



# Le fonctionnement hydrogéologique d'une cavité karstique sous climat méditerranéen comme appui à un projet pédagogique - Régaie de Néoules (Var)

Bruno Arfib, Fabrice Mourau

## ► To cite this version:

Bruno Arfib, Fabrice Mourau. Le fonctionnement hydrogéologique d'une cavité karstique sous climat méditerranéen comme appui à un projet pédagogique - Régaie de Néoules (Var). *Karstologia*, 2017, 66, pp.1-14. hal-01548267

**HAL Id: hal-01548267**

**<https://hal.science/hal-01548267>**

Submitted on 27 Jun 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Bruno ARFIB<sup>1</sup> et <sup>3</sup> et  
Fabrice MOURAU<sup>2</sup> et <sup>3</sup>**

(1) Aix-Marseille Université, CNRS,  
IRD, CEREGE UM34, ECCOREV,  
F-13545 Aix-en-Provence, France

(2) Éducation nationale,  
Collège Pierre de Coubertin,  
Académie de Nice

(3) Comité départemental  
de spéléologie du Var

arfib@cerege.fr,  
fabrice-benjami.mourau@ac-nice.fr

# Le fonctionnement hydrogéologique d'une cavité karstique sous climat méditerranéen comme appui à un projet pédagogique

## Régaïe de Néoules (Var)

**RÉSUMÉ :** La grotte du Régaïe de Néoules est une cavité horizontale du Var, d'environ 500 mètres de développement, qui se termine par un siphon au niveau d'eau variable en fonction des pluies. C'est une grande cavité classique en initiation spéléologique, située au nord de Toulon et dans la partie est du futur Parc naturel régional de la Sainte Baume. Cette grotte a la particularité de s'envoyer et d'être ainsi traversée par l'eau souterraine qui sort au niveau de l'entrée spéléologique pour former une spectaculaire source temporaire. Elle draine ainsi l'eau des précipitations tombées sur le massif calcaire et dolomitique du pilon Saint Clément. Ce massif et cette grotte/source illustrent parfaitement la diversité des formes karstiques et le cycle de l'eau en domaine carbonaté. C'est un support pédagogique idéal pour travailler sur l'eau, sur la fragilité de notre environnement et sur les risques naturels. Ce site a été choisi dans le cadre du projet « Eaux souterraines » à destination des élèves de collège. Ce projet s'appuie sur des mesures réalisées au sein de la grotte, par des enregistrements automatiques en continu de la hauteur d'eau, de la température et de la conductivité électrique du siphon du Régaïe de Néoules. Cet article décrit le projet Eaux souterraines démarré en 2014 et qui prend de l'ampleur d'année en année, en partenariat entre l'Université Aix-Marseille, l'Éducation nationale, le Comité départemental de spéléologie du Var et l'Association SpéléH2O. Les premières données acquises dans la grotte d'octobre 2014 à février 2016 sont présentées. Elles permettent de

quantifier jusqu'à quelle hauteur l'eau monte dans la grotte lors des épisodes pluvieux exceptionnels. La relation entre la pluie et le niveau d'eau est investiguée à différentes échelles de temps. L'analyse est complétée en discutant de l'origine de l'eau des crues en utilisant les variations de conductivité électrique et de température. Cet article offre un support aux données scientifiques mises à disposition des enseignants.

**MOTS-CLÉS :** éducation, cycle de l'eau, crue, sonde CTD, risque naturel.

**ABSTRACT :** HYDROGEOLOGICAL FUNCTIONING OF A KARST CAVE IN MEDITERRANEAN CLIMATE AS SUPPORT FOR AN EDUCATIONAL PROJECT (RÉGAÏE DE NÉOULES CAVE, VAR, SE FRANCE). This paper presents an educational project in France, using karst as a case study, in order to propose an interdisciplinary approach of geoscientific investigations. The cave "Régaïe de Néoules", located in south-east of France, in the Var department, is 500 meters long, more or less horizontal, quite easy to visit, and ends on a sump. This cave is often visited for a first karst experience in Provence. The water level of the sump is usually constant, except during high rainfall events, during which it can rise quickly. The cave can then be flooded. The water level increases, a high discharge runs through the cave, and the entrance then becomes a spectacular spring. This cave drains the groundwater recharged on the limestone and dolostone area of "Pilon Saint Clément". This hydrosystem, from the recharge area to the spring, is a good example of the karst landscapes and features, and of the water cycle in

carbonate environment. It's a good support for an educational project on water, on sustainable development, and on natural hazard. We chose this area to create a new educational project for middle school students, called "Groundwater" ("Eaux souterraines" in French), in partnership with the Aix-Marseille University, the National Education, the Speleology Federation, and a Speleological Association (Association SpéléH2O). The project offers three main attractions: (1) students are going on the field to visit karst (including the cave), (2) water data are recorded in-situ continuously in the sump, with a CTD probe (Electric conductivity, Temperature, Depth), (3) knowledge and skill are learned through an interdisciplinary approach in classroom. This paper presents the project, from birth in 2014 to adolescence in 2016. The time series is also presented. Data monitored during high floods shows how and why the water level at the sump varies in relation with the rainfall. A focus is done on the maximum level and the velocity rates of increasing and decreasing water levels. The electric conductivity and the temperature of the water are used to discuss the origin of the flood water. The conceptual model of the cave's hydrogeological functioning is tested and validated with rainfall data recorded 20 years ago, in April 1995, in order to explain why 4 cavers had been blocked in the cave by a flood. This paper aims at presenting the project and explaining how to use the data we can provide to teachers.

**KEYWORDS :** education, water cycle, flood, CTD probe, natural hazard.

## Introduction

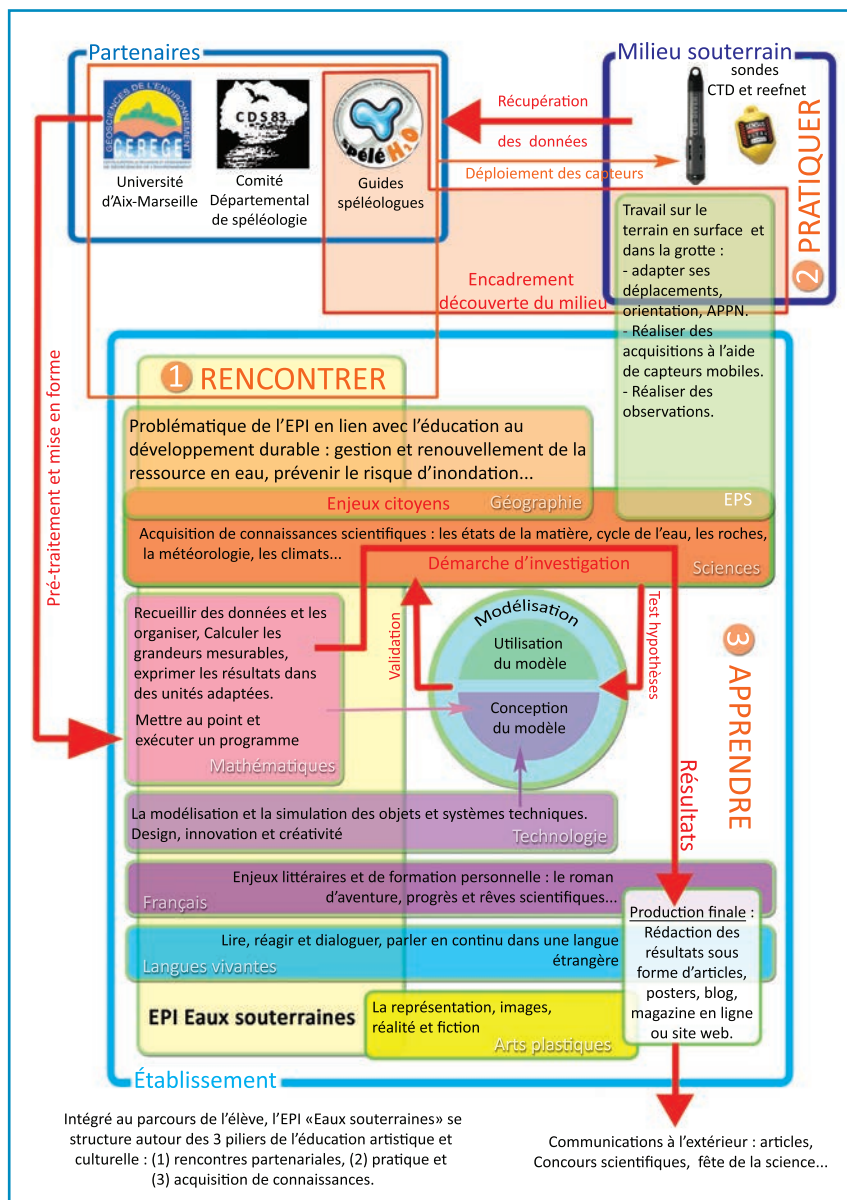
Le karst est un objet d'étude unique qui peut être investigué depuis la surface et en profondeur. C'est un hydrosystème particulier, où les vides karstiques de grandes dimensions donnent accès au cœur de l'aquifère, permettant ainsi de faire des observations visuelles et d'enregistrer des mesures quantitatives sur l'eau. Le karst se trouve également être un compartiment essentiel du cycle de l'eau dans les régions carbonatées, recevant les pluies qui le traversent et deviennent ainsi de l'eau souterraine avant de sortir au niveau de sources qui alimentent les cours d'eau de surface. En fonction des précipitations, le niveau d'eau dans le karst et le débit des sources sont variables, voire extrêmement variables. Le niveau d'eau et le débit, au sein du karst ou dans les rivières de surface qu'il alimente, sont deux paramètres essentiels dans l'étude des risques naturels. La zone épinoyée est une zone particulière de l'endokarst, située à

la limite entre la zone saturée et non saturée de l'aquifère. Dans cette zone où un réseau de conduits subhorizontaux peut se développer avec le temps [Audra & Palmer 2013], l'eau souterraine envahit les conduits karstiques de façon temporaire en fonction des conditions de recharge. Les crues se propagent et génèrent des mises en charges dans les conduits karstiques, c'est-à-dire des cycles d'augmentation du niveau d'eau puis un retour à l'état initial en fonction des précipitations et de la structure du karst.

Dans le sud de la France, sur le pourtour méditerranéen, les pluies de forte intensité sont une des caractéristiques du climat [Soubeyroux, 2011]. Ces pluies intenses, définies par une valeur seuil de l'ordre de 50 mm/jour à 100 mm/j [Météo-France, 2016a], ont lieu quelques fois dans l'année. D'autres événements encore plus intenses, les pluies méditerranéennes, appelées également par abus de langage les pluies cévenoles [voir par exemple Météo-France, 2016b], peuvent dépasser 100 mm/j avec des zones peu mobiles d'intensité encore plus forte. La figure 2 correspondant à l'événement pluvieux du 25 novembre 2014 illustre ce type d'événement météorologique extrême sur le Var, observé au cours de la période d'étude. Ces fortes ou très fortes intensités de pluie engendrent généralement des crues dévastatrices dans les cours d'eau, comme par exemple les catastrophes récentes dans le Var : Draguignan (15 juin 2010), La Londe les Maures (25 au 27 novembre 2014)... En domaine karstique, les circulations d'eau souterraine à travers le karst amplifient généralement les phénomènes de crues dans les cours d'eau, en ajoutant une quantité d'eau au ruissellement de surface. Les études menées en France par exemple sur le karst de Nîmes [Maréchal et al. 2008, Fleury et al. 2013], le Lez [Région de Montpellier, v. le numéro spécial *Karstologia* n°62, par exemple Fleury et al. 2015] ou Le Las [Région de Toulon, Arfib et al. 2016] montrent que la composante karstique dans les crues des cours d'eau n'est pas négligeable et doit être prise en compte pour une meilleure gestion du risque de crue.

Dans ce contexte, nous avons choisi le karst comme appui à un projet pédagogique interdisciplinaire intitulé « Eaux souterraines » à destination d'élèves de collège. L'objectif du projet est de créer une émulation intellectuelle des collégiens autour d'un objet d'étude, vu à travers le spectre de la dizaine de disciplines enseignées au collège (tableau 1, figure 1). L'objet Karst présente en effet de multiples points forts : produit et témoin de l'histoire de la Terre, il fait partie du cycle de l'eau, son fonctionnement actuel est lié aux conditions

Figure 1 : Le projet « Eaux souterraines » permet la collaboration de nombreuses disciplines d'enseignement autour d'un projet commun. The "Groundwater" project is a collaborative multidisciplinary educational project around the geosciences.



météorologiques, il est modélisable, on peut l'observer en surface et à l'intérieur au cours de sorties sur le terrain et spéléologiques. Structurant le paysage autour de l'établissement, il appartient au quotidien de l'élève et son étude permet d'initier une réflexion sur des questions sociétales en lien avec l'éducation au développement durable, comme l'étude du risque (crues) ou les enjeux liés à la ressource en eau potable. Le projet repose sur l'observation et l'acquisition de données hydrogéologiques au sein du karst, sur un cas d'étude situé dans le Var sous influence climatique méditerranéenne. Une première étude a été menée en 2012-2013 sur l'observation des vagues d'érosion (coups de gouge) dans la grotte des Rampins (Réseau de Planesselve) avec des élèves de 5<sup>ème</sup> [Audibert et al. 2013].

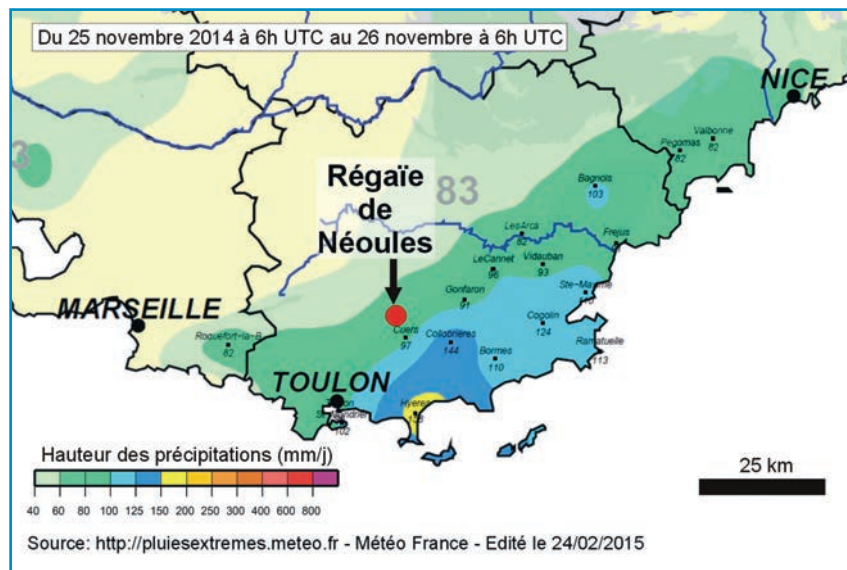


Figure 2 : Carte des hauteurs de précipitations mesurées sur le Var lors de l'épisode pluvieux méditerranéen du 25 novembre 2014 (entre le 25/11/2014 6h00 et le 26/11/2014 6h00). Source : <http://pluiesextremes.meteo.fr> (document édité le 24/02/2015 par Météo-France).  
*Map of rainfall quantity (with isohyet) above the studied area (Var département) during a mediterranean rainfall event recorded from 25th November 2014 6am to 26th November 2014 6am. Source : <http://pluiesextremes.meteo.fr> (edited 24/02/2015 by Météo-France).*

| Discipline                         | Entrées du programme                                               | Thèmes abordés                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Mathématiques</b>               | Organisation et gestion des données                                | Recueillir les données et les organiser (utiliser un tableur...)                                                                                                                                                           |
|                                    | Grandeurs et mesures                                               | Calculer les grandeurs mesurables ; exprimer les résultats dans des unités adaptées.                                                                                                                                       |
|                                    | Algorithmique et programmation                                     | Décomposer un problème en sous problèmes, écrire, mettre au point et exécuter un programme en réponse à un problème donné.                                                                                                 |
| <b>Français</b>                    | Enjeux littéraires et de formation personnelle                     | 5 <sup>ème</sup> : Le voyage et l'aventure, imaginer des univers nouveaux<br>4 <sup>ème</sup> : Informer, s'informer, déformer<br>3 <sup>ème</sup> : Progrès et rêves scientifiques                                        |
| <b>Langues vivantes</b>            | Lire, réagir et dialoguer, parler en continu                       |                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Arts plastiques</b>             | La représentation ; images, réalité et fiction                     | La ressemblance, le dispositif de représentation...                                                                                                                                                                        |
| <b>EPS</b>                         | Adapter ses déplacements à des environnements variés               | Activités physiques de pleine nature ou en reproduisant les conditions : course d'orientation, escalade, randonnée, kayak, sauvetage, VTT, ski ...<br>Prévoir et gérer son déplacement et le retour à son point de départ. |
| <b>Éducation morale et civique</b> | Expliquer le lien entre l'engagement et la responsabilité          | Les responsabilités individuelles et collectives face au risque majeur (inondation).                                                                                                                                       |
| <b>Géographie</b>                  | Thème 2 : Des ressources limitées, à gérer et à renouveler         |                                                                                                                                                                                                                            |
|                                    | Thème 3 : Prévenir les risques, s'adapter au changement global     |                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Physique-chimie</b>             | Organisation et transformations de la matière                      | Les différents changements d'état, solubilité, notions de molécules, atomes, ions...                                                                                                                                       |
| <b>SVT</b>                         | La planète Terre, l'environnement et l'action humaine              | Météorologie, exploitation et gestion des ressources, ères géologiques, impact anthropique...                                                                                                                              |
| <b>Technologie</b>                 | La modélisation et la simulation des objets et systèmes techniques | Analyser le fonctionnement et la structure d'un objet, identifier les entrées et sorties...                                                                                                                                |
|                                    | Design, innovation et créativité                                   | Réaliser, de manière collaborative, le prototype d'un objet communicant, Présenter à l'oral des solutions techniques...                                                                                                    |

Tableau 1 : Les entrées des programmes de l'Éducation Nationale et les thèmes abordés pouvant être traités à travers le projet « Eaux souterraines ». Extraits du programme de cycle 4 (BOEN spécial n°11, 2015).  
*Synthesis of the Programs given by the French ministry of national education related to the "Groundwater" project. The aims and the themes that can be worked on with the «Eaux souterraines» project.*

À la suite de cette première expérience réussie, le projet « Eaux souterraines » a démarré en 2014. Tout d'abord proposé à une classe de 4<sup>ème</sup>, il a ensuite été élargi à deux classes de deux collèges en 2015, et regroupe 9 établissements pour la rentrée 2016.

Une sonde qui enregistre toutes les 15 minutes la conductivité électrique, la température et le niveau de l'eau dans le siphon de la grotte « le Régaie de Néoules » (Var) a été installée depuis septembre 2014. La cavité choisie, de plus de 500 mètres de développement, présente la particularité d'être entièrement noyée durant certaines crues et se transforme alors en source de trop-plein. L'objectif du suivi hydrogéologique est de comprendre : (i) dans quelles conditions la grotte s'ennoe et jusqu'à quelle hauteur, (ii) dans quelles conditions un écoulement d'eau se met en place et pour quelle durée, (iii) si le fonctionnement de la grotte était le même il y a 21 ans à travers l'exemple d'une crue qui a bloqué durant deux jours des spéléologues en avril 1995.

Cet article est organisé en deux grandes parties. La première partie présente le projet pédagogique « Eaux souterraines » : comment l'Éducation nationale favorise l'innovation et l'expérimentation pédagogique, quels sont les objectifs poursuivis par l'équipe enseignante, quels sont les effets constatés sur les élèves et surtout comment le dispositif « Eaux souterraines » va s'intégrer à la réforme du collège tout en s'élargissant à l'échelle académique.

La seconde partie explique le fonctionnement hydrogéologique du Régaie de Néoules et illustre comment interpréter les données acquises. Cet article offre un support aux données scientifiques mises à disposition des enseignants.

## **I. Le karst : support d'un projet pédagogique**

### **A. Le cadre académique pour l'innovation pédagogique dans l'Éducation nationale**

Les enseignants de l'école secondaire organisent et mettent en œuvre les stratégies éducatives qu'ils jugent les plus efficaces pour leurs élèves. Travaillant dans le champ des programmes nationaux, ils s'appuient sur le projet d'établissement qui fixe les axes de développement de la politique éducative locale en fonction des points forts et des

faiblesses constatées. Chaque collège ou lycée optimise ainsi son fonctionnement en déployant des dispositifs spécifiques et adaptés à sa population scolaire. Ses heures d'autonomie lui permettent des dédoublements de classe, du co-enseignement ou la concertation des équipes pédagogiques.

Les dispositifs moins classiques relèvent de l'expérimentation pédagogique. Ils sont accompagnés par le PASIE (Pôle Académique de Soutien à l'Innovation et à l'Expérimentation). Cette structure associée au corps d'inspection recense les projets innovants, assure leur suivi, apporte des conseils et organise des rencontres permettant les échanges entre enseignants porteurs de projets.

### **B. Des classes bilangues à thématique scientifique à la naissance du projet « Eaux souterraines »**

L'expérimentation « classes bilangues à thématique scientifique » a débuté au collège Pierre de Coubertin du Luc en Provence dès la rentrée 2011. Il s'agit d'initier les élèves de sixième aux sciences sur le terrain afin de préserver l'envie d'apprendre et d'attiser leur curiosité scientifique. Nous pratiquons avec eux une pédagogie basée sur le volontariat dans des pôles d'activité toujours en relation avec les sciences mais déclinés en interdisciplinarité.

Le département du Var soutient depuis plus de vingt ans maintenant les initiatives pédagogiques en relation avec l'éducation au développement durable et ancrées sur des problématiques locales grâce aux classes environnement et territoires. Ce dispositif partenarial avec la DSDEN (Direction des services départementaux de l'Éducation nationale) soutient notre démarche en nous allouant une dotation nous permettant d'aller travailler sur le terrain.

Nous sommes engagés à suivre les élèves volontaires inscrits au sein de cette structure durant les quatre ans de leur cursus au collège. Le suivi de la cohorte permet la mise en cohérence verticale des parcours de l'élève (Citoyen, Avenir et Parcours d'Éducation Artistique et Culturelle) sur une thématique choisie dès la sixième puis déclinée progressivement jusqu'en troisième. La continuité du suivi pédagogique est un axe fort du projet, elle permet à la fois la facilitation des échanges avec les familles qui gardent les mêmes interlocuteurs et un cadre rassurant pour les enfants qui

s'installent dès la sixième au sein d'un processus durable qui va accompagner leur cursus de collégiens.

Dans le cadre de cette initiative, un partenariat multilatéral a débuté en 2012 entre le collège Pierre de Coubertin, les spéléologues professionnels de l'Association spéléH2O et L. Mocochain, docteur en karstologie. Il s'agissait au départ d'un parcours pédagogique pluridisciplinaire mais dont la production finale appartient aux domaines scientifiques et techniques. Une publication intégralement rédigée par les élèves de cinquième, après deux ans d'études, a été réalisée dans la revue *Spelunca* [Audibert et al. 2013].

Nous avons décidé de reconduire cette expérience dans le cadre du projet européen « Let stones speak : rocking around our european heritage » (dispositif ERASMUS), en développant un partenariat local avec l'Université Aix-Marseille (B. Arfib, Laboratoire CEREGE, OSU PYTHEAS), l'Association SpéléH2O (T. Lamarque), et le Comité départemental de spéléologie du Var (D. Laty). Le projet « Eaux souterraines » est ainsi né à la rentrée 2014. L'objectif est de proposer un travail pluridisciplinaire autour d'un objet d'étude : le karst, c'est-à-dire les roches carbonatées perméables qui sont susceptibles de contenir des vides de grandes dimensions (jusqu'aux grottes visitables par l'Homme) qui influencent le stockage et l'écoulement de l'eau souterraine. Le karst est utilisé ici comme support pédagogique à l'étude du cycle de l'eau en terrain calcaire. Le karst constitue ainsi l'interface entre l'atmosphère, l'eau souterraine et les rivières de surface. Il s'intègre parfaitement dans les problématiques de développement durable et de prise en compte des interactions Homme et milieux naturels (risques naturels, ressources). Inscrit dans la méthodologie de l'Éducation artistique et culturelle (EAC), le projet Eaux souterraines repose sur trois piliers (figure 1) : (1) découverte du milieu naturel par des sorties de terrain en surface et dans des grottes, rencontres avec les partenaires et découverte des métiers, (2) enregistrement de données physico-chimiques sur l'eau par des sondes de mesures autonomes *in situ* (3) acquisition de connaissances en classe. La valorisation sur divers supports de communication fait partie intégrale du projet, ce qui permet aux élèves d'exposer leurs acquis et résultats à travers des concours scientifiques (par exemple

C-Génial), des posters, des présentations orales, des sites internet...

Pour répondre aux trois piliers du projet, le site d'étude devait satisfaire à plusieurs critères, tels que : être accessible en bus pour une sortie à la journée, avoir au moins une grotte visitable, présenter une surface d'infiltration de l'eau de pluie et une source où l'eau s'écoule vers un cours d'eau. Le site du massif Saint Clément, dans le Var, à proximité des communes de Néoules et Méounes-les-Montrieux, a été sélectionné car il constitue un hydrosystème karstique qui répond à ces critères. L'étude des pluies mesurées sur un pluviomètre à proximité, comparées aux variations de niveau d'eau, de température et de conductivité électrique (minéralisation de l'eau) permettra aux élèves d'appréhender le fonctionnement hydrogéologique du karst.

La première année du projet, en 2014, une seule grotte a fait l'objet d'un suivi hydrogéologique : le Régaie de Néoules. Les résultats sont décrits dans la partie suivante de l'article. La cavité présente l'originalité de donner accès à un plan d'eau (un siphon spéléologique) dont le niveau varie avec les précipitations, et dans certains cas extrêmes la grotte peut se transformer en source. Dès septembre 2014, le siphon du Régaie de Néoules a été équipé d'une sonde de mesure CTD (Conductivité, Température, Niveau d'eau), par l'Université et SpéléH<sub>2</sub>O pour les besoins du projet « Eaux souterraines ». Cette sonde de mesure venait compléter un réseau de suivi hydrogéologique sur l'unité géologique du Beausset, voisine du site d'étude [www.karsteau.fr]. Les premiers résultats sont prometteurs et les élèves du collège Pierre de Coubertin ont formulé en fin d'année des propositions pour compléter le suivi hydrogéologique. Durant l'année, un échange a également eu lieu avec les élèves de CE1 de l'école communale de Néoules.

C'est ainsi que pour la rentrée 2015, le projet « Eaux souterraines » est élargi, avec la mise en place de nouvelles sondes de mesure *in situ*. Avec l'aide du département du Var et du comité régional de spéléologie, le CDS83 a financé dix sondes supplémentaires de mesure de la température et de la pression (la mesure de la conductivité électrique n'a pas été retenue pour des raisons budgétaires). Le choix des sites d'installation sur les rivières souterraines du massif Saint



Photo 1 : En classe, les élèves travaillent à la conception du modèle physique et testent son fonctionnement. Cliché F. Mourau, 25 février 2016. *In classroom, the students make a physical model of karst aquifer and play with it.*

Clément est fait en concertation avec tous les partenaires. Un second collège a rejoint le projet : le collège Jean Giono du Beausset (Var). En 2015-2016, les élèves travaillent désormais en tandem entre les deux établissements. En plus de l'aspect scientifique, ce travail permet de soulever chez eux un questionnaire citoyen sur les liens existant entre la société, le climat et la ressource en eau.

Le projet « Eaux souterraines » permet aux collèges de travailler en interdisciplinarité. Le tableau 1 liste quelques exemples d'entrées des programmes et thèmes abordés compatibles pour une dizaine de disciplines [BOEN 26/11/2015].

### C. Le travail des élèves dans le projet « Eaux souterraines »

Amener les élèves de collège à travailler avec ces données scientifiques nécessite une double préparation. Tout d'abord une mise en forme des enregistrements « bruts » issus directement des sondes au sein d'un seul fichier tableur, intégrant les données météo et hydrogéologiques synchronisées sur un même pas de temps. Intéressant mais chronophage, ce préalable technique serait difficile à réaliser avec les collégiens, il est donc effectué à l'université. Il est cependant important pour les élèves de comprendre comment les données sont acquises. Une seconde préparation, celle des élèves, est plus classique, réalisée sous la super-

vision des enseignants qui adaptent le contenu scientifique « bibliographique » et valident les acquis des élèves au sein de séquences d'activités.

Sur le terrain, les élèves renforcent leurs acquis par l'observation, réalisent des acquisitions directes à l'aide de capteurs mobiles et expérimentent par eux-mêmes le milieu souterrain. Au collège, ils assurent un traitement des données à l'aide d'outils mathématiques et numériques qu'ils apprennent à maîtriser. Ils utilisent ainsi le tableur pour réaliser des moyennes, des médianes et des graphiques. Les élèves analysent les résultats et formulent des hypothèses explicatives. Les outils numériques collaboratifs facilitent la rédaction de synthèses qu'ils partagent à l'intérieur comme à l'extérieur de l'établissement.

En parallèle, les élèves développent un modèle réduit de nappe d'eau souterraine en aquifère karstique (photo 1). La conception de la maquette a permis de réaliser une part du programme de technologie (choix des matériaux, programmation, mise en œuvre...) et de renforcer leurs connaissances sur le karst : présence d'un épikarst, d'une zone vadose (ou zone non saturée), d'une zone noyée (ou zone saturée) et d'une zone de battement de la nappe (ou épiphreatique) qui assure une transition entre les deux précédentes. Nous l'avons équipée de capteurs, en partie réalisés par les élèves, soit deux débitmètres et un capteur de hauteur



Photo 2 : Les concours scolaires permettent aux élèves de présenter leurs travaux et leurs résultats; ici, la finale académique du concours C-Génial, le 18 mars 2016. On observe le modèle à droite de la photographie; l'ordinateur affiche en direct et enregistre les données des capteurs. De gauche à droite : collège Pierre de Coubertin (Rozerin, Baptiste et Camille), collège Jean Giono (Claire et Hyek). Cliché F. Mourau. *Students presented their work in school contests. They won the 2nd and 3rd award in 2015 and 2016 for the contest "C-Génial" at the academic scale. The model is seen on the right side; the computer shows data in real time and saves it. From left to right : collège Pierre de Coubertin (Rozerin, Baptiste et Camille), collège Jean Giono (Claire et Hyek), 18 March 2016.*

d'eau basé sur la technologie des ultrasons. Les capteurs sont interfacés avec un ordinateur grâce à des modules électroniques « open-source ». Les élèves ont câblé les différents éléments et programmé le microcontrôleur en adaptant du code récupéré sur internet. Ils ont prototypé les pièces d'adaptation à la maquette avec un logiciel de CAO et d'une imprimante 3D. Cette séquence technologique est essentielle car elle permet aux élèves de comprendre comment une grandeur physique est perçue, convertie, puis enregistrée par la sonde. Ils acquièrent surtout un sens critique vis-à-vis des données car ils comprennent

désormais qu'elles sont issues de nombreuses manipulations techniques soumises à des contraintes environnementales (température, pression, humidité) et conceptuelles (forme du capteur, limitations techniques, erreurs de codages...).

En heure de projet, les élèves testent sur le modèle leurs hypothèses ou les conditions qu'ils ne peuvent pas directement expérimenter dans la réalité : l'effet d'un pompage ou d'une pollution par exemple. Passant de la simple analogie à l'exploitation des données numériques issues des capteurs, ils découvrent par eux-mêmes les intérêts et les limites de l'utilisation de la maquette tout en s'appropriant un outil scientifique fondamental : la modélisation.

Les élèves sont libres de développer (sous le contrôle des enseignants tout de même) les problématiques qui leur semblent pertinentes. En première approche, ils se sont surtout concentrés sur la notion de risque. Ils avaient effectivement parcouru la grotte et ont été impressionnés par la rapidité et l'ampleur des mises en charge. Avec une analyse plus fine des données, de petites hausses de conductivité survenues au début des deux premiers événements majeurs de 2014 ont également attiré leur curiosité car cela semblait contradictoire avec leur perception du phénomène.

Travaillant à partir des données de la seule sonde CTD en 2014-2015, les élèves ont réalisé un modèle de mise en charge un peu trop caricatural, impliquant une élévation synchrone et verticale de la nappe d'eau sur toute la longueur de la cavité comme en milieu



Photo 3 : L'entrée spéléologique du Régaie de Néoules à sec. Cliché B. Arfib & T. Lamarque, 16/09/2014. *Entrance of the cave "Régaie de Néoules" when there is no water.*

poreux. Afin d'affiner leur compréhension, ils ont proposé d'implanter quatre capteurs répartis tout au long du Régaie de Néoules pour mieux cerner les modalités de variation du niveau d'eau spécifiques au karst, et pouvoir ainsi mesurer l'avancée de l'onde de crue dans le conduit karstique. Ces données sont en cours d'acquisition.

Les élèves ont participé au concours scientifique départemental C-Génial en 2015 et 2016 avec le projet « Eaux souterraines », gagnant respectivement les 3<sup>ème</sup> et 2<sup>ème</sup> places (photo 2). Ils ont également exposé leurs travaux lors de la Fête de la science. Ces échéances rythment l'avancement des activités du projet tout en offrant un cadre valorisant pour les élèves. Inscrits dans une démarche d'éducation par les pairs, ils rencontrent et sensibilisent les autres élèves aux enjeux de la ressource en eau karstique.

#### D. Le dispositif « Eaux souterraines » : un EPI dans le cadre de la réforme du collège

À la rentrée 2016, le collège vivra une restructuration importante des enseignements. Elle doit favoriser le travail en interdisciplinarité autour de projets inscrits dans huit grands thèmes. Ces Enseignements Pratiques Interdisciplinaires (EPI) deviennent obligatoires pour l'ensemble des collégiens. En parallèle, les programmes nationaux sont mis à jour. Ils traitent très spécifiquement de la ressource en eau, de la météorologie et du



risque naturel durant le cycle 4 qui s'étendra de la cinquième à la troisième. La figure 1 montre comment l'EPI se structure autour des piliers du parcours d'éducation artistique et culturelle de l'élève, en intégrant des parties du programme de nombreuses matières.

Si cette nouvelle organisation rendra caduc l'actuel dispositif des classes à thématique scientifique, elle permettra cependant un élargissement du projet à tous les élèves. Avec l'appui du corps d'inspection et de la

Figure 3: Localisation du Régaie de Néoules au nord du massif Saint-Clément (Var).

*Location of the cave "Régaie de Néoules" at the north of the mountain "St Clément (Var)".*

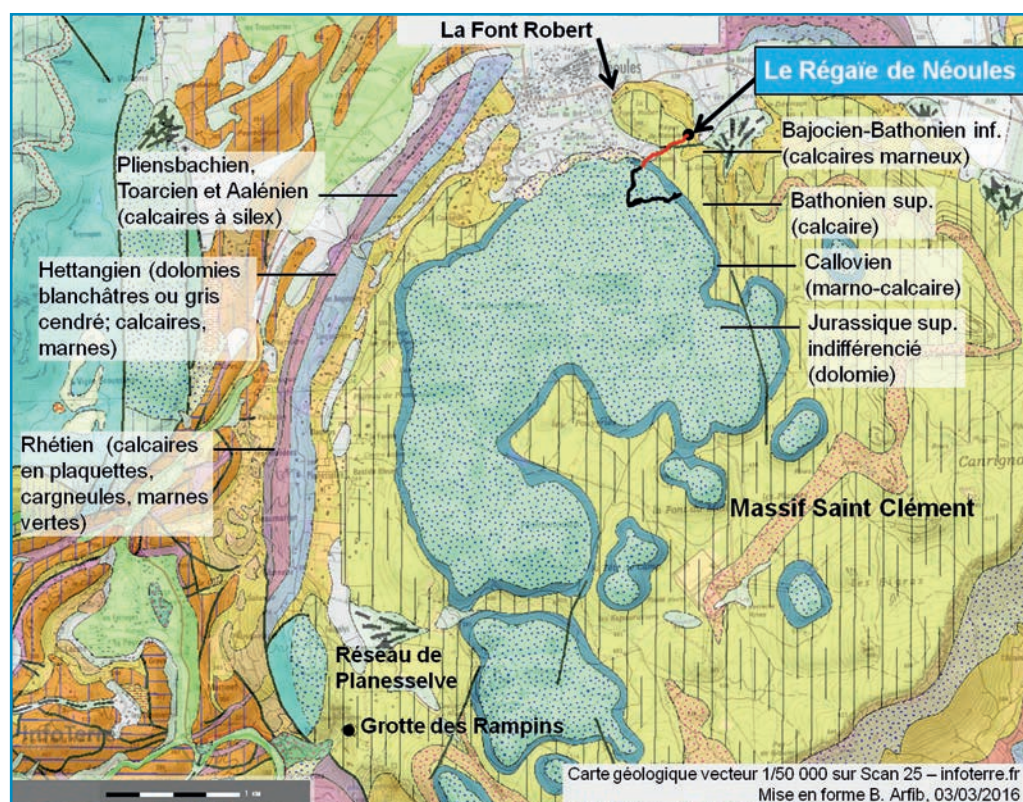


Figure 4: Carte géologique (échelle originale 1/50 000, format vecteur infoterre.fr) centrée sur le massif Saint-Clément. Le tracé de la grotte est superposé à la carte: en rouge la partie spéléologique visitable, en noir la partie uniquement accessible aux plongeurs-spéléologues.

*Geological map (original scale 1/50000, vector format from infoterre.fr) centered on the mountain "St Clément (Var)". The cave survey is superimposed on the map: in red the part of the cave accessible to cavers, in black the part of the cave with access limited to divers.*

DAAC (Délégation académique aux arts et à la culture), nous déploierons « Eaux souterraines » sur une plus vaste échelle. Un dispositif académique est proposé à tous les établissements de l'académie. Les volontaires qui entreront dans le dispositif dès la rentrée 2016, se verront proposer la gestion d'au moins une sonde CTD ou Pression, tout en ayant accès à l'ensemble des données du réseau que nous avons initié.

Toujours en partenariat, trois journées de formation seront proposées aux professeurs impliqués dans le dispositif. Réparties dans l'année scolaire, elles assureront une mise à niveau scientifique en hydrogéologie, une sensibilisation aux enjeux locaux, une aide à l'utilisation des données ainsi qu'une mutualisation des activités pédagogiques réalisées dans le cadre du projet. C'est un accompagnement et non un cadre contraignant qui est proposé aux enseignants. Ils resteront libres d'innover, de développer les problématiques, les activités et les partenariats qu'ils jugeront les plus pertinents.

À travers ce réseau naissant au sein des établissements secondaires, nous cherchons à sensibiliser les futurs citoyens au karst et à ses enjeux. Nous nous appuyons sur une démarche scientifique ancrée sur le territoire afin de diffuser et d'étendre une pratique pédagogique pluridisciplinaire que nous jugeons pertinente.

## II. Le fonctionnement hydrogéologique du Régaie de Néoules

### A. La cavité du Régaie de Néoules

Le Régaie de Néoules s'ouvre sur la commune de Néoules dans le Var (figure 3, photo 3). C'est une cavité horizontale où la progression ne nécessite pas de corde. Sur les 350 premiers mètres, le spéléologue (confirmé ou débutant) se déplacera en rampant, puis debout, avec de l'eau jusqu'aux cuisses (ça dépend de la taille...) dans des vasques rafraîchis-



Photo 4: Le vallon à l'aval de l'entrée spéléologique du Régaie de Néoules à sec. Le cadre en pointillé au centre de la photo correspond à la photo 5 prise en crue. Cliché B. Arfib & S. Terrier, 15/08/2016. The small valley downstream of the entrance of the cave "Régaie de Néoules" when there is no water. The rectangle in dotted line in the center of the photo shows the frame of the photo 5 taken during a flood.

santes, sur le calcaire ou dans la boue. Les moins rapides s'arrêteront à la salle de la bougie, et les autres continueront jusqu'à la vaste salle des sables (figure 5). À partir de ce point, la visite est moins évidente, et très rapidement on bute sur un lac (appelé voûte mouillante) qui nécessite des équipements adaptés pour traverser. Puis finalement la visite se termine sur un siphon (photo 7), et là seuls les plongeur-spéléologues peuvent continuer l'aventure. D'ailleurs, des explorations récentes ont permis de découvrir une succession de siphons et galeries sur au moins 600 mètres supplémentaires (M. Guis, M. Renaud, E. Etienne entre 2013 et 2016). Toute la cavité s'est creusée dans les terrains calcaires du Jurassique moyen (Bathonien supérieur) du massif Saint Clément qui forment une couche de faible pendage largement karstifiée reposant sur les terrains plus marneux du Bajocien-Bathonien inférieur (figure 4).

Ces calcaires bathoniens sont présents à l'affleurement ou recouverts par les terrains dolomitiques du Jurassique supérieur. Plusieurs réseaux spéléologiques se développent dans ces calcaires : le Régaie de Néoules, la baume de Néoules, le réseau de Planesselve – grotte des Rampins, Fougély. La structure tabulaire des couches géologiques est facilement identifiable sur la carte géologique, avec les couches qui affleurent tout autour du massif Saint-Clément. Le massif forme un îlot, au fonctionnement hydrogéologique indépendant des structures géologiques environnantes (massifs de l'Agnis, de la Sainte-Baume, de Siou-Blanc - figure 3). Aucun cours d'eau ne coule à la surface du massif car toute l'eau des précipitations s'infiltre. Les calcaires et dolomies à l'affleurement au-dessus des marnes peu perméables du Bajocien-Bathonien inférieur constituent une vaste zone d'infiltration de l'eau de pluie, qui vient ainsi

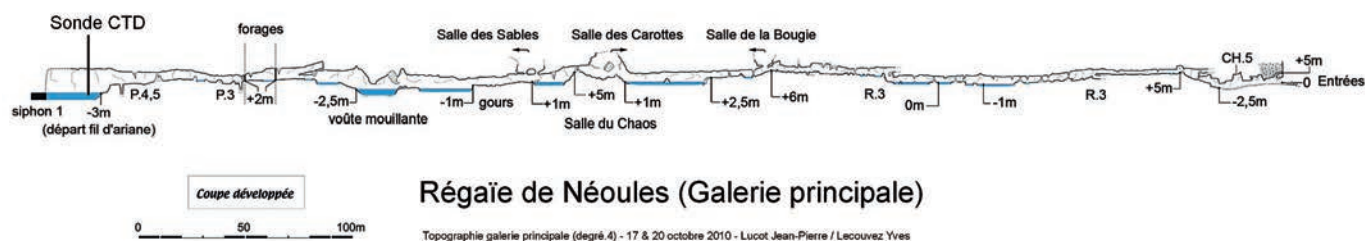


Figure 5: Topographie en coupe développée du Régaie de Néoules (Var). Cross-section of the survey of the cave "Régaie de Néoules".



Photo 5 : Le Régaie de Néoules en crue. L'entrée spéléologique se transforme en source qui alimente un ruisseau tempétueux. Le cadre de la photo est replacé dans son environnement sur la photo 4. Cliché D. Laty, 14/11/2014. *The "Régaie de Néoules" during the 14th of November 2014 flood. The cave entrance turns into a spring which supplies a surface stream. The rectangle in dotted line in the center of the photo 4 shows the frame of the photo 5.*

alimenter les écoulements souterrains au contact des marnes et du Bathonien supérieur calcaire karstifié. Des structures karstiques de surface façonnent le paysage, avec des grands plateaux et poljés [Blanc, 2010]. L'eau souterraine sort sur la bordure nord et ouest du massif, drainée par un ensemble de sources sur le contact à la base des calcaires bathoniens : Régaie de Néoules, baume de Néoules, Font Robert, source des Rampins, Fougély.

Dans la cavité, de nombreux points bas forment des vasques d'eau présentes toute l'année, et généralement stagnantes (visibles sur la topographie, figure 5). Les parois sont marquées par des traces d'écoulement, avec des coupoles en

plafond liées à des mises en charges temporaires. Lors de pluies intenses, l'entrée de la cavité peut se transformer en une véritable source (photos 4 et 5), qui s'écoule durant quelques heures à quelques jours, et alimente un petit ruisseau temporaire qui rejoint l'Issole au nord. En avril 1995, un groupe de quatre spéléologues s'était retrouvé bloqué pendant deux jours, piégé par la montée des eaux dans la grotte ; ils s'étaient alors réfugiés au point le plus haut, dans la salle des carottes (figure 5), et avaient finalement pu sortir indemnes après la descente des eaux et avec l'aide du Spéléo-Secours-Français. La grotte s'ennoe donc complètement lors des pluies intenses, du siphon 1 à l'entrée.



Photo 7 : Sonde CTD installée au siphon 1 du Régaie de Néoules. Au premier plan devant le personnage : le tube d'accroche de la sonde dans l'eau, fixé à la paroi. À l'arrière-plan : le départ du siphon vers l'amont du réseau spéléologique. Cliché B. Arfib & L. Dal Soglio, 17/01/2015. *The CTD probe fixed on the wall of the sump 1 of the cave "Régaie de Néoules" in front of the caver. Behind the caver, in the sump, the departure for the cave-divers to explore the upstream part of the cave.*

## B. Objectif du suivi hydrogéologique depuis 2014 et matériel de mesure

Dans le cadre du projet « Eaux souterraines » le siphon 1 du Régaie de Néoules (photo 7) a été équipé d'une sonde de mesure automatique (sonde CTD) de la hauteur d'eau, de la conductivité électrique et de la température en septembre 2014, qui mesure et enregistre toutes les 15 minutes (photo 6). Ce type de mesure scientifique est courant en hydrogéologie karstique, mais nécessite quelques précautions lors de la mise en œuvre. La sonde CTD, lorsqu'elle mesure la pression absolue (c'est-à-dire la pression de l'air et de l'eau), doit être complétée par une autre sonde qui mesure la pression atmosphérique à proximité. La hauteur d'eau réelle est obtenue en soustrayant la pression atmosphérique de la pression absolue de la sonde CTD. La conductivité électrique doit être paramétrée dans la sonde pour une mesure à une température de référence fixe (généralement 25°C, appelé dans certains logiciels



Photo 6 : La sonde CTD dans son tube formant un fourreau de protection, avant installation dans le siphon 1 du Régaie de Néoules le 16/09/2014. Cliché B. Arfib & T. Lamarque. *The CTD probe in a pipe for protection, before fixing it on the wall of the sump #1 of the cave "Régaie de Néoules".*

| Numéro de crue | Date de la crue | Niveau maximum atteint (mètre) | Pluie sur les 48h précédant le niveau maximum (station Rocharon Université) en mm | Pluie sur les 24h précédant le niveau maximum (station Rocharon Université) en mm |
|----------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 1              | 04/11/2014      | 13.73                          | 80                                                                                | 76                                                                                |
| 2              | 11/11/2014      | 19.63                          | 78                                                                                | 65                                                                                |
| 3              | 15/11/2014 (a)  | 14.86                          | 38                                                                                | 38                                                                                |
| 4              | 15/11/2014 (b)  | 18.89                          | 73                                                                                | 73                                                                                |
| 5              | 26/11/2014      | 15.33                          | 71                                                                                | 55                                                                                |
| 6              | 27/11/2014      | 17.17                          | 105                                                                               | 35                                                                                |
| 7              | 06/12/2014      | 17.70                          | 50                                                                                | 24                                                                                |
| 8 *            | 16/02/2015 (a)  | 12.12                          | 36 *                                                                              | 32                                                                                |
| 8bis **        | 16/02/2015 (b)  | 13.11                          | 50                                                                                | 46                                                                                |
| 9              | 03/10/2015      | 15.57                          | 109                                                                               | 83                                                                                |

\* crue 8 : le total de pluie est de 54 mm sur les 72h précédant le niveau maximum du siphon 1.

\*\* la crue 8bis forme un petit pic de débit supplémentaire en continuité avec la crue 8, 12 heures après le premier pic.

**Tableau 2: Valeurs caractéristiques des neuf crues ayant engendré un niveau d'eau supérieur à 10 mètres au siphon 1 du Régaie de Néoules entre octobre 2014 et janvier 2016.**

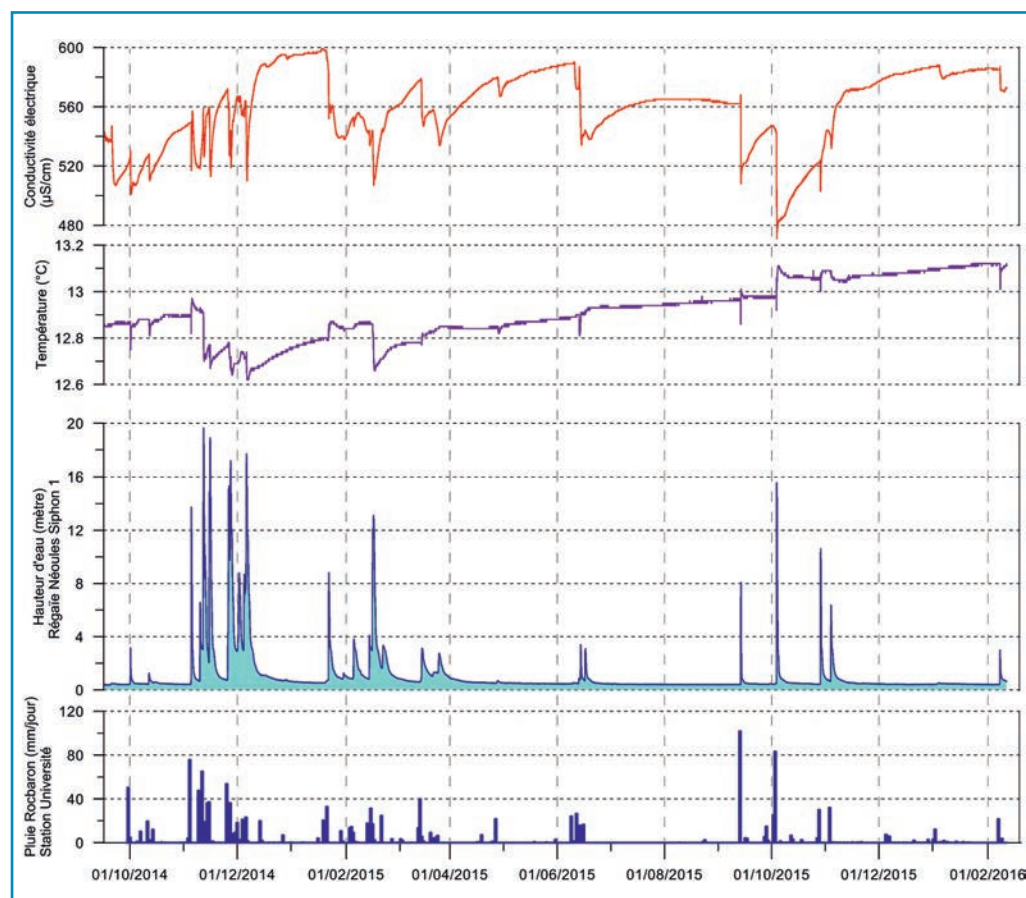
*Characteristic values of nine floods (Oct. 2014-Jan. 2016) that caused the water level of the sump to rise more than 10 m between October 2014 and January 2016.*

**Figure 6: Évolution au cours du temps de la hauteur mesurée au siphon 1 du Régaie de Néoules (Var) toutes les 15 minutes, de la température de l'eau et de la conductivité électrique, ainsi que la pluie journalière à Rocharon (à 3,9 km du Régaie), entre octobre 2014 et février 2016.**  
*Time series (15 min interval) of water level, temperature, electric conductivity recorded in the sump 1 of the cave "Régaie de Néoules" with a CTD probe from October 2014 to February 2016. The daily rainfall is recorded in Rocharon, 3.9 km away from the cave.*

« conductivité électrique spécifique »), de manière à être corrigée en fonction de la température réelle de l'eau. Le dispositif est complet lorsqu'un ou des pluviomètres sont disponibles (ou installés) à proximité ou sur la zone d'alimentation du karst étudié. Nous

avons donc installé un pluviomètre à augets basculants (un basculement égal 0,254 mm de pluie) et une sonde pression à Rocharon, à 3,9 km de l'entrée du Régaie de Néoules. Les variations de hauteur d'eau seront interprétées en fonction des pluies sur le bassin versant. La conductivité électrique représente la minéralisation de l'eau, c'est-à-dire la quantité d'ions présents dans l'eau, qui est dépendante de l'origine de l'eau et de son temps de contact avec la roche. On peut ainsi aisément mettre en évidence l'arrivée massive d'eau de pluie récemment infiltrée, qui génère une chute de conductivité électrique (l'eau de pluie a une conductivité électrique variant généralement entre 2 et 40  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , tandis que l'eau du siphon au Régaie de Néoules a une conductivité de l'ordre de 520 à 560  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Lorsqu'on connaît bien un système hydrologique, il est également possible de mettre en évidence des mélanges d'eaux souterraines d'origines différentes.

Les mesures sont faites dans la grotte au siphon 1, sur le point terminal de la partie aérienne, là où l'eau souterraine qui ennoie la grotte en crue est suspectée d'arriver. Ces données permettent de quantifier les crues dans le Régaie de Néoules. Il est ainsi possible de déterminer dans quelles conditions hydrologiques et météorologiques l'eau du siphon 1 monte. Ces données donnent accès à la vitesse de montée de l'eau et également de



descente. Elles apportent des éléments nouveaux de connaissance de notre environnement. Elles constituent donc une base de données essentielle, qui est mise à disposition des élèves de collège pour leur formation scolaire.

### C. L'évolution générale du niveau d'eau au siphon 1 du Régaïe de Néoules entre octobre 2014 et février 2016

La figure 6 présente l'évolution de la hauteur d'eau mesurée au siphon 1 du Régaïe de Néoules (Var) toutes les 15 minutes, et de la pluie journalière à Rocbaron, entre octobre 2014 et février 2016. Les données de conductivité électrique et de température de l'eau sont aussi notées (cf. *infra*, II,F). Sur cette période, le tableau 2 résume les valeurs du niveau d'eau maximum enregistré au cours des 9 crues supérieures à 10 mètres de mise en charge (la sonde est environ 0,4 m sous la surface de l'eau en étiage), et donne les précipitations horaires cumulées sur 24 et 48 heures avant le maximum de crue. La valeur de hauteur de 10 mètres utilisée pour sélectionner les crues dans le tableau 2 est prise en référence avec la topographie de la cavité. En effet, comme indiqué sur la topographie (figure 5), l'entrée de la cavité étant fixée à 0 mètre, le niveau d'eau dans le siphon se trouve environ à -3 mètres sous le niveau de l'entrée, et le point le plus haut au plancher de la galerie karstique se trouve vers 6 mètres au-dessus de l'entrée. Ce point constitue un seuil de déversement situé environ 10 mètres au-dessus de l'altitude de la sonde (6 + 3 + 0,4 mètres) si un écoulement d'eau emprunte la galerie karstique suivant le même cheminement que l'homme. En négligeant les pertes

de charge lors de l'écoulement de l'eau (liées au frottement) et les pertes de débit vers des exutoires inférieurs, un niveau d'eau au siphon 1 mesuré à 10 mètres passe au-dessus du seuil le plus haut de la galerie karstique et peut s'écouler en direction de la sortie de la grotte (c'est-à-dire l'entrée spéléologique). C'est donc une condition, non suffisante mais indispensable, pour que la galerie soit noyée.

L'allure générale de la courbe du niveau d'eau au siphon montre deux tendances : (1) En dehors des périodes de pluie, le niveau d'eau du siphon est quasiment constant, y compris durant l'étiage estival. Le siphon ne s'assèche pas et donne accès à une galerie exondée de l'autre côté (accessible en plongée souterraine). (2) Lors des pluies, le niveau d'eau varie très rapidement, donnant des pics de mises en charge extrêmement prononcés qui illustrent une montée de l'eau puis un retour à un niveau bas en quelques jours. Le niveau d'eau maximum enregistré est monté jusqu'à près de 20 mètres sur les 17 mois de données disponibles. Le siphon 1 est donc un lieu de passage de l'eau en crue, mais le reste de l'année il forme une réserve d'eau confinée dans la galerie karstique formant un U.

### D. Quelles conditions météorologiques et hydrologiques sont nécessaires pour observer une crue au siphon 1 du Régaïe de Néoules ?

Deux hivers ont été enregistrés, avec des allures très différentes. Au cours de l'automne-hiver 2014-2015, 8 crues extrêmes ont été enregistrées, tandis qu'une seule grande crue (tableau 2) et trois crues moyennes ont eu lieu en 2015-

2016. Ces différences sont expliquées par les différences de pluviométrie. En effet, la fin de l'été 2015, l'automne et l'hiver 2015-2016 ont été très peu pluvieux en Provence, contrairement à l'année précédente. Il est tombé à Rocbaron 685 mm de pluie entre le 01/10/2014 et le 31/01/2015, tandis que l'année suivante entre le 1/10/2015 et le 31/01/2016 il est tombé seulement 245 mm. Les grandes crues, supérieures à 10 mètres au siphon 1, ont lieu après un cumul de pluie supérieur à 50 mm sur 48 heures (tableau 2), et quelques rares fois pour une pluie moins importante mais qui suit une période pluvieuse dans les deux jours précédents (exemples : crue du 15/11/14 (a), crue du 06/12/14, crue du 16/02/15 (a)). Les crues ont lieu quelles que soient la période de l'année et les conditions hydrologiques initiales. À la fin de l'été, les crues du 04/11/14 et du 03/10/15 ont atteint respectivement 13,73 m et 15,33 mètres (tableau 2, figure 6) alors que le système karstique sortait d'une période d'étiage de plusieurs mois. L'élément déterminant est la quantité de pluie sur le bassin d'alimentation. Sous climat méditerranéen, il est courant d'avoir des cumuls de pluie supérieurs à 50 mm en un à deux jours (tableau 2). Certains événements pluvieux ont pu être très localisés et ne donneront donc pas la même réaction au siphon du Régaïe de Néoules, comme par exemple la pluie du 13/09/2015. Cette pluie de 102 mm à Rocbaron n'a été que de 56 mm à Cuers (à 9 km au sud) et 2 mm à Toulon (26 km au sud) ; elle a donc dû avoir une valeur plus faible sur le massif Saint-Clément, ce qui explique que le siphon du Régaïe de Néoules n'ait qu'une réaction limitée à 8 m de niveau d'eau.

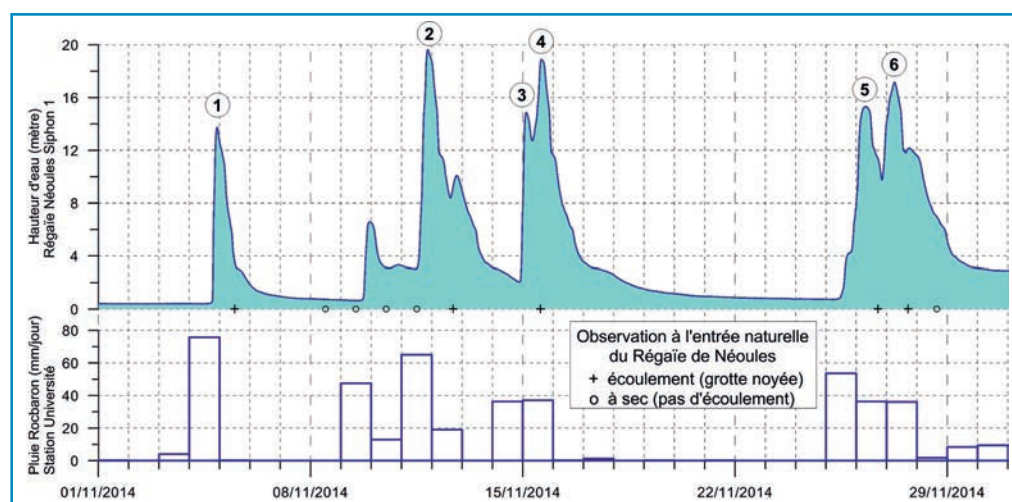


Figure 7: Succession des crues du mois de novembre 2014, sur un graphique de l'évolution au cours du temps de la hauteur mesurée au siphon 1 du Régaïe de Néoules (Var) toutes les 15 minutes, et de la pluie journalière à Rocbaron (à 3,9 km du Régaïe). Les numéros des crues font référence aux tableaux 2 et 3. Succession of the floods from November 2014, on a graph with the water level recorded in the sump 1 of the cave "Régaïe de Néoules" with a 15 minutes' time-step and rainfall in Rocbaron. The flood's numbers are used in the tables 2 and 3.

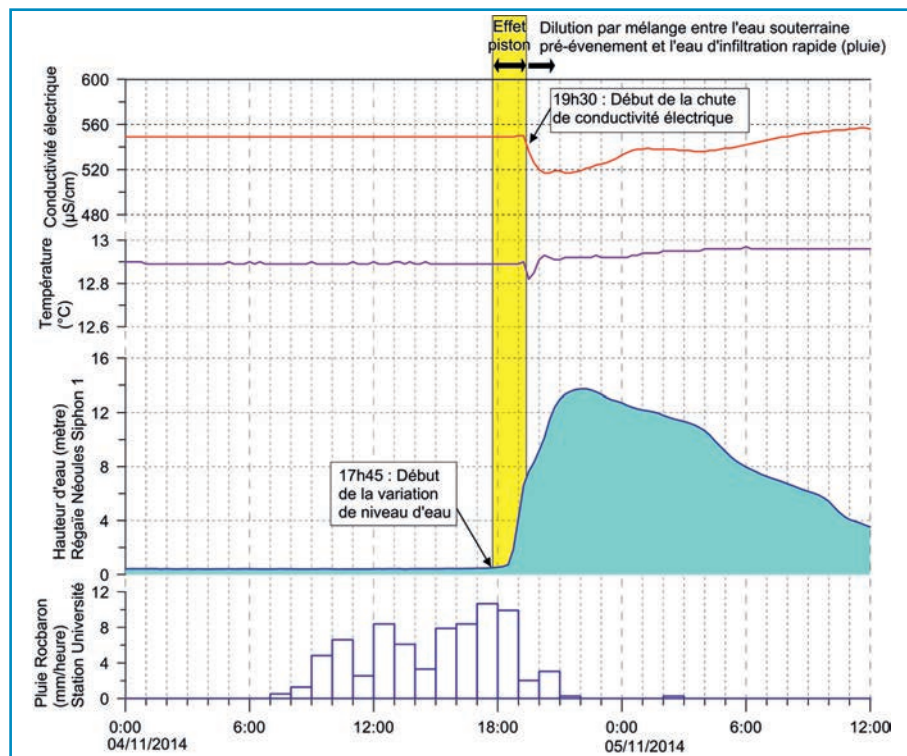


Figure 8: La crue du 4 et 5 novembre 2014 au Régaie de Néoules. Enregistrement des variations de hauteur d'eau, température et conductivité électrique de l'eau du siphon 1 au pas de temps de 15 minutes. Pluie horaire mesurée à Rocbaron. *The flood of 4-5. November 2014 recorded in the sump 1 of the cave "Régaie de Néoules". Detailed CTD time-series (15 minutes' time-step) and rainfall per hour.*

### E. Les périodes d'ennoiement de la cavité et les vitesses de montée et de descente du niveau d'eau au siphon 1

La figure 7 est un zoom sur la succession de crues du mois de novembre 2014. Cette période a fait l'objet d'un suivi complémentaire visuel ponctuel au niveau de l'entrée du Régaie, permettant de placer sur le graphique les moments où la grotte était noyée et formait une source. Les six premières crues du tableau 2 (figure 7) ont dépassé 10 mètres de mise en charge au siphon 1. Pour chaque crue,

la cavité a été noyée et laissait s'écouler l'eau à l'entrée. Les mesures de niveau d'eau au siphon 1 sont bien corrélées avec l'écoulement d'eau souterraine à travers la cavité.

Chaque pic de crue est légèrement dissymétrique, avec une montée très rapide quasiment linéaire, et une descente légèrement moins rapide mais qui reste quasiment linéaire jusqu'à environ 3,5 m de hauteur. La durée de passage du pic de crue ( $H > 3,5$  m) est de l'ordre d'un jour si l'événement pluvieux est

limité à un jour. Par contre, les crues s'étalent sur plusieurs jours tant que la pluie persiste; par exemple, la crue démarrée le 25/11/14 a duré jusqu'au 28/11/14 du fait des pluies de l'ordre de 40 mm/j le 26 et le 27 novembre 2014. La vitesse de montée et de descente de l'eau est calculée pour chaque crue dans le tableau 3 (les bornes de hauteur utilisées sont données dans les quatre dernières colonnes). La vitesse de montée du niveau du siphon est variable en fonction des crues, entre 77 cm et 4,6 m par heure. Nous suggérons que la répartition des pluies horaires, différente pour chaque crue, explique ces valeurs de vitesse de montée variables. On peut également remarquer que les deux crues les plus rapides sont les crues de fin d'été saisonnier (4/11/14 et 3/10/15) où des pluies de très forte intensité journalière ont eu lieu (tableau 2). 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 vitesse de descente est beaucoup plus faible que la vitesse de montée de crue, mais reste tout de même rapide. La décrue au siphon 1 arrive systématiquement après la fin des précipitations (figure 7); les vitesses de décrue ne sont donc pas influencées par les pluies. Elles représentent le transfert dans la zone non saturée et saturée du karst. Ces vitesses au siphon 1, toutes du même ordre de grandeur, caractérisent le drainage du karst, soit par l'écoulement en direction de l'entrée de la grotte soit par sous-écoulement par des pertes au fond de la galerie karstique en direction d'autres exutoires.

Tableau 3: Vitesses de montée et de descente du niveau d'eau, calculées sur les neuf crues présentées dans le tableau 2. Les quatre dernières colonnes du tableau correspondent aux niveaux d'eau entre lesquels les calculs de vitesse sont faits. *Rising and decreasing velocities of the floodings presented in Table 2. The four rightmost columns are the water levels that were used for these calculations.*

| Numéro de crue | Date de la crue | Niveau maximum atteint (m) | Vitesse de montée (m/h) | Vitesse de descente (m/h) | Niveau initial Montée de crue (m) | Niveau final Montée de crue (m) | Niveau initial descente (m) | Niveau final descente (m) |
|----------------|-----------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 1              | 04/11/2014      | 13.73                      | 4.27                    | 0.75                      | 0.72                              | 13.52                           | 13.51                       | 3.52                      |
| 2              | 11/11/2014      | 19.63                      | 2.36                    | 0.65                      | 3.52                              | 19.47                           | 19.50                       | 8.41                      |
| 3              | 15/11/2014 (a)  | 14.86                      | 3.15                    | 0.56                      | 2.15                              | 14.74                           | 14.76                       | 12.79                     |
| 4              | 15/11/2014 (b)  | 18.89                      | 1.00                    | 0.51                      | 12.81                             | 18.80                           | 18.78                       | 3.98                      |
| 5              | 26/11/2014      | 15.33                      | 0.79                    | 0.47                      | 0.94                              | 15.20                           | 15.27                       | 9.76                      |
| 6              | 27/11/2014      | 17.17                      | 0.77                    | 0.28                      | 9.84                              | 17.17                           | 17.16                       | 4.01                      |
| 7              | 06/12/2014      | 17.7                       | 1.24                    | 0.27                      | 7.95                              | 17.57                           | 17.64                       | 4.00                      |
| 8 *            | 16/02/2015      | 13.11                      | 1.31                    | 0.28                      | 3.05                              | 11.91                           | 13.04                       | 4.02                      |
| 9              | 03/10/2015      | 15.57                      | 4.58                    | 0.91                      | 0.62                              | 15.52                           | 15.47                       | 3.69                      |

\* crue 8: la montée est calculée uniquement sur le premier pic de crue, tandis que la descente est calculée après le deuxième pic (crue 8bis du tableau 2).

## F. L'apport de la conductivité électrique pour comprendre d'où vient l'eau des crues : l'exemple de la crue du 4 novembre 2014

Nous avons montré précédemment que les crues du siphon 1 du Régaie de Néoules présentent une montée de niveau rapide. La mesure de la conductivité électrique permet de discuter l'origine de l'eau qui passe au siphon 1. La crue du 4 novembre 2014 est prise comme exemple, présentée dans la figure 8 avec des données enregistrées au pas de temps de 15 minutes. Le 4 novembre 2014, la pluie débute à 7h et s'intensifie entre 15h et 19h. Le niveau d'eau commence à monter légèrement à 17h45, passant de 0,43 m à 0,50 m ; puis entre 18h15 et 19h00 c'est la crue qui arrive, le niveau d'eau passe de 0,59 m à 4,19 m (en 45 minutes) et atteint 7,64 m à 19h30. La conductivité électrique qui était restée strictement constante jusqu'à 19h30 se met alors à diminuer (passant de 549  $\mu\text{S/cm}$  à 517  $\mu\text{S/cm}$ ) et le niveau d'eau continue d'augmenter jusqu'à un maximum à 13,73 m (tableau 3, figure 7, figure 8). Entre 17h45 et 19h30, l'eau de conductivité électrique constante, qui monte dans le siphon 1, correspond à l'eau présente dans le siphon avant la crue et qui est poussée par effet piston. La chute de

conductivité électrique marque l'arrivée d'eau composée d'un mélange entre l'eau souterraine préalablement présente dans l'aquifère (minéralisée) et l'eau de pluie infiltrée durant la pluie. La crue au siphon 1 est liée à l'arrivée d'eau en amont du siphon, qui provient de l'amont du bassin d'alimentation et se déplace dans le conduit karstique. Pour toutes les crues enregistrées entre octobre 2014 et février 2016 et représentées sur la figure 6, le même phénomène est observé, avec une chute systématique de la conductivité électrique.

La température de l'eau est également un paramètre complémentaire qui permet de confirmer les interprétations basées sur la conductivité électrique. L'arrivée d'eau d'infiltration rapide durant une crue va être marquée par une chute de la conductivité électrique et une variation de la température. La variation dépend de la température de la pluie, donc de la saison, mais peut être limitée par les échanges thermiques entre l'eau souterraine et la roche qui tendent à limiter les écarts. On peut donc observer sur certaines crues des pics de température, corrélés avec les pics de conductivité électrique et de hauteur d'eau au siphon 1. Par exemple, bien visible sur la figure 6, la crue du 16 février 2015 présente une

chute de température liée à l'arrivée d'eau de pluie froide de l'hiver ; la crue du 3 octobre 2015 montre à l'inverse une hausse de température de l'eau liée à l'arrivée d'eau de pluie chaude du début d'automne. L'eau qui passe à travers la grotte du Régaie de Néoules en crue est donc bien un mélange entre l'eau souterraine préalablement présente dans l'aquifère et de l'eau d'infiltration rapide provenant directement des précipitations.

## G. Peut-on aujourd'hui comprendre les crues du 21 au 25 avril 1995 ?

La crue du 23 au 25 avril 1995 est restée dans les esprits car elle a bloqué durant trois jours quatre spéléologues. Elle a fait la une de l'actualité et nécessité l'engagement des secours spéléos. Vingt et un ans après, en 2016, les données enregistrées au siphon 1 du Régaie de Néoules permettent enfin de comprendre comment s'est déroulée cette crue de 1995, à l'aide des pluies enregistrées dans la région (tableau 4) sur les stations Météo-France de Toulon (24 km au sud du Régaie) et du Castellet aérodrome (20 km à l'Est du Régaie), et par recoupement avec le récit du spéléo-secours (T. Lamarque et P. Maurel, communication personnelle 2016). Le 19 et 20 avril 1995 quelques gouttes de pluie tombent

| Date       | Pluie Toulon (mm/jour) | Pluie Le Castellet aérodrome (mm/j) | Fonctionnement probable du Régaie de Néoules                                                                                                                                        | Le secours spéléologique                                                                                                                                          |
|------------|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 17/04/1995 | 0                      | 0                                   | siphon stable, niveau bas                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                   |
| 18/04/1995 | 0                      | 0                                   | siphon stable, niveau bas                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                   |
| 19/04/1995 | 3.2                    | 3.4                                 | siphon stable, niveau bas                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                   |
| 20/04/1995 | 1.2                    | 0.2                                 | siphon stable, niveau bas                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                   |
| 21/04/1995 | 59.8                   | 87.8                                | Crue, avec ennoiment de la cavité                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                   |
| 22/04/1995 | 7.0                    | 6.2                                 | Décrue rapide                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                   |
| 23/04/1995 | 50.6                   | 34.8                                | Au cours de la journée :<br>- Cavité non noyée, accessible aux spéléologues.<br>- Nouvelle crue en fin de journée, suite aux nouvelles pluies intenses.<br>- Ennoiment de la cavité | Quatre spéléologues sont bloqués dans la salle des Carottes                                                                                                       |
| 24/04/1995 | 22.0                   | 19.4                                | Crue, avec ennoiment de la cavité                                                                                                                                                   | Déclenchement du secours.<br>Le débit d'eau à l'entrée est trop fort pour permettre aux plongeurs de passer.<br>Une tractopelle dégage les blocs devant l'entrée. |
| 25/04/1995 | 5.8                    | 4.4                                 | Décrue. Diminution du débit à l'entrée de la cavité puis arrêt de l'écoulement                                                                                                      | Les plongeurs-spéléos établissent le contact avec les spéléologues bloqués.<br>Pompage.<br>Sortie à sec des spéléologues.                                         |
| 26/04/1995 | 0                      | 0                                   | siphon stable, niveau bas                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                   |

Tableau 4 : Pluie journalière enregistrée sur les stations Météo-France de Toulon et Le Castellet aérodrome sur la période du 17/04/1995 au 26/04/1995, et reconstitution du secours spéléo et du fonctionnement du Régaie de Néoules. *Daily precipitation registered at the MeteoFrance stations of Toulon and the airport of Le Castellet, between 17.4.1995-26.4.1995, probable functioning of the cave, and reconstruction of the caving accident.*

dans la région. Puis le 21 avril 1995, un cumul journalier entre 60 et 88 mm est enregistré à proximité (tableau 4). Compte tenu du fonctionnement du Régaie de Néoules mis en évidence sur la période 2014-2016, le siphon 1 s'est donc probablement mis en charge le 21 ou le 22 avril 1995 puis est redescendu rapidement car la pluie cesse quasiment le 22 avril. Le dimanche 23 avril 1995, quand les quatre spéléologues arrivent au Régaie de Néoules, la cavité n'est pas noyée, ils font la visite jusqu'au secteur de la salle du Sable et de la salle des Carottes sans se douter que les pluies intenses du 23 avril (entre 35 et 50 mm, tableau 4) vont générer une nouvelle crue. Cette valeur entre 35 et 50 mm, c'est justement la valeur de pluie qui provoque une montée subite du siphon 1 mise en évidence sur les crues entre 2014 et 2016. La crue arrive alors que les spéléologues redescendent de la salle des Carottes (article *Var Matin* du 26/04/1995), le niveau d'eau monte à vue d'œil, ils décident alors de se réfugier dans la salle en attendant la décrue. Le lundi 24 avril 1995 la pluie continue de tomber (environ 20 mm, tableau 4) et la crue se maintient dans le Régaie de Néoules. Le secours-spéléo est déclenché pour retrouver les spéléologues bloqués. Une pelleuse vient à l'entrée de la grotte pour déplacer d'énormes blocs et agrandir ainsi l'entrée de la grotte, afin de faciliter l'écoulement de l'eau et la vidange de la galerie karstique noyée. Le mardi 25 avril 1995, la pluie cesse, la décrue s'amorce naturellement ; le courant de l'eau a suffisamment diminué pour permettre aux plongeur-spéléos de remonter jusqu'à la base de la salle des carottes, permettant ainsi un premier contact à 4 h 45 avec les quatre

malchanceux bloqués depuis deux jours. Ils sortiront le soir même en marchant et nageant dans la galerie karstique, le niveau d'eau ayant naturellement baissé, aidé par de forts pompes mis en œuvre à partir de l'extérieur.

## Conclusion et perspectives

Le projet « Eaux souterraines » a atteint son objectif de faire travailler les collégiens autour du karst à travers différentes disciplines enseignées au collège. Les élèves ont visité le Régaie de Néoules. Ils ont eux-mêmes interprété les courbes de variation de niveau d'eau, température et conductivité électrique, en s'appropriant une méthode d'étude scientifique rigoureuse.

Cet article détaille le fonctionnement hydrogéologique du karst du Régaie de Néoules. Nous montrons que les vitesses de mise en charge dans la cavité au siphon 1 peuvent dépasser 4 mètres par heure, et le niveau d'eau atteindre une hauteur de 20 mètres. La vitesse rapide de descente du niveau d'eau en décrue (de l'ordre de 0,3 à 0,9 m/h) et l'arrêt rapide de l'écoulement par l'entrée de la cavité montrent que le drainage a lieu par des exutoires très bien connectés à la galerie karstique de la cavité, à travers plusieurs points de drainage inférieurs. Les observations ponctuelles à l'entrée de la cavité en novembre 2014 permettent de mettre en évidence que l'écoulement de l'eau souterraine atteint l'entrée spéléologique de la cavité lorsque le siphon 1 est à une hauteur d'eau suffisamment haute pour passer au-dessus de tous les seuils (ou points hauts) relevés dans la topographie spéléologique, correspondant à un niveau d'eau de l'ordre de 10 mètres au-dessus de la sonde de mesure. Toutes

ces mesures et leurs interprétations permettent aujourd'hui de comprendre quelles sont les conditions pour générer une crue dans la cavité. L'élément majeur est l'intensité de la pluie, qui provoque un écoulement entre le siphon et l'entrée spéléologique dès qu'une pluie de forte intensité de l'ordre de 50 mm/j tombe sur le massif Saint Clément. Le projet se poursuit avec l'installation de sondes supplémentaires depuis décembre 2015 : quatre sondes pression-température ont été positionnées sur des points clés de la cavité entre le siphon et l'entrée. Avec un pas de temps de mesure de 1 minute, ces sondes permettront de voir l'avancée des crues dans la galerie. Le but est de continuer à acquérir des connaissances sur les milieux karstiques pour mieux comprendre leur contribution aux risques naturels. Les données acquises sont accessibles pour être utilisées dans le cadre de projets pédagogiques. Les enseignants intéressés peuvent contacter les auteurs pour une mise à disposition.

## Remerciements

Ce projet a bénéficié du soutien de nos infrastructures et de nos partenaires : CEREGE, directions des collèges Pierre de Coubertin et Jean Giono, DSDEN83, Corps d'inspection académique, DAAC Nice, PASIE, Département du Var, Association SpéléH2O, Agence de l'Eau (études Karsteau et Dardennes), Comité départemental de spéléologie du Var (CDS83), Météo-France. Merci à tous les spéléos du Var et d'ailleurs pour leur aide précieuse sur le terrain, et tout particulièrement à Thierry Lamarque, Philippe Maurel, Denis Laty, Lucie Dal Soglio, Simon Perret et Jean-Pierre Lucot (topographie).

## Bibliographie

**ARFIB B., NOVAES C., BAUDEMENT C., DUFRESNE C. and DUFFA C., 2016** - Origin of flash flood water of a Mediterranean river in karstic and urban environments by CTD monitoring (Las - Toulon - SE France). *Proceedings Conference Eurokarst 2016*, Neuchâtel 5-9 sept. 2016.

**AUDIBERT E. et 24 CO-AUTEURS, 2013** - Étude du paléo-débit de la grotte des Rampins estimée grâce à la mesure de vagues d'érosion. *Spelunca* 132. p. 37-40.

**AUDRA P. and PALMER A.N., 2013** - The vertical dimension of karst: controls of vertical cave pattern. In: J.E.I.C. Shroder and A.E. Frumkin (Editors), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, Karst Geomorphology, p. 186-206.

**BLANC J.J., 2010** - Les surfaces karstiques au nord de Toulon. *Karstologia Mémoire* n°10, *Grottes et Karsts de France*. P. Audra éd. p. 252-253.

**BULLETIN OFFICIEL de L'ÉDUCATION NATIONALE, 2015** - Programmes d'enseignement du cycle des apprentissages fondamentaux (cycle 2), du cycle de consolidation (cycle 3) et du cycle des approfondissements (cycle 4). Arrêté du 9-11-2015 - J.O. du 24-11-2015, *BOEN spécial* n°11.

**FLEURY P., MARÉCHAL J.-C. et LADOUCHE B., 2013** - Karst flash-flood forecasting in the city of Nîmes (southern France). *Engineering Geology*, Volume 164, p. 26-35.

**FLEURY P., BORRELL-ESTUPINA V., KONG-ASIOU L., JOHANNET A., DARRAS T., PISTRE S., GUILHALMENC M., MARÉCHAL J.-C. et DÖRFLINGER N., 2015** - Crues, partie I : rôle du karst dans les crues du fleuve [Lez]. *Karstologia* n°62, 2<sup>ème</sup> sem. 2013. p.41-48.

**MARÉCHAL J.-C., LADOUCHE B. and DÖRFLINGER N., 2008** - Karst flash flooding in a Mediterranean

karst, the example of Fontaine de Nîmes. *Engineering Geology* 99, p. 138-146.

**MÉTÉO-FRANCE, 2016a** - Comprendre les Pluies intenses. Consulté le 02/03/2016. <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/phenomenes-meteo/les-pluies-intenses>.

**MÉTÉO-FRANCE, 2016b** - Les pluies extrêmes méditerranéennes. Consulté le 02/03/2016. [http://pluiesextremes.meteo.fr/episodes-mediterraneens\\_r48.html](http://pluiesextremes.meteo.fr/episodes-mediterraneens_r48.html)

**SOUBEYROUX J.-M., 2011** - Climatologie des épisodes pluvieux extrêmes en France. *Météo - Le magazine*, n°14. p. 22-25.

**Lien internet vers le projet Eaux souterraines :** <http://www.karsteau.fr/karst/neoules.html>  
<http://groundwaters.wikispaces.com>