuvre aisées et un faible coût d'achat. Cela permet de sécuriser les matériels et leur récupération quel que soient les changements de lits (dépôts sédimentaires) (voir page suivante, en bas à droite).

Protection contre les problèmes de pollution chimique et bactérienne

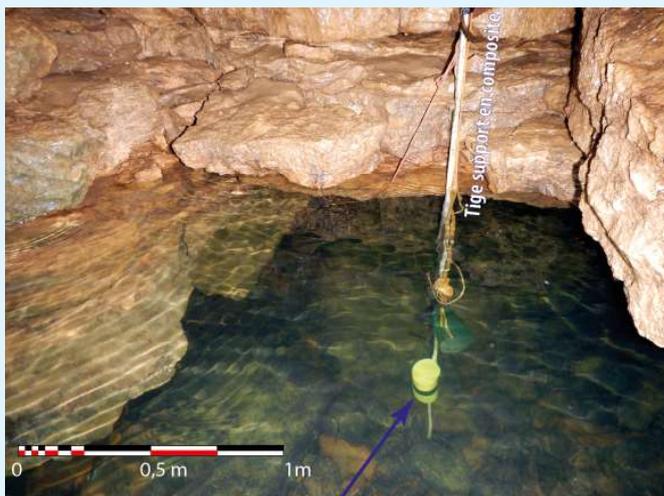
Très souvent, lors de campagne de mesures qui s'étendent sur plusieurs mois, la qualité hydrochimique ou bactérienne des eaux sur les sites suivis pose des problèmes pour le fonctionnement des sondes. Des processus d'encroûtement s'installent sur la sonde et provoquent des dérives ou l'arrêt de la mesure des capteurs de pression ou de température.

Pour pallier les effets de ces phénomènes, les sondes sont emballées dans des sacs plastiques remplis d'eau déminéralisée et refermés par soudure thermique. L'ensemble est disposé à la station de mesure dans une petite boîte trouée, en plastique, qui joue le rôle de chambre de tranquillisation. Cette disposition

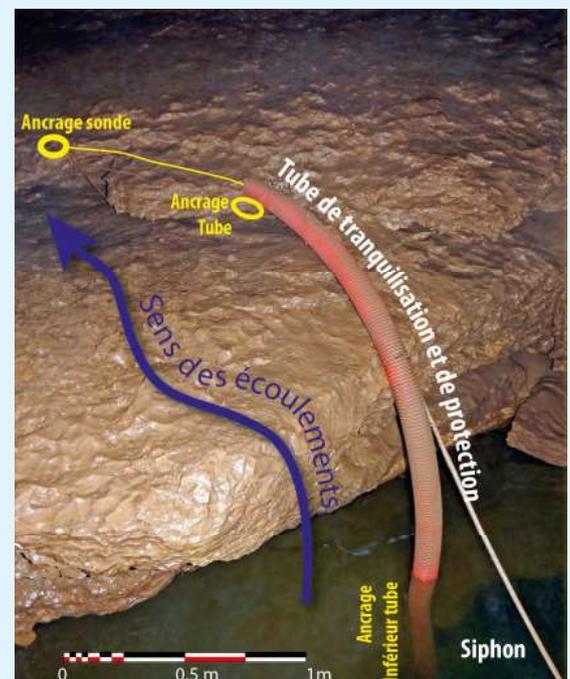
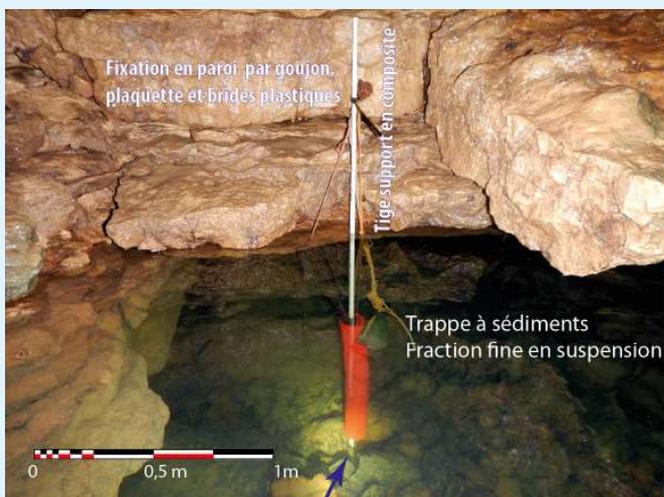


Divers systèmes de fixation et de stabilisation des mesures à installer à un point de suivi des hauteurs et des températures de l'eau. Dans le contexte du milieu souterrain, les matériaux et les techniques mises en œuvre doivent être résistants aux phénomènes de corrosion et de prolifération bactérienne et surtout à la violence des crues.

Seuil jaugeur pour améliorer la mesure des hauteurs d'eau. Ici, dans la grotte de Milandre (Jura suisse), les deux profils rectangulaires permettent de calibrer les relations hauteur/débit pour des valeurs de 0 à 600 l/s (partie basse) et de 600 à 2000 l/s (partie supérieure). Le tube bleu est la chambre de tranquillisation dans laquelle les sondes sont installées.



Ci-dessous : technique employée pour instrumenter la zone aval d'un siphon. Le tube plastique souple de couleur rouge est ouvert aux deux extrémités. Il est fixé en bas et en haut pour le maintenir en position. Il assure une protection des sondes vis-à-vis des transports solides lors des épisodes de crue et joue le rôle de chambre de tranquillisation pour obtenir un signal de suivi sans artéfact lors des épisodes de crue.



Exemples de techniques employées pour protéger les sondes contre les charges minérales ou bactériennes et dans un contexte d'écoulement très turbulent de type torrentiel : boîte de tranquillisation pour des eaux avec forte charge minérale ou bactériologique (en haut), boîte de tranquillisation pour des eaux avec une forte dynamique (en bas)

permet de réaliser des suivis sur des sites pollués ou à forte minéralisation comme on peut en trouver dans des contextes hydrothermaux ou hypogènes.

La limite de cette méthode est l'inertie thermique introduite par l'enveloppe plastique et la petite masse d'eau déminéralisée qu'elle contient. Il est bien évident dans de tels contextes que le pas de temps de mesure ne peut être en-dessous de 10 mn pour obtenir des valeurs représentatives des changements de pression ou de température. Dans le cas d'un projet de mesure avec des sondes multiples, les volumes des sacs plastiques et de l'eau qu'ils contiennent doivent être identiques pour éviter des distorsions introduites par des volumes d'eau trop différents. Le contrôle final est réalisé par pesée des sondes préparées afin de vérifier l'absence d'écarts trop significatif (± 5 g) (Figure 5).

Les interférences liées aux effets de sites

- *Les influences thermiques près des zones de surface* : dans le cas du suivi des émergences il est important de ne pas placer le point de mesure avec une exposition au soleil, la température de l'eau enregistrées est alors influencée par le flux de chaleur du rayonnement solaire au cours du jour (Figure 6). Il est indispensable de ne pas utiliser de barre métallique pour maintenir les sondes en place. Les structures métalliques jouent le rôle de condensateur thermique qui va amplifier la température au niveau du site. Ceci est d'autant plus important dans le suivi de sites d'altitude avec des influences fortes de la fonte nivale lors de la recharge printanière des aquifères.

- *Siphon suspendu ou cheminée d'équilibre* : dans la zone épiphréatique et plus particulièrement dans les parties proches du toit de l'aquifère, il subsiste des siphons suspendus qui barrent des portions de galeries. En l'absence d'exploration en plongée souterraine pour apporter la description de cette portion de la cavité, il est très difficile de savoir si l'on a affaire à un regard sur le toit de l'aquifère ou s'il s'agit d'un siphon suspendu. Seule l'analyse des données de hauteur d'eau et de la température permet de différencier ces cas de figure. Dans le cas d'un siphon suspendu, il sera enregistré un niveau d'eau et une température constante qui ne témoignent que de la présence du siphon sans autres apports lors des périodes d'étiage. Il faudra attendre les effets de la recharge de l'aquifère pour voir des changements apparaître au niveau de cette masse d'eau, souvent plusieurs épisodes de crue après ceux observés dans le drain principal.

- *Les niveaux d'eau temporaires* : dans certaines portions de galeries de la zone épiphréatique, le niveau d'eau suivi n'est présent qu'en période de moyen ou fort débit. Les autres parties du temps, il n'est pas présent et la galerie est sèche. Les mesures de pression correspondent alors aux variations de la pression atmosphérique et la température enregistrée est celle de l'air de la galerie. Le fait de disposer d'un point de suivi de la pression atmosphérique pour la

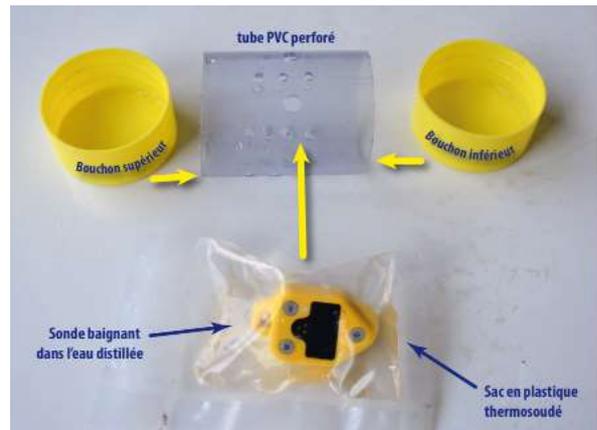


Figure 5 - Dispositif de protection des sondes contre les charges minérales et bactériennes. La sonde est installée dans un sac plastique rempli d'eau distillée, fermé par thermo-soudure. L'ensemble est placé dans le tube PVC perforé et obturé ensuite par les deux bouchons. Une bande caoutchouc peut être parfois être employée pour maintenir l'ensemble en position.



Figure 6 - Site de mesure installé à une émergence. Il est équipé d'une échelle limnimétrique et d'un tube de tranquillisation qui contient une sonde de mesure des hauteurs et des températures d'eau. Les relations hauteur/débit sont calibrées avec des jaugages au sel dans différentes conditions hydrologiques. Seuls les gros débits de crue n'ont pu être jaugés du fait de la difficulté d'accès dans des conditions de ce type. Malgré la hauteur d'eau et le débit important, la température mesurée se trouve influencée par le rayonnement solaire lors de fortes insolation. Ce phénomène s'observe plus particulièrement lors de l'étiage estival (Photo Philippe Audra).

compensation des sondes immergées permet de facilement repérer ces portions de cavité et de cadrer les dynamiques des écoulements.

Les interférences liées aux matériels

Il s'agit d'éviter ou de limiter au maximum les dysfonctionnements possibles ou les interruptions de chroniques du fait des changements ou des manipulations des sondes. Des protocoles clairement définis doivent fixer les pas de temps de mesure et la pression minimale de déclenchement de la mesure. La date et l'heure de mise route de la sonde ainsi que sa pose sur le site doivent être répertoriées dans une base de données dédiée à la gestion du projet. Le nom des opérateurs doit également être spécifié ainsi que les données de paramétrage. Il sera procédé de manière identique lors des échanges de matériel et de la récupération des données.

Les changements de sonde doivent faire également l'objet d'une procédure d'étalonnage lors de leur intégration dans le réseau de mesure.

Dérive de l'horloge du logger

Pour évaluer la dérive éventuelle de l'horloge du capteur, il est indispensable de noter l'heure d'installation de la sonde sur le site de mesure. Lors de la récupération des données, l'heure d'arrêt du logger sera également notée pour chaque capteur. Dans le cas d'un site avec un décalage horaire, il faut préciser s'il s'agit de l'heure du pays de mesure ou s'il s'agit de l'heure programmée depuis l'ordinateur qui reste souvent dans le fuseau français (GMT +2). Une précaution similaire est à prendre pour les chroniques longues avec les changements horaires liés aux passages des heures d'hiver et d'été.

À partir d'une lecture manuelle des temps de démarrage et d'arrêt, il est possible d'évaluer la présence d'une dérive linéaire que l'on pourra corriger, ou non linéaire, si la chronique présente des lacunes.

Inertie thermique du logger

Au démarrage de l'opération, il faut en général une dizaine de minutes pour que l'ensemble de la sonde soit à la température du milieu. Une fois celle-ci acquise, le capteur est plus facilement à même d'enregistrer les changements de température qui interviennent au cours de la période de suivi. Le délai pour compenser l'inertie thermique est ensuite réduit à des valeurs comprises entre 3 et 5 minutes.

La purge de la mémoire

Il est impératif d'installer un protocole strict de mise en route de la sonde, en effet les données d'une nouvelle série de mesures viennent se réécrire sur d'autres déjà enregistrées. Si une coupure bien nette entre deux campagnes, n'est pas faite, il arrive que des données antérieures se retrouvent dans la nouvelle

série. Le cas est rare, mais a déjà été rencontré à plusieurs reprises.

Pour éviter cela, après les récupérations des données, il faut paramétrer, pour les sondes Sensus Ultra, la pression de déclenchement de la sonde à une valeur élevée, 2 500 hPa par exemple, à l'aide du logiciel Sensus manager. La sonde se met alors en repos. Ensuite, si l'on doit reprendre une nouvelle série de mesures, il faut modifier la pression de déclenchement à partir d'une valeur basse, 500 hPa, pour que la sonde mesure en continu, quelle que soit l'altitude du lieu et la profondeur d'immersion.

Cette procédure permet d'installer correctement le protocole de démarrage de mesures à partir d'une nouvelle série enregistrée.

Nettoyage et entretien des sondes de mesure

Après de longs séjours dans l'eau, la sonde se recouvre de dépôts, carbonatés principalement, ou bactériens, qui vont finir par interférer sur les performances de mesure des capteurs et gêner considérablement les connexions avec les interfaces de gestion des données et des mesures. Il en résulte très souvent, des sauts de pression, des oscillations aberrantes suivant des séries régulières ou non ou des lacunes de données. Il est donc nécessaire de tremper la sonde dans une solution acide relativement diluée pour éliminer les encroûtements d'origine chimique ou bactérienne. Le vinaigre blanc qui est un produit d'usage facile et économique, donne de bons résultats. Les autres acides doivent être fortement dilués pour éviter des dommages aux capteurs (Figure 7).

Il faut éviter l'utilisation de matériels abrasifs qui vont rayer les surfaces et favoriser l'accroche des matières en solution lors des usages suivants.



Figure 7 - Sondes fortement incrustées après une campagne de mesure à la goule et l'évent de Fousoubie. La sonde de gauche était positionnée à l'entrée du système à la base des puits dans la goule. Celle de droite était à l'émergence dans le siphon A de l'évent. Pour récupérer les données, un nettoyage important a été entrepris pour dégager les trois vis de contact.

DISCUSSION SUR LES MATÉRIELS ET LEUR MISE EN ŒUVRE

Le choix des équipements à mettre en œuvre est d'une grande importance pour assurer la pertinence des mesures et en tirer le meilleur parti pour l'interprétation des données recueillies. L'utilisation de stations de mesure avec sonde et data loggers pour le suivi de paramètres hydrologiques de surface pose de fréquents problèmes dans les grottes du fait des taux d'humidité importants et de la condensation que l'on y rencontre. Cela affecte les connexions, les circuits électroniques et les mémoires lors de campagnes de mesures en continu sur des périodes plus ou moins longues et ce malgré les précautions qui peuvent être mises en œuvre. Comme le montre la revue des matériels faite dans cet article, il n'y en a malheureusement que très peu qui sont adaptés aux contraintes du milieu souterrain pour réaliser des mesures fiables, de longue durée, avec une réserve d'énergie suffisante et en capacité de résister aux processus de corrosion ou de dépôt. Les sondes présentées dans cet article ont l'avantage d'une longue autonomie et d'une fiabilité suffisante pour être mises en œuvre dans le cadre d'une campagne de mesures.

La mise en œuvre d'un réseau de mesures dans ce contexte doit répondre à des questionnements précis par rapport à la compréhension d'une dynamique karstique ou hydrogéologique, un fonctionnement structural à l'échelle d'un réseau spéléologique ou d'un système karstique. Pour cela une méthodologie stricte, cherchant l'efficacité doit être mise en place. Dans cette perspective, l'étalonnage des instruments est une condition indispensable pour garantir la qualité des analyses et des traitements des données. Au moment de l'installation du réseau de mesure, la vérification de la réserve d'autonomie des sondes et leur installation de manière efficace et fiable sont essentielles pour des suivis de cycles hydrologiques. Cela est d'autant plus important lorsqu'il s'agit de sites lointains et d'accès difficiles ou restreints à certaines périodes du fait des niveaux d'eau, comme c'est souvent le cas pour le suivi de la zone épi-phréatique du karst. Dans ce contexte, il est utile de prévoir une redondance de l'équipement de mesure pour garantir le bon résultat d'un cycle de suivi.

Il est nécessaire d'avoir conscience des phénomènes d'inertie thermique qui affectent les sondes lorsque l'on travaille avec des temps d'acquisition très courts (inférieurs à la minute). Si les variations de pression sont enregistrées instantanément, la température se trouve influencée par l'inertie thermique relative au corps de la sonde. Dans le cas des Sensus Ultra Reefnet™, le corps en résine demande un laps de temps d'au moins 6 mn pour se trouver à l'équilibre thermique avec son milieu ambiant. Ce phénomène est également constaté en biologie marine dans le cas de suivi de mammifères marins en plongée (Robinson *et al.*, 2008).

La précision pour la mesure de hauteur d'eau de certains types de sonde est obtenue par la réduction des plages de mesure des capteurs de pression qui sont

calibrés pour une optimisation dans une fourchette de quelques mètres. Ce type de matériel est intéressant pour des suivis fins de piézomètres ou de comportement d'aquifères dans les contextes d'étiage.

Le suivi des variations des hauteurs et des températures d'eau reste un moyen simple, d'une grande facilité de mise en œuvre et adapté à de nombreuses situations pour rendre compte de la dynamique d'un karst (Palmer, 2007). Cependant, la méthodologie doit être rigoureuse pour assurer la fiabilité des mesures et la pertinence des données acquises. L'intérêt principal porte surtout sur le suivi en continu des étiages et les modalités de la recharge d'un système aquifère après la période d'étiage.

Il s'agit d'une approche méthodologique qui est utilisable dans des contextes karstiques très variables. Le couplage entre l'exploration spéléologique avec la documentation du réseau de conduits et le suivi en continu sur un cycle hydrologique permet une caractérisation avec une bonne résolution des systèmes aquifères à la taille et aux fonctionnements très divers. La démarche d'un réseau dense de mesure au sein du système hydrogéologique montre actuellement toute son importance pour aborder les suivis des crues extrêmes et surtout des étiages. Cela permet de pouvoir identifier avec précision les zones de stockage et les dynamiques d'échanges que ne permettent pas les approches en boîtes noires du fait des faibles flux en jeu qui ne sont pas significatifs dans le contexte d'une approche analytique mathématique. Dans les stratégies de modélisation, cette approche est un moyen de disposer de chroniques longues avec la possibilité d'identifier des boucles ou des repères pour caler le modèle à partir du moment où l'on aborde des systèmes binaires ou des aquifères multicouches (karst sous couverture, hypogène, etc.).

Ces approches ont été utilisées pour l'étude de nombreux systèmes karstiques tant en France qu'à l'étranger. Cela a apporté des éléments de compréhension pour la définition du fonctionnement des aquifères, les évolutions du système spéléologique et pour la structuration de la poursuite des études avec des questionnements et des méthodologies clairement identifiés.

Ainsi, un travail important a été conduit dans un contexte de karst méditerranéen en Ardèche, sur le système spéléologique de Foussoubie, dans les gorges de l'Ardèche et dans le réseau de la grotte de Saint-Marcel (Cailhol, 2014, 2016 ; Debourg, 2015 ; Jaillet *et al.*, 2012 ; Sadier, 2013), et dans l'Hérault pour le système spéléologique du Rautély (Cailhol *et al.*, 2012).

Dans le massif du Jura, cela a été un élément déterminant pour la compréhension du fonctionnement de l'aquifère complexe du système de la Creuse à Blamont dans le Doubs et pour l'exploitation et la gestion de la ressource en eau correspondante (Cailhol, 2009).

Dans un contexte de karst de montagne, des travaux conséquents d'instrumentation et de suivi ont été réalisés dans les Alpes de Haute-Provence, sur le système de la source du Coulomb et de la grotte des Chamois (Audra *et al.*, 2016, Audra et Lismonde, 2017), dans les Pyrénées sur le système spéléologique d'altitude complexe de Cottiella (Gayet, 2016).

En Algérie cette méthodologie a été mise en œuvre sur le système de Bou Akous dans un contexte de karst en milieu aride afin de définir les dynamiques de recharge et de fonctionnement de l'aquifère associé à la grotte (Cailhol *et al.*, 2016).

Au Laos, dans un contexte de *baseleveled corrosion plains* caractéristique des karsts tropicaux de l'Asie du sud-est, le suivi du réseau de Konglor Natane et de la rivière Hinboun dans la province de Khammouane, a mis en évidence le fonctionnement de l'aquifère karstique et des systèmes de drains interconnectés qui se

mobilisent au fur et à mesure de l'installation du débit d'étiage. Cette étude s'inscrivait dans un contexte plus large de projet de développement territorial porté par l'association Tetraktys (Cailhol, 2017).

Grâce à la facilité de mise en œuvre de ces équipements et à partir d'une méthodologie rigoureuse, il est possible d'obtenir des données à même de contribuer à une analyse fine des dynamiques hydrogéologiques et à la compréhension de l'organisation et de la structuration des systèmes karstiques et spéléologiques. Cela constitue une démarche essentielle pour aborder de manière pertinente la complexité des relations en jeu et permet de contribuer à l'alimentation des métadonnées nécessaires pour la constitution d'archives environnementales et pour les travaux de modélisation que ce soit pour l'analyse fonctionnelle ou la gestion des aquifères et des milieux naturels.

Remerciements

L'auteur adresse tous ses remerciements à Philippe Audra, Bruno Arfib et Stéphane Jaillet pour les discussions et les échanges entretenus depuis plusieurs années sur ces questions de mesures et d'équipements.

BIBLIOGRAPHIE

- AUDRA P., NOBECOURT J.C., BIGOT J.Y., 2015. Sixième camp international d'exploration « Chamois 2014 ». *Spelunca*, 138, 31-40.
- AUDRA P., LISMONDE B., 2017. Dynamique des crues et mises en charge à la source du Coulomp. 16^{ème} Rik-Rak - Saint-Christol 2017 (Alpes de Haute-Provence).
- CAILHOL D., 2010. Fonctionnement hydrologique du Puits de Vallon de Creuse. Rapport d'étude Syndicat intercommunal des eaux d'Abbéville, 39 p.
- CAILHOL D., 2012. Étude spéléologique du système du Rautély, essai de caractérisation des relations entre les différentes cavités du système par une approche croisée des observations spéléologiques, hydrogéologiques et biospéologiques. Rapport d'étude, Parc naturel régional du Haut Languedoc, Fédération française de spéléologie, 35 p.
- CAILHOL D., 2014. Documentation du fonctionnement des différents aquifères et systèmes karstiques des Gorges de l'Ardèche. Rapport d'étude, Comité départemental de spéléologie de l'Ardèche, 46 p.
- CAILHOL D., 2016. Le fonctionnement hydrogéologique du réseau de Saint-Marcel, Exploration, documentation et suivi des variations de hauteur et de température de l'eau. Rapport d'étude, Comité départemental de spéléologie de l'Ardèche. 28 p.
- CAILHOL D., AUDRA P., ARFIB B., JAILLET S., BAALI F., CHELIH F., FEHDI C., BENHAMMADI H., MOUCI R., 2016. Storage in cave master drain and flood response: The Bou Akouss Cav, Tebessa (Algeria). *In Karstology in Arid Regions*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 24-31.
- CAILHOL D., 2017. Étude environnementale de la grotte de Konglor. Rapport d'étude association Tetraktys – Agence française de développement, 37 p.
- DEBOURG A., 2015. Caractérisation des aquifères de l'Ardèche et médiation scientifique. Mémoire de master Eaux Souterraines, Université Grenoble - Alpes. 37 p.
- GAYET J.C., 2016. L'observatoire hydrospéléologique du Cottiella. *Spelunca*, 144, 14-20.
- JAILLET S., CAILHOL D., ARNAUD J., ASTRADE L., BELINGARD C., BOCHE E., CORNILLON T., COUCHOUD I., DUGUET R., FRANCK N., GAUCHON C., HELLSTROM J., LE ROUX P., MONTEIL P., PEYRONEL O., PONS - BRANCHU E., SADIER B., THOMAS M., 2012. Les crues du système karstique de Foussoubie, Ardèche, France. *Collection Edytem*, 13, 115-138.
- LEROY M., 2000. Estimation de l'incertitude de mesure des précipitations. Météo France, Technical report, DSO, 13 p. ; <http://ccrom.meteo.fr/ccrom/IMG/pdf/note42-3.pdf>.
- LISMONDE B., MOREL L., BERTOCHIO P., 2008. Hydrologie du Dévoluy : la Souloise, les Gillardes et le puits des Pans. *Karstologia*, 33-44
- MOREL L., 1996. Le Lurographe, étude de la crue du 22 avril 1995 (réseau de la Luire, Saint-Agnan-en-Vercors, Drôme). *Karstologia*, 27, 21-26.
- MOREL L., JAILLET S., Delannoy J.J., 2006. Les mises en charge du réseau de la Luire (Vercors, France) : enregistrements et implications géomorphologiques. 8e Colloque d'Hydrogéologie en Pays Calcaire Neuchâtel, Suisse.
- PALMER A.N., 2007. Cave geology. CaveBooks, Dayton, 100-112.
- PAUTHIER B., BENJAMIN BOIS B., CASTEL T., RICHARD Y., 2014. Note technique d'implantation d'un réseau de pluviomètres en terrain viticole sur la Côte de Beaune (France). *Climatologie*, 11, 34-46.
- ROBINSON P.W., VILLEGAS-AMTMANN S., COSTA D.P., 2008. Field validation of an inexpensive time-depth recorder. *Marine Mammal Science*, 25(1), 199-205.
- SADIER B., 2013. 3D et géomorphologie karstique. La grotte Chauvet et les cavités des gorges de l'Ardèche. Thèse de Doctorat Géographie, Université de Savoie, 485 p.