

“Eaux souterraines” un dispositif éducatif autour du karst

Exemple du Régaie de Néoules, Var

par Bruno ARFIB¹, Fabrice MOURAU², Thierry LAMARQUE³ et Denis LATY⁴

Cet article présente le dispositif éducatif « Eaux souterraines » mis en place dans un réseau de collèges du Var et des Bouches-du-Rhône. Dans le cadre d'un partenariat, les élèves découvrent le karst sur le terrain, étudient l'écoulement de l'eau souterraine, et transmettent leurs connaissances acquises. Pour illustrer les résultats préliminaires obtenus sur le suivi d'une cavité dans le cadre du projet, les données du Régaie de Néoules (Var) sont présentées et interprétées succinctement. En effet, c'est bien de spéléologie et de pédagogie dont parlent ces quelques pages. Cet article a pour objectif de susciter la naissance de nouveaux projets du même type. Il s'adresse aux spéléologues, aux professeurs, aux collectivités territoriales, aux universitaires, et à tous les acteurs (associatifs ou institutionnels) en lien avec le terrain et la jeunesse.

Dans la grotte des Rampins (Méounes-les-Montrieux, Massif Saint-Clément, Var), les élèves de collège observent les parois, mesurent les coups de gouges et prennent des notes au cours d'une sortie organisée dans le cadre du dispositif « Eaux souterraines ». Ils mettront leurs données en commun et modéliseront le paléo-débit sur ordinateur en classe. Cliché F. Mourau et élèves du collège Pierre de Coubertin, Le Luc-en-Provence, 13/12/16.

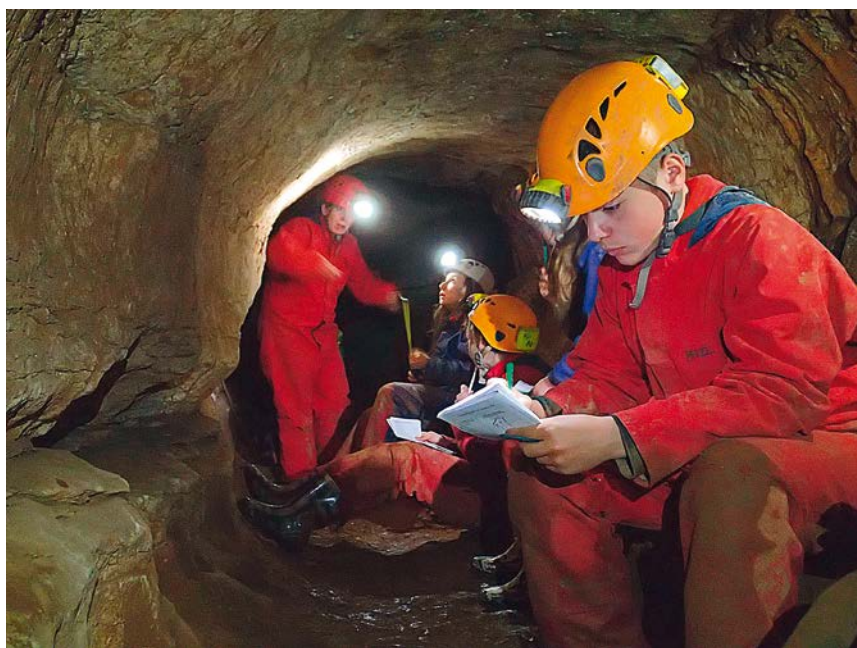
1. Le dispositif « Eaux souterraines » : qu'est-ce que c'est ?

Le dispositif « Eaux souterraines » est un projet collaboratif autour du karst à l'attention des élèves de collège et transposable au lycée. Le dispositif favorise la découverte du monde souterrain par les élèves et leurs professeurs, au contact

de spéléologues et de scientifiques, dans un cadre inter-académique. Un appui technique et éducatif est mis à disposition pour développer des supports pédagogiques en classe et sur le terrain. Des données physiques sont acquises par des sondes de mesure automatiques sous terre, permettant l'enregistrement au cours du temps des variations de l'eau souterraine. L'objectif est de proposer un travail pluridisciplinaire autour de l'eau, des grottes et plus largement du karst. Toutes les disciplines scolaires peuvent s'intégrer au dispositif « Eaux souterraines ».

2. Pourquoi avoir choisi le karst comme objet d'étude ?

L'environnement quotidien des élèves en Provence est fait de calcaires, de grottes, de sources, de gorges, de falaises... C'est aussi l'environnement familier de nombreux élèves à travers la France lorsqu'ils vivent en région karstique. Le karst se développe dans les roches carbonatées (principalement les calcaires et dolomies). C'est un ensemble de formes caractéristiques observables en surface et sous terre, du fait de la dissolution de la roche. Les grottes sont les formes les



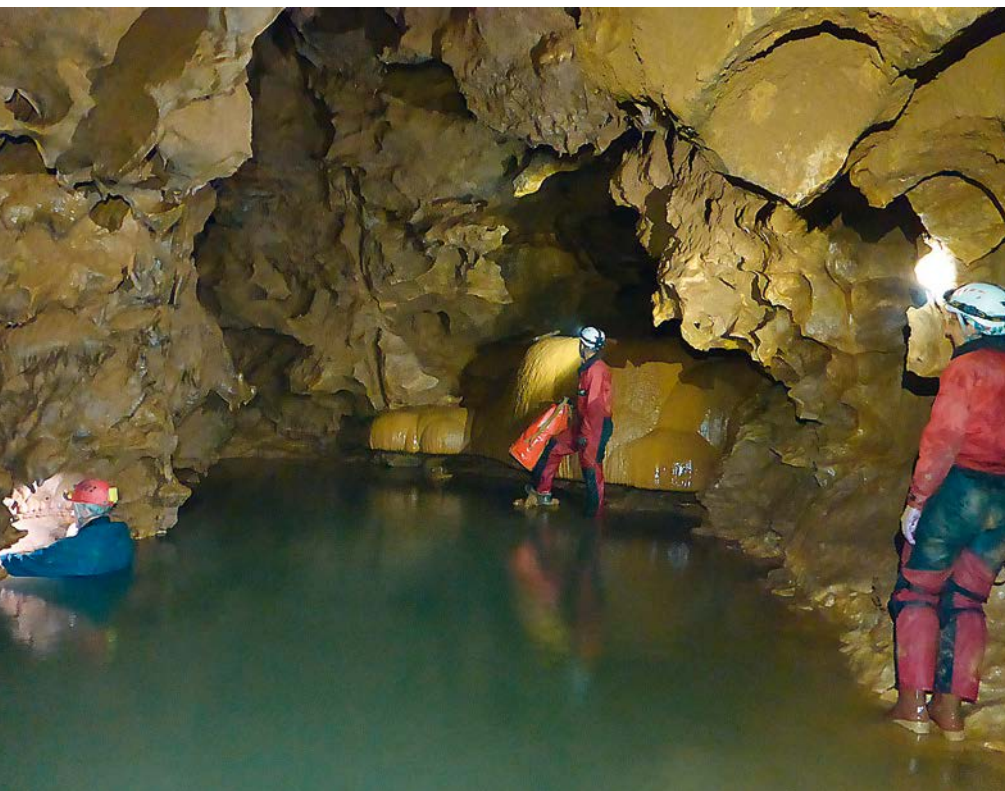


La source temporaire de la Baume de Néoules se trouve à 1 km de l'entrée du Régaïe de Néoules. Elle draine, comme le Régaïe, le massif Saint-Clément (Var). À sec, la Baume de Néoules donne accès à un réseau karstique en partie exondé et en partie noyé. Cliché T. Lamarque, en eau le 22/11/16, à sec le 24/11/16.

plus « classiques » pour illustrer le karst au grand public, mais les spécialistes sauront montrer une multitude d'autres formes karstiques qui façonnent le paysage. C'est également un milieu naturel où l'eau de pluie ou l'eau des rivières va s'infiltrer puis s'écouler jusqu'à une source. Enfin, le karst est explorable par l'homme, par l'intermédiaire de visites spéléologiques. De nombreuses observations sont donc possibles *in situ*, et ont depuis plus d'un siècle été inventoriées par

les spéléologues (MARTEL, 1894). Le karst constitue donc une interface entre l'atmosphère, l'eau souterraine et les rivières de surface. Il est utilisé ici comme support pédagogique à l'étude du cycle de l'eau en terrain calcaire. Son étude s'intègre parfaitement dans les problématiques de développement durable et de prise en compte des interactions entre l'homme et le milieu naturel (risque inondation, gestion de la ressource en eau potable).

Un des passages aquatiques de la grotte du Régaïe de Néoules (non visité lors des sorties terrain avec les élèves de collège !). Le niveau d'eau est ici constant en dehors des périodes de crues, formant un petit lac qu'il faut traverser lors de l'exploration spéléologique. En crue, l'intégralité de la galerie est noyée, l'eau circule en provenance du siphon 1. Cliché B. Arfib, D. Laty, P. et S. Terrier, 15/08/2016.



3. Un partenariat au cœur du dispositif : l'apport de chaque partenaire

Au cœur du dispositif « Eaux souterraines » se trouve un partenariat élaboré année après année, qui s'enrichit en permanence depuis 2011. Actuellement, en 2016-2017, huit établissements du Var et des Bouches-du-Rhône (collèges ou lycées) participent au dispositif (figure 1).

Le dispositif est coordonné par un enseignant du collège Pierre de Coubertin du Luc-en-Provence, et validé par la DAAC (Délégation académique à l'éducation artistique et culturelle) de l'académie de Nice et la DSDEN du Var (Direction des services départementaux de l'Éducation nationale). L'université Aix-Marseille (AMU, laboratoire CEREGE) apporte son soutien scientifique. L'association Spélé-H₂O apporte un soutien technique sur le terrain et encadre les sorties scolaires en milieu souterrain. Les comités départementaux de spéléologie du Var et des Bouches-du-Rhône mettent à disposition des données de terrain et participent aux observations environnementales, en lien avec l'université et Spélé-H₂O.

D'autres partenaires mettent à disposition des données ou des compétences techniques (par exemple le BRGM, le CEA, Syera, Véolia, la ville de Nans-les-Pins, SIAE Sainte-Baume, Ceneau).



Dans la grotte des Rampins, les élèves de collège s'initient à la topographie spéléologique au cours d'une sortie dans le cadre du dispositif « Eaux souterraines ». Ils observent, mesurent les longueurs, directions et pentes, et notent sur le terrain. Ils calculeront et dessineront en classe. Cliché F. Mourau, 13/12/16.

↳ Lors de la sortie sur le terrain du dispositif « Eaux souterraines », les élèves observent également l'environnement karstique de surface. Ici, ils mesurent la conductivité électrique et la température de l'eau d'une source du massif Saint-Clément ; ils compareront ensuite cette valeur avec celles enregistrées par la sonde automatique dans le Régaie de Néoules (Var) et celles des autres sources drainant le massif. Cliché F. Mourau, 08/12/16.



4. Que font les élèves quand ils participent à ce dispositif ?

Le dispositif « Eaux souterraines » repose sur trois piliers :

(1) TERRAIN ET ÉCHANGE

Les élèves et leurs professeurs vont découvrir le milieu naturel par des sorties de terrain en surface et dans des grottes. Ils rencontrent les partenaires et découvrent des métiers.

(2) DONNÉES

Des sondes de mesure autonomes (pression, température, conductivité électrique) permettent de suivre l'évolution de l'eau souterraine dans des grottes et des sources, en fonction des pluies (pluviomètres). Ces données sont mises à disposition. Les élèves acquièrent des données complémentaires ponctuelles (géomorphologie, pluviométrie). Ils croisent les données, analysent le fonctionnement du milieu naturel et discutent des problématiques sociétales.

(3) CONNAISSANCE ET COMMUNICATION

Les connaissances acquises sont valorisées sur divers supports de communication, permettant aux élèves d'exposer leurs acquis et résultats à travers des concours scientifiques (par exemple C-Génial), des posters, présentations orales, sites Internet. Des exemples sont

disponibles sur les sites Internet du projet. Une vidéo de neuf minutes illustre admirablement ce travail, à voir sur :

<https://youtu.be/AD3dJhFFW4Y>

À travers ces trois piliers, toutes les disciplines sont concernées par le dispositif, aussi bien les disciplines scientifiques que littéraires ou techniques. À ce titre, le dispositif est devenu un EPI (enseignements pratiques interdisciplinaires) à la rentrée 2016 et les élèves peuvent choisir de présenter leur travail pour l'oral du

diplôme national du Brevet en troisième. Les élèves du collège du Luc-en-Provence, à l'initiative du dispositif dès 2011, ont par exemple : réalisé des maquettes de l'écoulement de l'eau souterraine en technologie, écrit un guide sur les grottes de la région en allemand, tenu un blog en anglais, géré les données et fait des graphiques dans un tableur, étudié le cycle de l'eau et les paysages karstiques en SVT... Un article est paru dans *Spelunca* en 2013 sur des résultats acquis dans la grotte des Rampins (AUDIBERT *et al.*, 2013). Le détail des entrées du programme de collège en lien avec le dispositif « Eaux souterraines » est donné dans l'article de *Karstologia* n° 66.



Figure 1 : Localisation des établissements scolaires, des cavités et des sources suivies dans le cadre du dispositif « Eaux souterraines » en 2016-2017.

5. Les premiers résultats obtenus sur le suivi de la grotte « Le Régaie de Néoules (Var) » : comment cette grotte peut-elle se transformer en source ?

Le Régaie de Néoules est une grotte « école » située dans le Var (figure 1), très souvent visitée comme une cavité de découverte de la spéléologie. Cette grotte a la particularité de s'envoyer durant certains événements pluvieux intenses, et son entrée spéléologique devient alors une source crachant un débit de plusieurs centaines de litres par seconde. Elle présente donc deux avantages majeurs : (1) elle est facilement visitable avec un groupe, sans risque s'il ne pleut pas, pour illustrer le karst ; (2) le passage de l'eau dans la grotte lors de pluies peut être facilement enregistré avec des capteurs de pression pour étudier les modalités d'écoulement dans le karst. La grotte a un développement d'environ 500 m et se termine sur un siphon (appelé le siphon 1,



Relève des données sur le terrain, au siphon 1 de la grotte du Régaie de Néoules (var). L'ordinateur permet de récupérer les données de la sonde CTD posée sur le socle. La sonde, paramétrée pour enregistrer les données au pas de temps de quinze minutes, peut enregistrer de manière autonome les données de conductivité électrique, température et pression pendant plusieurs mois. Cliché B. Arfib, 15/08/16.

figure 2). Le siphon 1 a été exploré par les plongeurs-spéléologues et donne accès à une succession de galeries exondées entrecoupées de siphons sur plusieurs centaines de mètres (exploration toujours en cours). L'envolement de la cavité et la montée de l'eau ont été exceptionnellement observés entre le 23 et le 25 avril 1995 par quatre spéléologues qui ont été surpris par une crue et bloqués durant deux jours, réfugiés dans une partie haute de la grotte. Les élèves ont donc cherché à comprendre si ce phénomène de montée de l'eau dans la grotte existe encore de nos jours, jusqu'à quelle hauteur, et dans quelles conditions météorologiques.

Dans cet article nous proposons une synthèse des premiers résultats acquis entre octobre 2014 et février 2016 par une sonde CTD (sonde CTD : conductivité électrique, température, pression) enregistrant les valeurs toutes les quinze minutes dans le siphon 1. Les résultats sont présentés en détail dans un article qui paraîtra dans *Karstologia* n° 66, dont une version préliminaire est d'ores et déjà disponible en téléchargement (voir le lien développé donné à la fin de cet article).

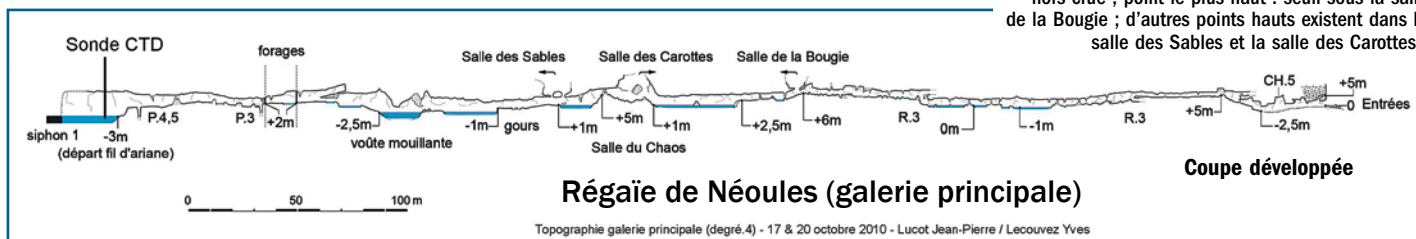
Le siphon 1 du Régaie de Néoules en étiage, lorsque le niveau est constant. Deux sondes de mesure autonomes sont installées dans des tubes pvc fixés à la paroi. Les parois sont naturellement sculptées par de larges coups de gouges et des formes émoussées, traduisant des périodes d'écoulement et des périodes de stagnation de l'eau. Ici le niveau d'eau peut monter de plus de 20 m en crue. Cliché B. Arfib, Patrice Cabanel et étudiants Master GERINAT, 21/01/2017.

Quand et jusqu'à quelle hauteur le niveau d'eau monte-t-il dans la grotte du Régaie de Néoules ?

Le capteur de pression installé dans le siphon 1 permet de quantifier les variations du niveau d'eau à 500 m de l'entrée. Les résultats sont donnés sur la figure 3. Le niveau d'eau est constant lorsqu'il ne pleut pas. Au contraire, durant les pluies, le niveau d'eau varie très rapidement, aussi bien en montée de crue qu'en descente. Sur un an et demi de mesures, le niveau maximal mesuré a atteint quasiment vingt mètres (en novembre 2014 durant des pluies extrêmes ayant par ailleurs provoqué des inondations dans le Var). La vitesse de montée du niveau du siphon est variable en fonction des crues, entre 77 cm et 4,6 m par heure. Les valeurs de vitesse de descente de l'eau du siphon 1 sont beaucoup moins variables d'une crue à l'autre que les vitesses de montée ; ces valeurs varient entre 27 cm et 91 cm par heure.

La topographie de la cavité en coupe (figure 2) montre qu'un dénivelé d'environ neuf mètres existe entre le niveau d'eau habituellement observé dans le siphon 1 à l'étiage et le passage spéléologique le plus haut (sous la salle de la Bougie) sur le cheminement principal. La figure 4 donne le détail des crues du mois de novembre 2014, ainsi que les observations faites

Figure 2 : La coupe développée de la grotte du Régaie de Néoules entre l'entrée et le siphon 1. L'altitude des points caractéristiques le long du cheminement spéléologique principal est indiquée par rapport à l'entrée (point le plus bas : siphon 1 hors crue ; point le plus haut : seuil sous la salle de la Bougie ; d'autres points hauts existent dans la salle des Sables et la salle des Carottes).



à l'entrée de la grotte visuellement de manière ponctuelle (un figuré rond est dessiné sur l'abscisse lorsque l'entrée de la grotte est sèche, un signe + est dessiné lorsque l'eau s'écoule par l'entrée de la grotte). Ces données montrent que l'entrée de la grotte se transforme en source lorsque le niveau d'eau est suffisamment haut dans le siphon 1, autour de 9 à 10 m. Toute la partie basse de la cavité est noyée, et l'eau s'écoule à travers la cavité jusqu'à l'entrée spéléologique. Le détail de la figure 4 montre également que le niveau d'eau redescend dans la cavité dès le lendemain de l'arrêt des pluies (exemple des crues 1 ou 4), mais au contraire si la pluie persiste sur plusieurs jours le niveau d'eau reste haut (exemple des crues 3 et 4, ou des crues 5 et 6). L'ensemble des crues étudiées a permis de donner une valeur seuil de pluie pour transformer la grotte en source (la pluie est mesurée à quelques kilomètres de la grotte sur un pluviomètre autonome à augets). Les grandes crues, supérieures à 10 m au siphon 1, ont lieu après un cumul de pluie supérieur à 50 mm sur 48 heures, et quelques rares fois pour une pluie moins importante mais qui suit une période pluvieuse dans les deux jours précédents (exemples : 15/11/2014, 6/12/2014, 16/02/2015). Les grandes crues sont observées quelles que soient la période de l'année et les conditions hydrologiques initiales.

Pour aller plus loin dans la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de ce système karstique, les élèves ont proposé d'installer de nouveaux capteurs autonomes de pression le long du cheminement spéléologique. C'est ainsi qu'en novembre 2015, quatre capteurs de pression supplémentaires ont été installés (marque Reefnet, CDS 83), avec un pas de temps

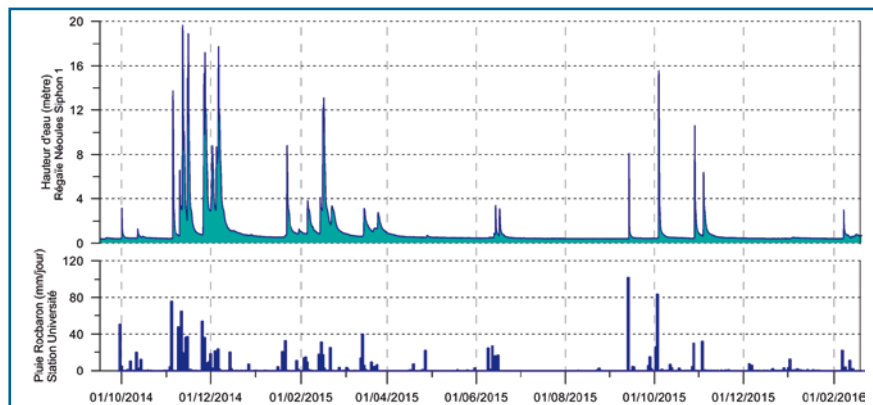


Figure 3 : Évolution du niveau d'eau dans le siphon 1 du Régaie de Néoules entre octobre 2014 et février 2016 (une mesure toutes les quinze minutes), et pluie journalière enregistrée à moins de 4 km de la grotte (à Rocbaron) sur un pluviomètre à augets. Les pluies de forte intensité génèrent systématiquement une crue dans la grotte.

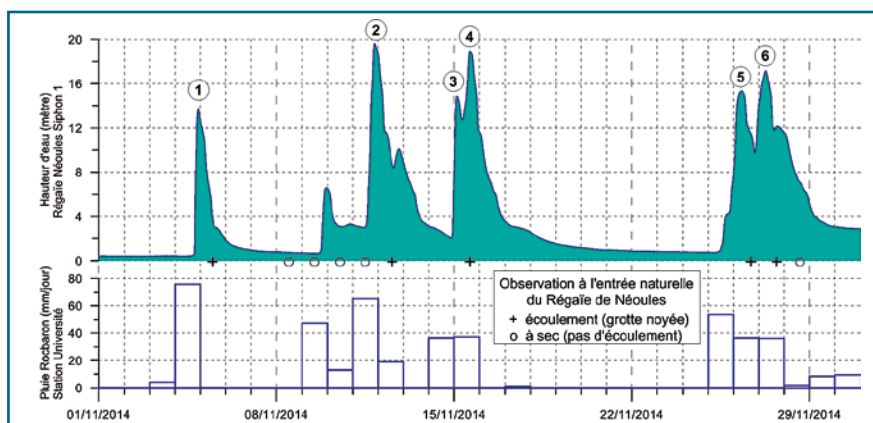


Figure 4 : Les crues dans le siphon 1 du Régaie de Néoules au cours du mois de novembre 2014 : pluie journalière à Rocbaron et niveau d'eau (une mesure toutes les quinze minutes). Des observations ponctuelles à l'entrée de la grotte indiquent si la grotte forme une source ou reste sèche. Six crues importantes sont enregistrées. Les variations du niveau d'eau sont très rapides, en montée de crue comme en décrue.

d'acquisition d'une minute pour pouvoir suivre l'avancée des crues entre le siphon 1 et l'entrée. Ces données seront interprétées par les élèves en 2017 (et les années suivantes !). D'autres capteurs de pression ont également été installés sur des sources ou dans des grottes aux alentours. Ils permettront d'étudier la réactivité des différentes cavités du massif Saint-Clément, et d'alimenter ainsi en données les différents établissements scolaires partenaires du projet (figure 1).



➔ Dans le Régaie de Néoules, l'eau souterraine s'écoule entre le siphon 1 et l'entrée spéléologique durant les périodes de crue. Les spéléologues empruntent les galeries karstiques se trouvant dans cette zone noyée temporairement (la zone épinoyée ou épiphréatique du karst). Tout le long du cheminement, les vasques sont remplies d'eau principalement issue de la dernière crue. Cliché B. Arfib et étudiants Master GERINAT, 21/01/2017.

☞ Installation d'une sonde de mesure autonome de la pression et de la température à la source temporaire de Fougély, drainant le massif Saint-Clément (Var). La sonde est protégée dans un fourreau fixé à la paroi. Les données sont relevées tous les 6 mois environ. Cliché L. Rossi et T. Lamarque, 11/12/15.



Rappelez-vous le secours spéléologique du 23 au 25 avril 1995 ! On peut maintenant comprendre

C'était il y a 22 ans environ, quatre spéléologues restaient bloqués par la crue dans le Régaïe de Néoules du 23 au 25 avril 1995. Les quatre malchanceux se sont trouvés bloqués par la montée de l'eau qui avait envahi la grotte alors qu'ils exploraient le secteur de la salle des Sables et de la salle des Carottes (figure 2). Ils se sont alors réfugiés dans la salle des Carottes, la plus haute. Ils ont vu monter le niveau d'eau d'une bonne dizaine de mètres, mais fort heureusement celui-ci s'est stabilisé puis est redescendu sans entrer dans la salle perchée. Comment nos données permettent-elles de comprendre ce qu'il s'est passé il y a 22 ans ? Nous avons repris les données météorologiques disponibles sur les stations Météo-France de la région (voir l'article de *Karstologia* n°66). Le 21 avril 1995, les stations de Toulon et du Castellet donnent respectivement 60 et 88 mm/jour de pluie. On peut en déduire que le Régaïe s'est alors ennoyé, mais comme la pluie cesse au bout d'un jour, le niveau de l'eau redescend dans la cavité et tout semble normal lors

Tableau 1: Les coordinateurs du dispositif « Eaux souterraines » depuis 2015

CONTACT	STRUCTURE	COMPÉTENCE
Fabrice Mourau	Éducation nationale, Collège Pierre de Coubertin, Le Luc-en-Provence	Éducation, coordination du projet
Bruno Arfib	Université Aix-Marseille, laboratoire CEREGE, OSU PYTHEAS	Hydrogéologie et risques naturels, karstologie, acquisition de mesure
Thierry Lamarque	Association Spéléo-H2O	Encadrement spéléologie, sensibilisation à l'environnement, acquisition de mesure
Denis Laty	Comité départemental de spéléologie du Var, Fédération française de spéléologie	Acquisition de mesure, observation de l'environnement

de l'arrivée des spéléologues le 23 avril. Ils pourront donc faire l'exploration. Mais les pluies reprennent le 23 avril et se poursuivent le 24 avril, avec un total qui dépasse 50 mm aussi bien à Toulon qu'au Castellet. La crue est donc revenue rapidement et le niveau d'eau s'est maintenu haut durant deux jours. Deux jours durant lesquels les spéléologues étaient bloqués (figure 5). Le matin du 25 avril, les plongeurs du spéléo-secours établissent le contact. L'entrée de la grotte a été agrandie en dégageant des blocs à la pelleteuse pour améliorer l'évacuation de l'eau souterraine. Il ne pleut plus, la décrue naturelle s'amorce et le soir même les naufragés sortent à l'air libre en marchant dans la grotte.

6. Conclusion : peut-on développer le dispositif « Eaux souterraines » dans toutes les régions karstiques de France ?

Oui ! Le dispositif « Eaux souterraines » est facilement transposable et adaptable à toutes les régions karstiques. D'ailleurs, d'autres initiatives existent, comme le projet « Eau secours, c'est urgent » dans l'Ain (BELLOD, 2016), le projet « Live on the karst » à Mende (JACQUET, 2016), et encore bien d'autres projets dont certains sont listés sur le site de la FFS (<http://ffspeleo.fr>). Le cœur de tels projets est le partenariat. Chacun de nous, spéléologue, enseignant, scientifique, encadrant, joue un rôle essentiel pour aider à former ces jeunes qui seront les citoyens de demain. Plus de détails sur le dispositif pédagogique et l'exploitation des données de la grotte du Régaïe de Néoules sont disponibles dans l'article ARFIB et MOURAU, *Karstologia* n° 66.



Figure 5 : extraits d'articles de journaux lors de la crue du 25 avril 1995 au Régaïe de Néoules qui bloqua pendant deux jours quatre spéléologues (Var Matin, Le Provençal, Le Méridional).

REMERCIEMENTS

Ce projet a bénéficié du soutien de nos infrastructures et de nos partenaires : CEREGE, directions des collèges Pierre de Coubertin et Jean-Giono, DSDEN 83, corps d'Inspection académique, DAAC Nice, PASIE, département du Var, association Spéléo-H₂O, Agence de l'Eau (études Karsteau et Dardennes), Comité départemental de spéléologie du Var (CDS 83) et des Bouches-du-Rhône (CDSC 13), Météo-France. Merci à tous les spéléologues pour leur aide précieuse sur le terrain, aux professeurs qui se sont engagés dans le dispositif et ont ainsi contribué à sa réussite, aux partenaires ayant fourni des données, à P. Maurel pour les coupures de journaux.

Bibliographie

AUDIBERT, E. ET 24 CO-AUTEURS (2013) : Étude du paléo-débit de la grotte des Rampins estimé grâce à la mesure de vagues d'érosion. - *Spelunca* n°132, p.37-40.
 ARFIB, BRUNO ; MOURAU, FABRICE (2017) : Le fonctionnement hydrogéologique d'une cavité sous climat méditerranéen comme appui à un projet pédagogique (Régaïe de Néoules -Var). - *Karstologia* n°66 (à paraître en 2017). Disponible sur www.karsteau.fr/telechargement/Article_EauxSouterraines_Hydrogeologie_Neoules_Arfib_Mourau_2016.pdf
 BELLOD, NATACHA (2016) : Eau secours, c'est urgent. - *Spelunca* n°144, p.46-48.

JACQUET, ALAIN (2016) : Site web du lycée Peytavin, Mende. Consulté le 29/12/16 : <http://lyceeypeytavin.com/karst/>
 FFS (2016) : Fédération française de spéléologie. Exemples de projets pédagogiques réalisés. Consulté le 29/12/16 : <http://ffspeleo.fr/espace-scolaire-exemples-175.html>
 MARTEL, E.-A. (1894) : *Les Abîmes*. - Paris. Delagrave. Disponible sur : <http://jubilotheque.upmc.fr/>

LIEN INTERNET VERS LE PROJET EAUX SOUTERRAINES : <http://www.karsteau.fr/karst/neoules.html>
<http://groundwaters.wikispaces.com>

1. Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, Coll. France, CEREGE, Aix-en-Provence, France. Contact : CEREGE, 3 place Victor Hugo, case 67, 13331 Marseille. Email : arfib@cerege.fr
2. Éducation nationale, collège Pierre de Coubertin, Le Luc-en-Provence, Académie de Nice.
3. Association Spéléo-H₂O, 405, avenue Bucarin, 83140 Six-Fours.
4. Comité départemental de spéléologie du Var.