Collection
EDYTEM
Numéro 13 - Année 2012

Coordination :
Jean-Jacques Delannoy
Stéphane Jaillet
Benjamin Sadier

KARSTS
PAYSAGES et PRÉHISTOIRE

Collection EDYTEM
Laboratoire
Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne

Numéro 13 - Année 2012

Karsts
Paysages et Préhistoire

Journées 2012 de l'Association Française de Karstologie
dans le Sud-Ardèche

Coordination de l'ouvrage : Jean-Jacques Delannoy, Stéphane Jaillet, Benjamin Sadier

Association Française de Karstologie
La Grotte Chauvet Pont-d'Arc Grand Projet
Rhône-Alpes Région Grand Projet La Grotte Chauvet Pont d'Arc
Les Amis du Musée de préhistoire d'Orgnac
Comité Départemental Spéléologie ardèche
Laboratoire EDYTEM Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne
cnrs
Université Savoie Chambery Annecy
Liberté • Égalité • Fraternité République Française
Ministère Culture Communication
Grand Site Aven d'Orgnac

Comité éditorial de la Collection EDYTEM : Laurent ASTRADE (dir.), Xavier BODIN, Émilie CHALMIN, Jean-Jacques DELANNOY, Mélanie DUVAL, Dominique GASQUET, Christophe GAUCHON, André PAILLET, Magali ROSSI.

Comité de rédaction du présent numéro : Jean-Jacques DELANNOY, Stéphane JAILLET, Benjamin SADIER.

Comité de lecture du présent numéro : Philippe AUDRA (Université de Nice), Jean-Yves BIGOT (Association Française de Karstologie), Vincent BIOT, Yann CALLOT (Université Lumière Lyon 2), Jean-Jacques DELANNOY, Mélanie DUVAL, Jean-Michel GENESTE (Centre National de Préhistoire), Christophe GAUCHON, Stéphane JAILLET, Olivier LAZZAROTTI (Université de Picardie Jules Verne), Yves PERRETTE, Edwige PONS-BRANCHU (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines), Pierre SABATIER, Marion SABOURDY (Journaliste scientifique, Grenoble).

Mise en page : André PAILLET.

Les personnes ci-dessus, citées sans indication de structure d'appartenance, sont membres du laboratoire EDYTEM.

NB : Les points de vue et conclusions développés dans les articles n'engagent que leurs auteurs.

La publication de ce volume a été réalisée dans le cadre des journées 2012 de l'Association Française de Karstologie qui se sont déroulées en Ardèche du 20 au 23 septembre 2012. Cette manifestation a bénéficié du soutien des structures suivantes :

l'Association Française de Karstologie ;
le Grand Projet LA GROTTE Chauvet Pont-d'Arc ;
le syndicat mixte de l'Espace de Restitution de la Grotte Chauvet ;
la commune d'Orgnac-l'Aven et le Grand Site de l'Aven d'Orgnac ;
le ministère de la Culture et son Centre National de Préhistoire ;
l'université de Savoie ;
la délégation Alpes du CNRS (DR11) ;
le comité départemental de spéléologie de l'Ardèche ;
les Amis du musée de préhistoire d'Orgnac.

Imprimé par : Imprimerie Brailly, Parc INOPOLIS - 62, route du Millénaire - BP 34, 69564 St-Genis-Laval cedex.

Exemplaires disponibles au Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie, Campus scientifique,
73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France, ou auprès de : sec-edytem@univ-savoie.fr

Site web du laboratoire : http://edytem.univ-savoie.fr/

On trouvera à la fin de cet ouvrage la présentation de l'ensemble des publications du Laboratoire EDYTEM

Dépôt légal : septembre 2012

ISSN : 1762-4304 - ISBN : 978-2-918435-05-1 - EAN : 9782918435051

LES CRUES DU SYSTÈME KARSTIQUE DE FOUSSOUBIE
ARDÈCHE, FRANCE

UNE ANALYSE GÉOMORPHOLOGIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES CIRCULATIONS DANS LA ZONE ÉPINOYÉE DU KARST

Floods in the Foussoubie karst system (Ardèche, France)

Geomorphological and hydrodynamic analysis in the epiphreatic karstic zone

Stéphane JAILLET [1, 2], Didier CAILHOL [1, 2], Judicaël ARNAUD [3], Laurent ASTRADE [1], Christelle BELINGARD [4], Élisa BOCHE [1, 2, 5], Thomas CORNILLON [6], Isabelle COUCHOUD [1], Rémi DUGUET [7], Norbert FRANCK [8], Christophe GAUCHON [1, 2], John HELLSTROM [9], Patrick LE ROUX [10], Philippe MONTEIL [6], Olivier PEYRONEL [7, 11], Edwige PONS-BRANCHU [7], Benjamin SADIER [1, 2], Matthieu THOMAS [1, 2]

[1] *Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie / CNRS, Pôle Montagne, Campus scientifique, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex.*

[2] *Speleus – Spéléologie, Université de Savoie, Pôle Montagne, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex.*

[3] *Comité départemental de Spéléologie de l'Ardèche, les Blaches, 07120 Chauzon.*

[4] *GEOLAB, 39E rue Camille Guérin, 87036 Limoges.*

[5] *Centre national de Préhistoire, Ministère de la Culture, 38 rue du 26e RI, 24000 Périgueux.*

[6] *CESAME, Centre Éclaireur de Spéléologie et d'Archéologie de Mézelet, 26 rue de la Noyera, 38090 Villefontaine.*

[7] *Spéléo Club des Gorges de l'Ardèche, 07150 Vallon - Pont-d'Arc.*

[8] *LSCE, UMR 8212 CNRS-CEA-UVSQ, 91191 Gif-sur-Yvette.*

[9] *School of Earth Sciences, University of Melbourne, Victoria 3010, Australia.*

[10] *Groupe de Recherches Biospéléologiques, 13 impasse Le Roux, 29000 Quimper.*

[11] *Réserve naturelle des gorges de l'Ardèche, SGGA, 07700 Saint-Remèze.*

Contact : stephane.jaillet@univ-savoie.fr

Résumé

Réseau majeur de la rive droite des gorges de l'Ardèche, le système karstique de Foussoubie, avec un développement de plus de 23 km, est surtout connu pour la violence de ses crues, notamment au niveau de la Goule, perte principale du système. Bien que de nombreuses interrogations subsistent encore quant aux modalités exactes des circulations de l'eau dans la zone noyée, Foussoubie offre l'avantage d'une connaissance quasi exhaustive des conduits de la zone épinoyée, depuis la base des puits jusqu'à l'exutoire du système : l'Évent de Foussoubie.

Cette connaissance spéléologique « totale » des drains de la zone épinoyée, sur plus de 7 km de percée hydrogéologique, fait de ce système un site pertinent pour l'étude des ondes de crues dans un karst à conduit dominant. Un « groupe d'étude Foussoubie » s'est depuis trois ans constitué en collectif informel, réunissant des universitaires, des spéléologues et des spécialistes. L'équipement d'une dizaine de capteurs de pression et de température dans l'ensemble du système a ainsi permis, au cours de l'hiver 2010 / 2011, l'enregistrement de plusieurs de ces crues. L'analyse de ces données (pas de temps de ¼ d'heure) offre aujourd'hui une lecture géographique, spatialisée, « en long », du passage des ondes de crue dans le système souterrain. Il est possible d'y déceler le contrôle géométrique des conduits, à l'échelle fine (rôle des carrefours, seuils de déversement), comme à l'échelle du système (zone de transit vs. zone de stockage).

Des pistes originales sont proposées pour poursuivre l'étude de ces crues en utilisant des méthodes complémentaires (érosion des édifices stalagmitiques, analyse du transit des batraciens, dendrochronologie sur troncs d'arbres emportés…).

***Mots-clés** : hydromorphologie karstique, crue souterraine, zone épinoyée, karst ardéchois, système de Foussoubie.*

Abstract

Major network of the right bank of the Ardèche Gorges, the Foussoubie karst system (development of over 23 km) is best known for these importants floods, particularly in "la Goule", the unique sinkhole of the system. Although many questions still remain about the exact modalities of water circulation in the saturated zone, Foussoubie offers the advantage of an almost exhaustive knowledge of the epiphreatic zone, from the base of the vadose zone until the outlet of the system: "l'Event de Foussoubie".

This good speleological knowledge (over 7 km of hydrogeological underground river) makes this an appropriate site for the study of flood waves in this type of karst. A "study group Foussoubie" was established during three years. He is composed by academics, specialists and cavers. The equipment of ten pressure sensors and temperature throughout the system thus enabled, during the winter 2010/2011, the recording of several floods. Analysis of these data (time step 15 mn) now provides a geographical reading, spatial of these floods. It is possible to detect the geometric control of galleries at the fine scale (role intersections, thresholds of discharge), and in all the system (transit area vs. storage area).

Some originals ideas are proposed for further study of these floods using complementary methods (speleothems erosion, flow analysis of amphibians, dendrochronology on tree trunks in the karst...).

***Keywords**: Karstic hydromorphology , underground floods, epiphreatic zone, Ardèche karst, Foussoubie system.*

« La structuration des circulations karstiques n'est jamais achevée »
Jacques Choppy, 2008.

Introduction

Lorsqu'en 1963, le 3 juin précisément, une équipe de cinq spéléologues lyonnais se fait « coincer » par la crue, la Goule de Foussoubie connaît d'emblée une notoriété nationale (Figure 1). De ce drame, seuls trois rescapés ressortiront (Letrône, 1963) et les deux autres, Jean Dupont et Bernard Raffy seront malheureusement emportés par les eaux. Plus tard, ils verront leurs prénoms associés au gouffre Jean Bernard qui restera longtemps le plus profond du monde (Rias, 1991 ; Frachon [1]). Tant par ce drame que par son nom, la « fontaine subite », Foussoubie reste aujourd'hui encore très associé dans l'inconscient collectif des spéléologues à la crue souterraine, à sa violence, à son caractère imprévisible, renvoyant l'explorateur souterrain à sa vulnérabilité. Cette image d'un réseau souterrain « incontrôlable », où « il ne fait pas bon être surpris » par les crues, perdure d'ailleurs toujours et la dernière crue cévenole de septembre 2002 (Figure 2), qui vit la perte s'engorger et la plaine alentour s'inonder, n'a fait que renforcer cette impression, cette spécificité du système. On connaît d'abord Foussoubie pour son hydrologie particulière, pour ses crues souterraines violentes, pour l'ennoiement total de ses drains.

Mais, et cela paraîtra sans doute paradoxal, le système karstique de Foussoubie n'a pas fait l'objet d'étude hydrogéologique poussée. Les recherches spéléologiques y ont été discontinues mais actives,

Minute de vérité, cette nuit à la goule de Foussoubie : les secouristes ont tenté d'atteindre les engloutis

Photo du haut : vue générale de l'entrée du gouffre et le camp des sauveteurs à proximité. On distingue, au premier plan, le tuyau par lequel on tente de pomper l'eau ; ci-dessus : penché sur le trou, l'un des sauveteurs lance dans le courant un container de vivres

Figure 1 - Lors de la crue de juin 1963, la presse suit de près la tragédie des cinq spéléologues coincés dont seulement trois ressortiront vivants. Photo Le Progrès, 7 juin 1963. Extrait site JuraSpeleo.

[1] *http://juraspeleo.ffspeleo.fr/docu/presse/1963/foussoubie/foussoubie.htm*

Figure 2 - La crue de septembre 2002 est un épisode cévenol spectaculaire qui a ennoyé toute la partie aval de la plaine drainée par la Goule de Foussoubie (en haut, lors de la crue ; en bas, en situation d'étiage). Photos O. Peyronel.

souvent à l'initiative de groupes spéléologiques extra-ardéchois (Le Roux, 1984). Des travaux de recherches en biospéléologie y ont été menés mais peu publiés. Vervier (1988) a mené une importante campagne de captures biologiques à l'Évent de Foussoubie. Callot (1979) s'y est intéressé pour une analyse géomorphologique en relation avec les morphologies externes. Belleville (1985) y a identifié le fonctionnement et surtout les limites des bassins d'alimentation des systèmes karstiques dont celui de Foussoubie. Plus récemment, des travaux sur l'incision du réseau hydrographique de l'Ardèche ont cherché à raccorder le système de Foussoubie aux variations associées au cycle messino-pliocène (Mocochain et *al*., 2006 ; Bigot, 2006). Mais peu d'auteurs traitent directement des crues du système de Foussoubie tant dans leur aspect morphogénétique que fonctionnel. Le Roux et Drouin (2001) n'identifient pourtant pas moins de 781 références bibliographiques (comprenant les simples mentions et citations) sur le système, mais pas d'études spécifiquement hydrologique ou hydrogéologique sur le réseau, alors que celui-ci le mérite amplement. Il offre en effet l'avantage rare d'être spéléologiquement connu sur les 7 km de sa percée hydrologique, depuis la perte unique et majeure que constitue la Goule, jusqu'à l'Évent dans les gorges de l'Ardèche. Le bassin amont est correctement circonscrit (Callot, 1979 ; Belleville, 1985), les 23 km reconnus dans le réseau souterrain constituent un support à l'analyse géométrique des drains et chaque année, des crues cévenoles ou hivernales l'affectent multipliant d'autant les évènements étudiables. À bien des égards, Foussoubie semble constituer un cas emblématique et éloquent notamment pour l'analyse du transit des ondes de crue dans un karst à conduit dominant. Étudier ce réseau, sur cette question fondamentale, devenait alors logique. Réunis depuis trois ans en un groupe informel comprenant des universitaires, des spéléologues et des spécialistes, nous avons cherché à

mieux comprendre les modalités de l'écoulement dans le système de Foussoubie et ses implications en termes de morphogenèse. En effet, les crues ont toujours été un élément important de la spéléogenèse. La constitution de l'onde de crue dépend des conduits traversés tout comme la géométrie de ces conduits est sous contrainte des variations hydrologiques subies par le système (Choppy, 1992 ; Jaillet, 1999). Étudier les crues dans les karsts, c'est donc se placer à l'interface d'une dialectique comprenant structuration karstique (au sens genèse des drains) et fonctionnement hydrologique (au sens dynamique des écoulements dans les drains).

Dans cet esprit, le présent article se propose d'aborder les crues du système de Foussoubie à travers plusieurs entrées. D'abord par l'entrée géomorphologique, en comprenant en quoi la structuration des drains du système, mais aussi l'analyse des dépôts, permettent de montrer le basculement qui s'est opéré au cours du temps vers un fonctionnement de plus en plus contrasté où les crues constituent un élément finalement plus prégnant aujourd'hui qu'hier. Ensuite par l'analyse des crues elles-mêmes sur une saison hydrologique. L'apparition récente de capteurs de pression autonomes et légers, d'abord conçus pour l'enregistrement des plongées, a constitué en effet une facilité que nous avons cherché à exploiter. L'analyse des données issues de dix de ces capteurs offre une lecture spatialisée, « en long », du passage des ondes de crue dans le système souterrain. Enfin, des pistes originales sont proposées pour poursuivre l'étude de ces crues en utilisant des méthodes complémentaires (analyse 3D de zones de cascades, érosion des édifices stalagmitiques, analyse du transit des batraciens, dendrochronologie sur troncs d'arbres emportés…).

I - Un système ayant basculé vers un fonctionnement contrasté

Si le système de Foussoubie connaît des crues si spectaculaires, c'est que la perte unique et majeure du système draine un bassin en grande partie inscrit dans des roches imperméables. Une présentation sommaire du contexte général, géologique et géomorphologique sera suivie d'une analyse des drains et du site de la Goule. L'ensemble de ces données montre que d'une manière générale, le système bascule de plus en plus vers un fonctionnement contrasté où les crues prennent une place de plus en plus prédominante.

1 - Un bassin imperméable se jetant dans un karst à conduit dominant

Le réseau karstique de Foussoubie se développe en totalité dans les calcaires de l'Urgonien. Le bassin versant de la Goule draine en grande partie dans les dépôts détritiques tertiaires de la dépression synclinale de Labastide-de-Virac (Pascal et *al*., 1989 a et b). D'un point de vue structural, le réseau se développe sur la marge ouest de la retombée périanticlinale de l'anticlinal du Saleyron et il est probable que les conduits épousent avec une large courbe cette terminaison (notamment entre la Goule et le Camp de base). Les points les plus hauts du bassin culminent vers 360 m au niveau de la surface du plateau de Ronze, la perte se situant vers 200 m NGF. Une partie importante du bassin est occupée par une surface plane vers 220 m NGF (Figure 3). Cette surface a parfois été attribuée à un poljé, mais les critères obéissant à ce type de forme ne permettent pas de retenir cette définition (Callot, 1979). Cette surface s'étend vers l'amont du bassin jusqu'à Vagnas et vers l'est jusqu'à Labastide-de-Virac. Vers le sud-ouest, elle semble tronquée par un réseau hydrographique conquérant, progressant par érosion régressive du sud-ouest vers le nord-est et dépendant du bassin hydrographique de la Cèze. Vers le nord, cette surface se connecte avec le vallon sec qui surplombe le réseau souterrain de Foussoubie. La Goule de Foussoubie s'ouvrant vers 200 m NGF, ne se raccorde pas véritablement à cette surface qui paraît finalement légèrement perchée. On note d'ailleurs au droit de la Goule de Foussoubie une « légère cuvette » correspondant au drainage de surface actuel, connecté à la perte proprement dite. Cette dépression proximale de quelques mètres d'incision est donc emboitée dans la surface à 220 m[1].

Le bassin versant actuel de la Goule de Foussoubie apparaît finalement comme une surface relictuelle auquel il manque une part non évaluée à ce jour (Figure 4). Ce bassin de la Goule mesure à présent 14,4 km² pour un périmètre de 19,6 km (Figure 3). Nous n'avons pas procédé à l'évaluation de la surface d'alimentation exacte du système total (à l'Évent). En effet, les limites de ce bassin d'alimentation, au droit du réseau karstique ne sont pas connues. Ces limites changent selon qu'une partie de l'eau s'infiltre ou au contraire ruisselle en surface. En outre, les modalités du drainage souterrain ne sont pas encore clairement comprises (Belleville, 1985). Il sera fécond dans la suite de ce travail de croiser cette analyse topographique avec la lithologie du substratum afin de mieux contraindre les zones qui font strictement l'objet de ruissellement de celles qui font l'objet d'infiltration.

Avec près de 23 km de développement spéléologique, Foussoubie se prête assez bien à une analyse géo-

[1] *La plaine de rive droite au niveau de la Goule est un comblement quaternaire d'une épaisseur minimale de 12 m (plusieurs forages y ont été réalisés dans les années 1970). On peut imaginer qu'un entonnoir plus profond (paléo-ponor ?) pourrait exister dans ce secteur et aboutir dans le réseau plus bas.*

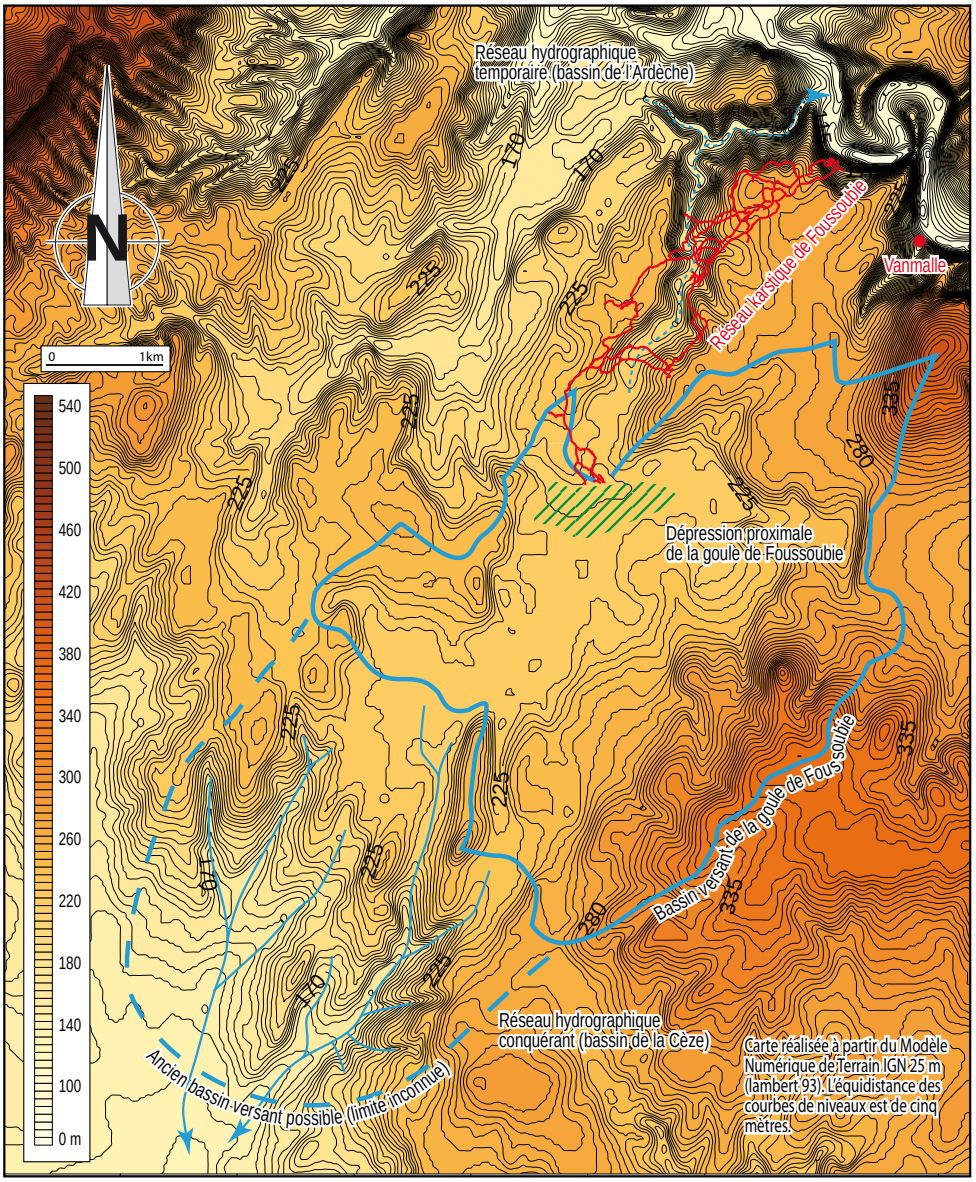

Figure 3 - Le système karstique de Foussoubie dans son contexte topo-hydrographique. Le bassin versant de la Goule (14,4 km²) est occupé par une surface plane vers 220 m NGF, tronquée à l'amont par le réseau hydrographique conquérant du bassin de la Cèze.

métrique et géomorphologique des drains (Figure 4). Amorcée par Callot (1979), cette étude est complétée par les découvertes et explorations plus récentes (Le Roux, 1984), par le recours à l'analyse 3D (Jaillet et *al.*, 2011) et par l'évolution des idées sur la spéléogenèse des drains de la zone épinoyée (Audra, 2010 ; Häuselmann, 2010). Car c'est la zone épinoyée du karst qui voit l'essentiel des développements spéléologiques dans Foussoubie. Les drains majeurs connus dans le réseau appartiennent pratiquement tous à cette zone.

2 - Une lecture spatialisée des drains

Il est possible, en première approximation, de segmenter le réseau en quatre zones fonctionnelles de l'amont vers l'aval (Figure 4). À ces quatre zones (1 à 4), dont la logique est autant spatiale qu'altitudinale, s'ajoutent des conduits abandonnés (5 à 6) :

1 - La zone des puits, depuis l'entrée de la Goule de Foussoubie (200 m NGF) jusqu'au Siphon 0 (140 m NGF), est un secteur au profil longitudinal très accusé, constitué d'une série de puits et de courts tronçons de galerie. En une soixantaine de mètres de dénivellation, le ruisseau extérieur de la Planche se retrouve une soixantaine de mètres au-dessus de l'Évent de Foussoubie, sept kilomètres plus au nord.

2 - La galerie SCUCL, en **amont** du Camp de base, est un drain épiphréatique dont le gabarit plurimétrique présente une section plus ou moins régulière, tantôt en laminoir (Figure 5), tantôt en tube (Figure 6), le tout avec des boucles de galeries faiblement étagées (galerie SCS). L'altitude oscille entre 140 m NGF et 125 m NGF. Le profil longitudinal de cette zone est marqué

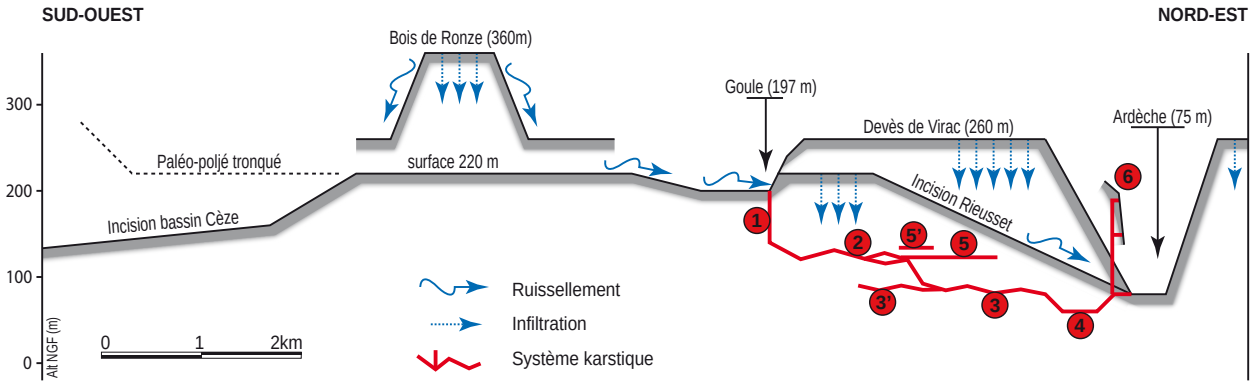

Figure 4 - Coupe synthétique du système karstique de Foussoubie, depuis son bassin versant jusqu'à l'Ardèche. Les chiffres renvoient au texte.

Figure 5 - Les drains de la zone épinoyée du système de Foussoubie sont parfois des conduits en laminoirs larges et peu élevés comme ici la galerie SCIS en aval du Carrefour du 14 juin. Photo S. Jaillet.

par des montagnes russes à très grands rayons de courbure, bien moins nettes que dans les karsts alpins, mais associant clairement des zones amont à contre-pente avec mises en charge temporaire et des zones aval avec morphologies éloquentes de seuil de déversement et ébauche de marmitage (Figure 7).

3 - La galerie SCUCL, à l'**aval** du Camp de base[2], est un conduit d'un gabarit plus modeste, entre 100 m NGF et 80 m NGF. Elle se situe une vingtaine de mètres en contrebas de la zone précédente. Comme dans la zone 2, l'ennoiement y est total en période de crue. Cependant, bien qu'appartenant aussi à la zone épinoyée, le profil en montagne russe y est moins marqué. Localement le conduit s'aligne sur des discontinuités tectoniques majeures (Figure 8). La zone des écoulements inférieurs (galerie SSN**)** (3') est constituée de conduits plus petits, non reconnus dans le cadre de cette analyse et oscillant vers 95 m NGF.

[2] *Le secteur du Camp de base constitue un carrefour complexe où s'articulent les zones 2, 3, 5 et 5'. À ce titre, il est le siège actuellement d'études cartographiques fines.*

4 - La zone noyée du karst est constituée par le Siphon 4 (Siphon A de l'Évent, Figure 9) à la cote 78 m NGF. D'une longueur de 340 m pour une profondeur de 20 m, il s'enfonce à 58 m NGF soit 7 m sous le bed-rock de l'Ardèche. L'exutoire pérenne est à peine perché tandis que l'exutoire de crue est perché de 15 m environ.

5 - La galerie des Pyjamas est le prolongement altitudinal de la zone 2, entre 125 m NGF et 115 m NGF, mais avec des morphologies cependant bien différentes. Il s'agit d'un ancien tube surcreusé, marqué par des morphologies de rivières souterraines, sans doute pérennes, sans variation importante du niveau des écoulements. Cette galerie est surmontée d'un niveau supérieur (5') à tube phréatique : les galeries Buen Retiro - SSF vers 130 à 135 m NGF (Figure 10).

Ces cinq zones sont affectées par les crues du réseau karstique. Les quatre premières, structurées d'amont en aval, le sont chaque année par les crues qui traversent le système. La zone 5 l'est rarement lors de mises en charge exceptionnelles qui laissent des témoins sous

Figure 6 - La galerie SCUCL en aval du Carrefour Aval est un tube épiphréatique caractéristique. L'écoulement se fait ici localement à contre pendage (dans le sens de progression du spéléologue) et recoupe transversalement une série de fractures. Photo S. Jaillet.

forme de dépôts détritiques. Ainsi, les poubelles des explorations des années 1960 au droit du Camp de base réapparaissent aujourd'hui à la faveur de la mobilité du remplissage sédimentaire pluri-décimétrique présent au sol (Figure 10 b). À l'aval du système, au droit de l'Évent, une série de puits-cheminées (Mocochain et *al*., 2006) (zone 6, Figure 4) pourrait correspondre à des paléo-exutoires à 145 m NGF (aven Cordier) et 191 m NGF (Évent sup.). N'étant pas affectée par le fonctionnement actuel du système, cette zone n'est pas analysée dans la présente étude.

En effet, il n'est pas question, ici, de discuter des relations chronologiques qui unissent ces différentes zones, ni de les recontextualiser dans le cadre de l'évolution géomorphologique régionale. Cela fera l'objet d'un autre travail. Il est par contre intéressant de comprendre en quoi ces zones fonctionnent aujourd'hui de manière synchrone et comment la dynamique de l'écoulement est aujourd'hui en accord ou non avec les morphologies qu'elles proposent.

Figure 7 - En amont du Carrefour du 14 juin, la galerie SCUCL est un tube d'environ 4 m de diamètre, incisé en trou de serrure. L'incision va grandissante à mesure que l'on progresse vers l'aval et le conduit atteint une hauteur de près de 8 m pour une largeur de 3 à 5 m environ. Toute cette zone est marquée par une dynamique d'incision et d'érosion régressive caractérisée par des morphologies de marmitage et d'abrasion des parois. Photo S. Jaillet.

3 - Un fonctionnement hydrologique de plus en plus contrasté

Ainsi les zones 2 et 3 (Figure 4) appartiennent bien à la zone épinoyée du karst et présentent des morphologies en accord avec les fonctionnements identifiés actuellement. En revanche, la zone 5 (galerie des Pyjamas) présente des morphologies de rivières souterraines surcreusées avec marques d'altérations pariétales caractéristiques d'écoulement pérenne à surface libre. Aujourd'hui occupée temporairement par les mises en charge du système, la galerie des Pyjamas constitue donc un témoin d'un paléo-fonctionnement ancien, perché au-dessus des écoulements et probablement associé à une géographie du bassin d'alimentation différente. Il est possible qu'à ce moment une

Figure 8 - Dans la partie extrême aval du réseau de Foussoubie, peu avant le Siphon 4, le conduit s'aligne sur un magnifique plan de faille témoignant ici d'une adaptation locale aux contingences offertes par le canevas structural. Photo S. Jaillet.

Figure 9 - Le Siphon A est le siphon principal du système, coté Évent de Foussoubie et se situe 5 m plus haut que l'Ardèche à l'étiage. Coté Goule de Foussoubie, ce même siphon s'appelle Siphon 4. Photo S. Jaillet.

Figure 10 - La galerie du Camp de base qui a servi pour les explorations durant les années 1960 et 1970. a - c'est une galerie, vers 130 m NGF, perchée d'une dizaine de mètres par rapport aux galeries principalement actives. Elle a subi, depuis cette période, plusieurs crues qui ont recouvert le sol d'un dépôt détritique fin ; b - les poubelles enterrées des explorations des années 1960 sont dégagées par les crues (elles n'étaient pas visibles dans les années 1970) ; c - une coupe permet d'apprécier la stratification de cette séquence sédimentaire pluri-décimétrique mobile. Photos S. Jaillet.

couverture non carbonatée (nappe alluviale ancienne[3]) surmontait le plateau karstique actuel. Cette dernière aurait joué le rôle de « compresse humide » et étalé le flux hydrologique, limitant les contrastes hydriques qui caractérisent les morphologies à tube épiphréatique reconnu en amont (zone 2) et en dessous (zone 3). Rien ne permet pour l'heure de le démontrer.

De même note-t-on en plusieurs endroits du réseau l'existence d'importants dépôts stalagmitiques aujourd'hui très affectés par les crues. Ceci est reconnu depuis la zone d'entrée jusqu'aux plus profondes galeries (zone 3, Figures 4 et 11). Cela démontre l'existence de phases de stabilité dans le réseau suffisamment longues et exemptes de crises importantes pour laisser ces édifices croître. Cela démontre aussi qu'après ces phases de stabilité, il existe une ou plusieurs phase(s) d'érosion intense telle celle qui caractérise aujourd'hui le fonctionnement hydrologique du réseau, alors que le climat actuel est plutôt considéré comme favorable à la croissance des concrétions. Il semble donc exister une alternance complexe entre ces phases de croissance et ces phases de déstabilisation, complexe tant dans la succession des évènements que dans sa répartition à l'échelle du réseau. Nous verrons plus loin les pistes proposées pour lever ces interrogations.

Qu'il s'agisse donc de genèse de drains (dissemblance entre les paléo-conduits traduisant des écoulements à faible contraste hydrologique et les conduits de la zone épinoyée actuelle) ou d'évolution et de démantèlement d'édifices stalagmitiques (dissemblance entre des phases de croissance et des phases d'érosion possiblement non corrélées aux variations climatiques), tout montre qu'il y a eu, au cours du temps, un basculement vers un fonctionnement de plus en plus contrasté, c'est-à-dire plus marqué par les crues à l'échelle d'un cycle hydrologique d'un an. Il n'est guère possible pour l'heure de définir si cette évolution fut lente ou brutale ou si même elle a connu des contre-évolutions. Toujours est-il que, par ses formes et ses dépôts, le système offre ici une possibilité intéressante de démêler les réajustements fonctionnels identifiés dans le karst au cours de son évolution.

Parmi ces évolutions et ces réajustements, le site de la Goule lui-même semble présenter les marques d'une

[3] *La surface du Devès de Virac est une surface d'érosion à 260 m et pourrait correspondre à un ancien passage de l'Ardèche (Mottet, 1993 ; Delannoy et* al.*, 2007) et qui pourrait correspondre à la fin de l'aggradation pliocène (Mocochain et* al.*, 2006, 2009).*

Figure 11 - Dans la partie aval du système de Foussoubie, d'anciennes générations de concrétions sont identifiées. Elles sont très largement affectées par les crues qui ont recoupé les édifices à l'emporte-pièce. Des repousses, elles-mêmes en partie affectées, scellent ces différentes surface d'érosion et montrent la complexité des alternances croissance/érosion dans le système. Photo S. Jaillet.

évolution brutale ayant conduit à une pénétrabilité plus importante des eaux de surface.

4 - Le site de la Goule et sa capture récente

Perte unique du système, drainant un bassin de 14,4 km², le site d'entrée de la Goule présente les morphologies éloquentes d'un réajustement complet et brutal de la dynamique des écoulements au droit de la perte. Une analyse morphologique du site permet de caractériser différents tronçons clés (Figure 12) :

– **la zone des marmites d'entrée** est un tube d'environ 3 m de section qui, de l'entrée proprement dite au premier volume, est une succession de marmites. Les morphologies pariétales sont marquées, du sol au plafond, par les crues successives qui empruntent la totalité du conduit ;

– **la première salle principale** est un volume plus conséquent (15 m de hauteur, 10 m de largeur, aligné sur une discontinuité tectonique orientée NW-SE). Il n'est pas totalement ennoyé par les crues ;

– **la galerie des Ratapanades**[4] est une galerie plus modeste, alignée sur la même discontinuité et se prolongeant vers le SE ;

– **le réseau Percé** est une galerie perchée au-dessus de la première salle principale avec laquelle il communique par plusieurs regards.

L'organisation de ces tronçons de conduits laisse voir le caractère diachrone de leur mise en place. Il semble raisonnable de considérer les Ratapanades et la salle principale comme appartenant à un même ensemble auquel la galerie d'entrée vient se raccorder, probablement dans un second temps[5]. Dans cette occurrence, il semble possible d'envisager une mise en place du site en trois temps[6] (Figure 12). Dans un premier temps (Stade 1), la perte s'organise par la galerie des Ratapanades depuis une perte non connue, située au sud-est de la Goule. La géométrie du conduit est mal connue, mais probablement modeste. Cette perte, incapable d'absorber la totalité du flux hydrique provoque l'ennoiement de la plaine proximale (Stade 2).

[4] *Nom vernaculaire pour chauves-souris.*

[5] *Le fond des Ratapanades est une trémie qui « souffle » durant les crues (phénomène lié à la compression de l'air, Jaillet, 1999) plus ou moins dans l'ancien petit chemin descendant du plateau derrière le chenil de Robert Peschaire. Il est très probable que ce conduit était une ancienne perte, antérieure à l'ouverture de la Goule actuelle.*

[6] *Il ne s'agit ici que des derniers stades d'évolutions du site de la Goule. Avant, ces derniers stades, le site a connu une évolution encore aujourd'hui mal contrainte, permettant de passer des écoulements dans le vallon sus-jacent à la perte proprement dite par capture des écoulements de surface.*

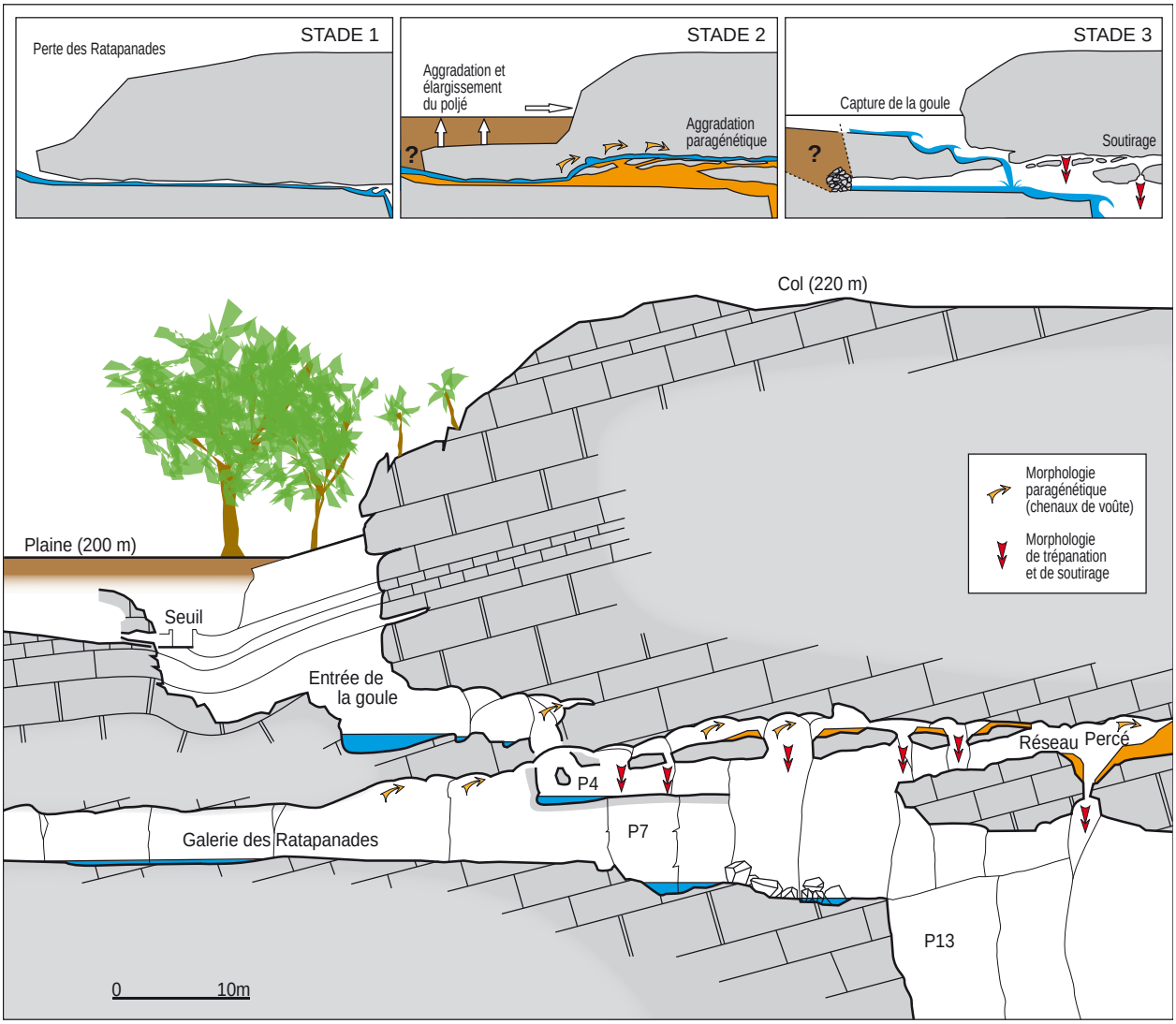

Figure 12 - Coupe synthétique du site de la Goule de Foussoubie et schéma d'évolution de la capture en 3 étapes.

Associées à ce phénomène, les galeries se comblent et évoluent vers un mode de creusement paragénétique ascendant dont les derniers témoins sont présents dans le réseau Percé (chenaux de voûte, dépôt argileux, banquettes pariétales). En surface, l'aggradation sédimentaire et l'ennoiement du poljé doivent favoriser le recul des versants et donc l'agrandissement de la plaine. Au bout d'un certain temps, les conduits paragénétiques sont recoupés par les écoulements de la plaine et de premiers écoulements commencent à se déverser dans la future Goule, sans doute uniquement en période de crue. Après cette période transitoire, d'une durée difficile à évaluer, la totalité du flux passe par la Goule actuelle, impliquant l'abandon de la galerie des Ratapanades qui se comble partiellement (Stade 3). À ce moment là, la capture, ici par déversement (Jaillet, 2001), est aboutie et totale.

Cette évolution est à rattacher aux derniers stades d'évolution de la zone de pertes et du fonctionnement de la plaine alluviale qui l'entoure. On comprend que l'on passe ici d'un fonctionnement où les infiltrations étaient jusqu'à présent limitées et calibrées (galeries du réseau Percé ou des Ratapanades) à un fonctionnement en perte se traduisant par des écoulements plus importants dans le système karstique. La capture locale (et par débordement) des écoulements de surface par la galerie d'entrée de la Goule tend ainsi à accroître la dynamique et le contraste des écoulements pénétrant dans le réseau. Relier ce type de basculement morphologique, ici local, aux variations de géométrie des conduits (conduit à montagne russe / conduit à rivière surcreusée ; incision des édifices stalagmitiques) ne sera possible que par le recours à un calage chronologique fin qui reste à construire.

Cependant, cette « ouverture du système » par la capture locale dans la zone d'entrée de la Goule implique la dynamique des écoulements que nous connaissons aujourd'hui. Analyser cette dynamique à l'échelle des événements comme à l'échelle du réseau est l'objet de la suite de ce travail.

II - Spatialisation et analyse des crues du système

Les observations et mesures réalisées lors de la première campagne d'étude du système de Foussoubie et les éléments de bibliographie consultés ont conduit, à partir de 2010, à la mise en place d'une approche hydrologique sur l'ensemble du réseau. Il ressortait, en effet, différentes interrogations à propos de la compréhension du fonctionnement hydrologique du système et de ses crues spectaculaires, de la géographie des mises en charge dans le réseau et de leur temporalité (décalage et synchronisme) dans le réseau. Comment appréhender ces questions à l'échelle du réseau ? Quelle part accorder aux effets locaux dans la répartition des différentes zones de mises en charge et notamment quel est le rôle des rétrécissements de conduits ou des remplissages dynamiques de fond de galerie ?

1 - Choix instrumentaux

Afin de pouvoir répondre à ces questionnements, il a été entrepris l'instrumentation de la cavité à des emplacements qui semblaient, du point de vue de la géomorphologie, constituer des éléments clés pour la compréhension du fonctionnement hydrologique du réseau de Foussoubie. Dix points de suivi ont été installés sur le réseau à l'aide de sondes enregistreuses *Sensus ultra* de la marque Reefnet (Figure 13). Deux d'entres elles ne sont pas retenues dans l'étude : la plus en amont, à l'extérieur, n'a pas enregistré de variations significatives et la seconde, à l'entrée de la Goule a été arrachée et n'a pu être retrouvée. Les paramètres suivis ont été la piézométrie et la température avec un pas de temps de 15 mn. Les données de pluviométrie furent obtenues à partir du site de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse à la station limnigraphique de Vallon - Pont-d'Arc. La campagne de suivi présentée ici s'est déroulée du 15 juillet 2010 au 13 juillet 2011. Au cours de ce cycle hydrologique 2010-2011, sept épisodes de crue importants ont été enregistrés : un épisode de type cévenol début septembre 2010, trois épisodes de mi-novembre à mi-décembre 2010, un épisode important fin décembre 2010, un épisode hivernal fin janvier 2011 et enfin un épisode printanier au mois de mars 2011. Ces sept épisodes ont provoqué des mises en charge importantes au niveau des différents points de mesures dans le réseau. Ces phases spectaculaires de fonctionnement du système représentent 20,25 jours sur les 362 jours du suivi du réseau, soit 5,6 % du cycle hydrologique 2010-2011.

Les hydrogrammes de crues (Figure 13) montrent une dynamique du réseau avec un fonctionnement de type « drain dominant » et une forte transmissivité hydraulique. Les montées sont rapides, les décrues aussi. Les temps de réaction sont faibles. On note également des seuils de saturation différents selon les sites et qui conduisent à des mises en charge de plusieurs mètres de hauteur selon les différents points. Les grandes variations de la température (Figure 13), variables selon les secteurs considérés, sont de même en adéquation avec les changements importants de débits associés à un renouvellement complet des masses d'eau lors des épisodes de crues. Parmi ces sept crues, deux nous semblent mériter une attention particulière.

2 - Analyse de deux épisodes de crues caractéristiques

À la suite d'un petit épisode de précipitations de type cévenol, une crue s'est produite les 7 et 8 septembre 2010 sur le bassin d'alimentation du système de Foussoubie. Il est tombé 194 mm de précipitations en 48 h à la station de mesures de Vallon - Pont-d'Arc (Figure 14). Cet épisode est survenu après la période de sécheresse estivale. Une première série de précipitations commencée le 7 septembre 2010 à 10 h 50, a conduit à l'activation du réseau de drainage du bassin d'alimentation et amené, à partir de la perte de la Goule, une circulation d'eau dans la cavité avec une augmentation progressive du débit. Une grosse averse s'est produite ensuite, le 7 septembre 2010 à 23 h 50, avec 75 mm de pluie en moins de deux heures. Cela a entraîné de manière quasi instantanée une forte augmentation du débit du ruisseau de la Planche et des écoulements souterrains. Le seuil de saturation des drains a été atteint aux différents points de suivi et a entraîné des mises en charge conséquentes.

La mise en charge maximale est observée au Siphon 4 à l'aval de la Goule, le 8 septembre 2012 à 1 h 50, avec une hauteur d'eau de 12,62 m. Le phénomène a été brusque et rapide, l'eau est montée de 7,26 m en 15 mn, soit une montée de 48,4 cm/mn. Durant cet épisode, on constate, là encore, la transmissivité hydraulique très forte du réseau. La concomitance des pics de crues avec le premier pic de pluviosité est nette. Seul le Siphon B2 connaît un léger décalage temporel. Il faut également noter la très faible influence du second pic de pluviosité sur les débits qui restent dans une phase de décrue malgré ces nouveaux apports. Il est à remarquer la baisse rapide de la courbe de tarissement dès que les précipitations cessent, attestant de l'absence de stockage durant cet épisode.

Un épisode hivernal, la crue de décembre 2010, a parcouru le réseau à la suite d'une averse de 113 mm de hauteur d'eau qui s'est produite du 19 décembre 2010 au 24 décembre 2010 (Figure 15). Cet épisode est survenu après une période sèche et froide. Les premières pluies sont tombées le 19 décembre 2010 à 11 h 05. L'étalement des précipitations a amené des augmentations des débits et des saturations des drains poly-

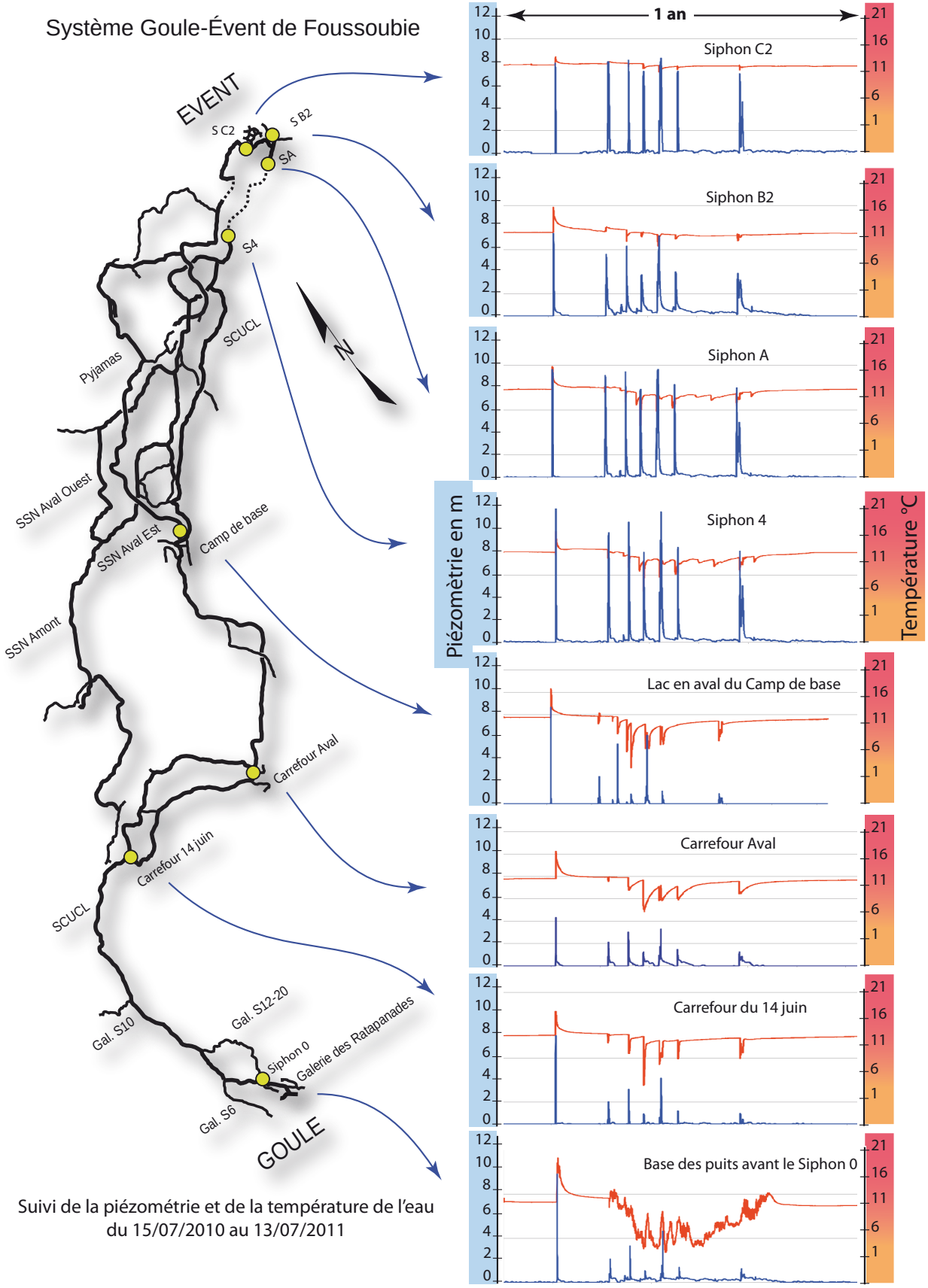

Figure 13 - Localisation des sondes d'enregistrement des hauteurs d'eau dans le système de Foussoubie. Présentation pour chaque sonde de la chronique hauteur (en bleu), température (en rouge). Fond topographique d'après synthèse Le Roux (1984).

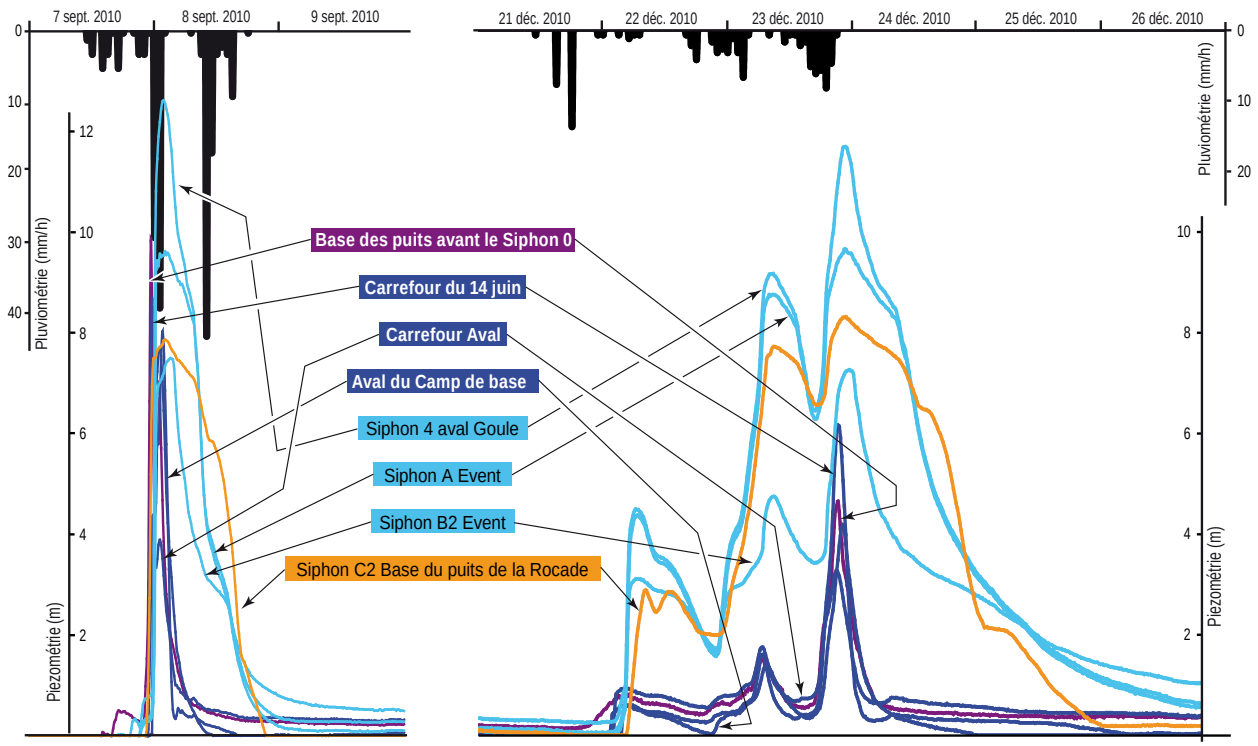

Figure 14 - Les deux crues de septembre 2010 et de décembre 2010. La première (à gauche) est un épisode cévenol caractéristique, la seconde (à droite) est un épisode hivernal. Noter, pour les deux événements, les vitesses de montée des eaux et le synchronisme des différents pics de crue. Systématiquement, la partie épinoyée (zones 1, 2, 3, en violet et bleu foncé) est caractérisée par un transit rapide tandis que la zone aval (zone 4, en bleu ciel et orange) est caractérisée par des mises en charge élevées et une décroissance des hauteurs traduisant un stockage et un étalement des flux. Cela est net pour C2 dont la vidange semble contrôlée par des seuils de déversements.

phasées en relation avec les variations et le cumul des précipitations. On note de même les arrêts de précipitations durant cet épisode pluvieux qui ont entraîné des baisses de débits et de mises en charge aux différents points suivis. Les allures des courbes de hauteur d'eau durant ces différentes phases montrent le rôle de la géométrie du réseau et de la morphologie des conduits dans les dynamiques hydrologiques et notamment la présence de seuils de déversement aux carrefours en amont et dans les siphons de l'Évent.

La courbe de tarissement montre, dans ces conditions, un léger stockage dans la zone aval du réseau à partir des lacs à l'aval du Camp de base. Il s'agit toutefois d'un phénomène limité dans le temps et pour des volumes sans doute limités et non évalués ici. La dynamique de crue relevée au Siphon C2 montre un fonctionnement différent du drain principal. Il se produit un décalage dans les phases de crue et l'on observe deux paliers lors de la décrue. Le tarissement est très rapide.

3 - Analyse de la dynamique hydrologique à l'échelle du réseau

L'analyse croisée des données hydrologiques et des conditions géométriques et morphologiques des conduits permet d'identifier la richesse du déroulement polyphasé d'un épisode de crue et sa progression dans le réseau d'amont en aval. Cette dynamique est contrainte par le dimensionnement des conduits, la géométrie et la morphologie des galeries. Durant la phase de montée des débits, des mises en charge se font aux différents points qui constituent des freins à l'écoulement. Nous proposons de conduire cette analyse à partir de la crue de septembre 2010, à la fois la plus importante de la chronique et la seule, qui en fin de période d'étiage, n'est pas sous l'influence des réserves hydrologiques. On note ainsi (Tableau 1) comment les aspects de dimensionnement des conduits et des pentes vont influer sur les mises en charge. La lecture de l'événement est divisée ici en trois phases : montée de crue, pic de crue et décrue. La Figure 15 propose une lecture spatialisée de cet événement le long d'un profil en long général du système de Foussoubie avec une référence temporelle au droit du Siphon A (aval du système).

Montée de la crue : avec les fortes pentes de la zone d'entrée la dynamique hydraulique est importante. Un premier frein à l'écoulement est rencontré au niveau du Siphon 0 après la base des puits. La mise en charge y est importante et rapide. Cette zone de la base des puits sert alors de zone de stockage temporaire. Les changements de morphologie des galeries qui mènent au Carrefour du 14 juin amènent à un changement de la dynamique

Cinq tronçons séparant deux points de mesures	Distance (m)	Dénivelée (m)	Pente (%)	Hauteur de mise en charge (m)	Vitesse de mise en charge (cm/mn)
Entrée Goule à la base des puits avant le Siphon 0	205	58	28,2	9,47	12
Base des puits avant le Siphon 0 → Carrefour du 14 juin	1246	13	1,0	7,62	6
Carrefour du 14 juin → Carrefour Aval	814	3	0,3	4,32	14
Carrefour Aval → Aval du Camp de base	1221	11	0,9	8,03	0,5
Aval du Camp de base → Siphon 4	1394	33	2,4	12,62	48,4

Tableau 1 - Caractérisation des différents tronçons étudiés. Pour chacun d'entre eux, les caractéristiques géométriques, les hauteurs de mise en charge à l'aval et les vitesses sont proposées.

hydraulique. La pente plus faible et les bassins présents dans cette portion de la cavité constituent des facteurs de dispersion de l'énergie hydraulique. La mise en charge au Carrefour du 14 juin est plus faible de même que la vitesse de montée. Le Carrefour Aval constitue une zone d'accélération de la circulation des eaux et de diminution de la hauteur de charge. La géométrie des conduits joue un rôle important dans cette dynamique par l'intermédiaire des galeries parallèles du SCUCL et du SCIS. Une fois le seuil de saturation atteint, du fait du profil quasi-horizontal, la montée en charge s'installe avec une vitesse de montée importante. Ensuite, dans la partie comprise entre le Carrefour Aval et le secteur du Camp de base, un ralentissement de la dynamique va s'opérer en amont du point de mesure.

Maximum de la crue : une fois ces galeries arrivées à saturation de leur capacité ou de débits, la mise en charge au Siphon 4 se produit de manière intense et rapide. Des vitesses de montée de 48 cm/mn y sont alors enregistrées. À partir de ce moment, l'ensemble du réseau se trouve à saturation d'écoulement et il s'installe un « profil hydraulique » des mises en charge, depuis la base des puits à la Goule jusqu'au Siphon 4 (Figure 15). Dans cette situation, la régulation hydraulique du système est complètement liée à la capacité de drainage de la zone aval à l'Évent et en particulier à celle des différents siphons et du gros éboulis du porche d'entrée. Ainsi, lors du maximum de cette crue, l'éboulis a fonctionné en déversoir durant une quarantaine de minutes.

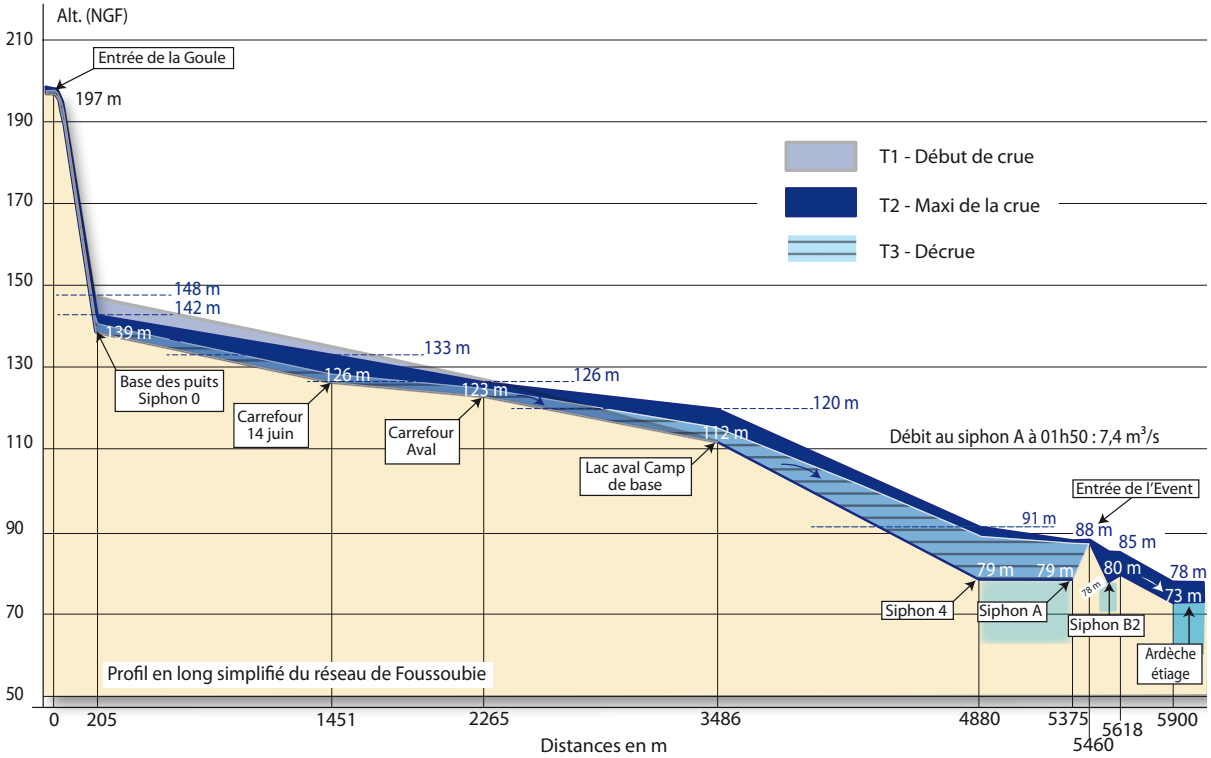

Figure 15 - Profil longitudinal du réseau lors de l'onde de crue du 8 septembre 2010. Les trois temps de la crue (début de crue, pointe de crue et ressuyage - référence du temps au droit du Siphon A) sont spatialisés et montrent à la fois la géométrie de la ligne d'eau et les zones de stockages temporaires de la zone épinoyée (cotes altitudinales d'après topographie Le Roux, 1984).

Décrue : après l'arrêt des précipitations, la dynamique d'écoulement va se ralentir assez rapidement de l'amont vers l'aval. Différents niveaux de seuils, dans la partie aval notamment, conditionnent les modalités de baisse de débits. La vidange du système est constituée de la vidange des galeries et siphons de la partie aval. Du fait de l'absence de capacité de stockage du système, les débits retrouvent alors très rapidement des valeurs plus faibles, non évaluées ici.

L'intérêt d'une telle approche (Figure 15) est double : (i) elle permet de visualiser sur un unique profil longitudinal la géométrie de la ligne d'eau à différentes phases de l'épisode de crue. La pente de cette ligne évolue d'amont en aval et au cours de l'épisode. De même (ii), on note les secteurs clés de frein hydraulique qui génèrent en amont des zones temporaires de stockage. C'est notamment le cas en aval du système où le Siphon A (et le seuil de la zone d'entrée) constitue un frein hydraulique dont les effets sont perceptibles sur des centaines de mètres en amont. De même, le Carrefour Aval constitue un secteur clé, un point haut qui conditionne la dynamique des mises en charge sur la zone située immédiatement en amont.

4 - Transit et débit à l'échelle des drains

L'analyse des mises en charge site par site permet parfois de caractériser assez finement la dynamique des écoulements dans tel ou tel secteur et de proposer des vitesses et des débits, ce que l'absence de courbe de tarage ne nous autorise pas pour l'instant. Ceci a pu être tenté pour la zone épinoyée et pour la zone noyée, lors de l'épisode de septembre 2010.

Dans la zone épinoyée entre le Carrefour du 14 juin et le Carrefour Aval : les données obtenues à partir des sondes permettent de renseigner la dynamique hydraulique au début de cet épisode de crue.

À 22 h 50, la montée de l'eau commence au Carrefour du 14 juin. Le Carrefour Aval est à ce moment là complètement sec. Quinze minutes après, à 23 h 05, une vague de 1,24 m arrive au Carrefour Aval. La distance entre les deux carrefours est de 813,5 m. La vitesse de propagation de l'eau dans cette partie de la cavité est donc en moyenne de 0,9 m/s. La largeur de la galerie au Carrefour Aval est de 5 m, la section de la lame d'eau est donc de 6,2 m^2. Or, le débit est le produit d'une vitesse, d'une section et d'un coefficient de rugosité. En choisissant ici un coefficient de rugosité de 0,2 en usage pour les rivières encombrées, on obtient un débit en début de crue de 1,1 m^3/s. Ce calcul reste cependant entaché d'une certaine incertitude liée au pas de mesure défini au préalable.

Dans la zone noyée entre l'amont et l'aval du siphon : grâce à l'installation de sondes de pression au niveau du siphon aval (Siphon 4 coté Goule et Siphon A coté Évent), il a été possible de calculer le débit par la méthode des pertes de charge entre ces deux points qui encadrent le verrou liquide. La perte de charge maximale relevée entre les deux extrêmes du siphon est de 3,05 m. La longueur du siphon est de 340 m. La section minimale dans le siphon est de 3 m^2. Pour établir le nombre de Reynolds, la vitesse est estimée à 1,5 m/s. Il s'agit d'une circulation en régime turbulent. Le calcul du nombre de Reynolds donne 2.10^6. La perte de charge Δh s'exprime (avec λ le coefficient de perte de charge) :

$$\Delta h = \frac{\lambda}{D \times \frac{V^2}{2g}} \times L \text{ siphon}$$

En prenant un coefficient de rugosité dans le siphon de 0,1, on obtient à partir de l'abaque de Moody, la valeur λ = 0,085. La vitesse obtenue est de 2,45 m/s et le débit Q = 2,45 m/s x 3 m^2 = 7,3 m^3/s. À partir de cette méthodologie, il a été possible d'établir la courbe d'évolution des débits instantanés dans le Siphon Aval en fonction des hauteurs de mises en charge au Siphon 4. Durant cet épisode de crue, le débit moyen a été de 1,6 m^3/s (Figure 16). On remarque deux paliers dans la courbe de montée de la crue, entrecoupés de phases rapides d'augmentation du débit. Ces observations sont sans doute à mettre en relation avec les phases de déversement dans les galeries annexes.

Lors de la décrue, et dans la courbe de tarissement, on remarque également différentes phases d'évolution des débits. Des seuils de déversement marquent nettement le fonctionnement hydrologique de cette partie du réseau. Un travail complémentaire sera à entreprendre pour comprendre ces phénomènes et préciser les modalités d'écoulement en direction de l'émergence.

5 - Une variabilité des températures d'amont en aval du système

L'analyse des variations de températures (Figure 13) complète la compréhension du fonctionnement hydrologique du système de Foussoubie. Pour cela, l'ensemble des températures du cycle hydrologique est traité. Pour chaque site, d'amont en aval, on indique (Figure 17) la médiane, le premier, et le troisième quartile et enfin le minima et le maxima de la série (35 000 valeurs par série). D'amont en aval, on observe que la dispersion des valeurs va en décroissant. Les températures les plus hautes, comme les plus basses, se rapprochent de la médiane à mesure que l'on s'enfonce dans le système karstique. Des observations tirées de ces données, il est possible de dégager trois ensembles principaux et un autre, annexe au système de drainage.

La zone d'introduction : dans la zone des puits, l'amplitude des températures relevées est importante (min. 1,6 °C ; max. 19,6 °C), ceci est associé aux conditions météorologiques (froides au chaudes) au cours desquelles surviennent les épisodes de crue. L'écart interquartile montre une valeur élevée du fait

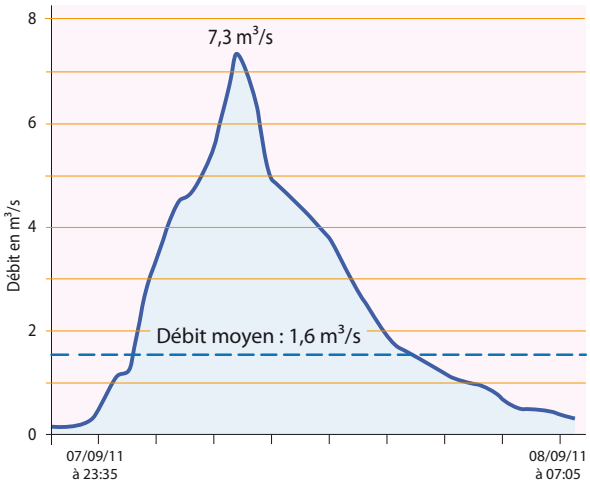

Figure 16 - Reconstitution, par calcul hydraulique, des débits au siphon aval du système (Siphon 4, coté Goule et Siphon A, coté Évent) lors de la crue de septembre 2010.

des circulations d'eaux rapides peu influencées par l'isothermie karstique.

La zone d'écoulement : les points de mesures au Carrefour du 14 juin, Carrefour Aval et lac en aval du Camp de base constituent un ensemble aux caractéristiques de température homogènes. Les écarts des températures minimales et maximales, importants, montrent que l'influence des apports extérieurs s'exprime encore nettement. Les valeurs des médianes sont en légère élévation, associées à l'influence de la masse karstique qui se fait sentir de manière progressive au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'aval. Les écarts interquartiles sont relativement réduits dans cette zone. Notons que le minimum du Carrefour Aval (6°C) est supérieur aux valeurs minimales en amont et en aval. Sans doute est-ce lié à la position localement latérale au flux de la sonde dans ce site particulier.

La zone saturée : bien que située en zone distale du système, on remarque également, au niveau des siphons, des écarts importants des températures minimales (5,5°C) et maximales (16,7°C). Cela confirme la forte transmissivité du système. Les écarts interquartiles sont plus importants que dans la zone précédente du fait des échanges thermiques conditionnés par les apports très rapides de la zone amont et les dimensions du siphon entre la Goule et l'Évent. Le fonctionnement du Siphon B2 est un peu différent du fait de sa position dans le système et de sa taille. Il se trouve dans la zone complexe de l'éboulis avec des modalités d'écoulement contraintes par les dimensions des conduits et leur structuration jusqu'à l'exutoire.

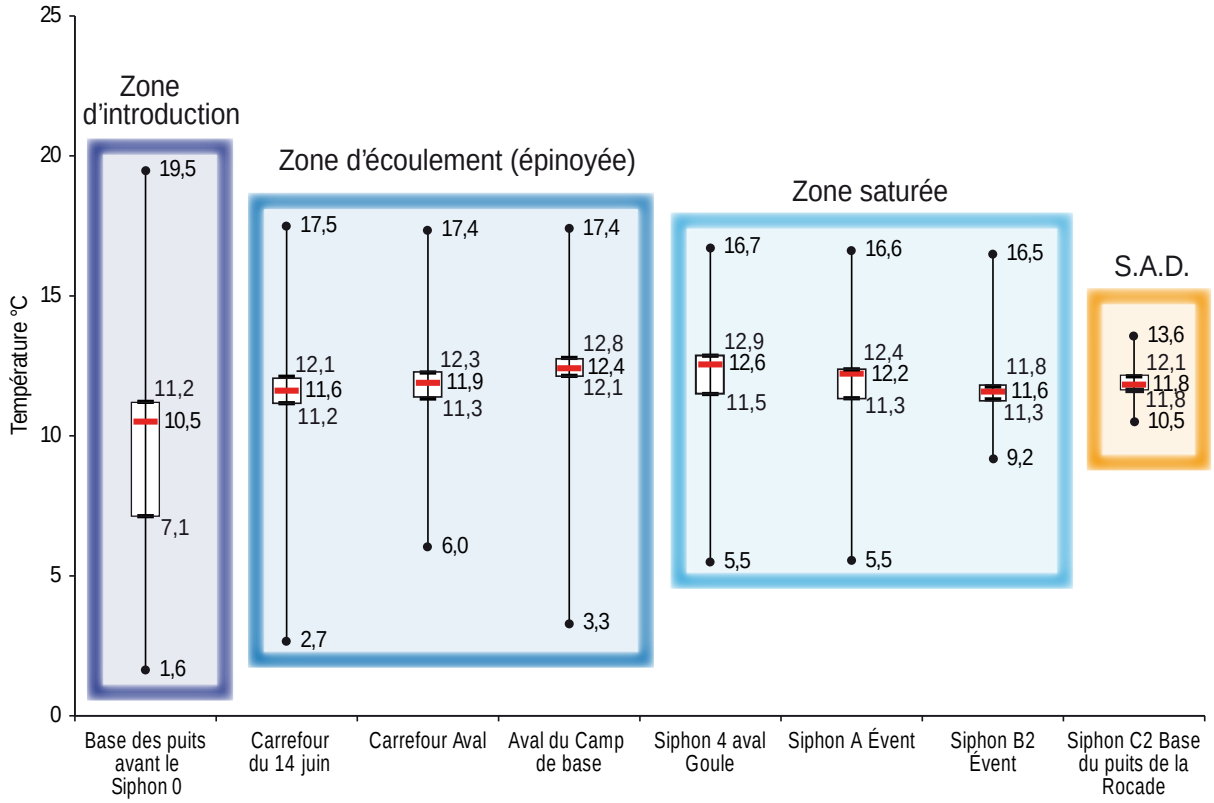

Figure 17 - Boîte à moustaches des températures des huit sites étudiés au cours de l'année hydrologique 2010-2011. On y figure la médiane, le premier et troisième quartile et les deux valeurs extrêmes de chacune des huit séries. Noter la dispersion des températures dans l'amont du système et, au contraire leur concentration dans l'aval. Noter de même l'évolution de la médiane dans l'espace du système. Trois zones sont identifiées auxquelles s'ajoute le Siphon C2 qui semble déconnecté du système et fonctionne, probablement, en système annexe au drainage (S.A.D.).

La zone annexe : le Siphon C2 qui est l'exutoire des galeries MASC, Pyjamas, SCP et GASM constitue un système de drains interconnectés au drainage principal. Les écarts de température sont réduits attestant d'un fonctionnement de type plus capacitif où l'écoulement est plus pondéré. Sans doute s'agit-il ici d'un système mal connecté aux flux qui transitent durant les crues.

La température est une grandeur simple à mesurer qui se situe à l'interface entre les flux hydrologiques entrant dans le système (froid ou chaud selon les saisons) et la masse karstique qui connaît sa propre inertie, cherchant à ramener les eaux vers une valeur moyenne à mesure que l'on progresse vers l'aval. La dispersion des valeurs au sein de chaque série évolue de même dans l'espace du système karstique. La zone de transit épinoyée présente une élévation des températures, couplée à une réduction de l'écart interquartile. Ceci est sans doute à relier à la rapidité du transit des eaux en crues. En effet, la zone saturée, à l'aval, est plus pondérée dans les extrêmes, mais présente une dispersion plus importante entre le premier et le troisième quartile. Une analyse croisée avec les temps de séjours des eaux ou bien limitée aux seuls épisodes de crues permettrait de résoudre ce paradoxe apparent.

III - D'autres pistes de recherche pour étudier les crues du système karstique

L'analyse hydrologique, proposée ici sur un cycle d'un an, apporte certes des informations précieuses sur la compréhension du fonctionnement du système mais ne saurait constituer l'entrée méthodologique unique. Étudier les crues d'un système karstique ne se réduit pas à l'analyse des hydrogrammes, mais se doit d'être complété par d'autres approches. Nous en proposons ici trois complémentaires : celle de la morphologie et de la sédimentologie pour laquelle nous proposons quelques résultats et celles de la dendrochronologie et de la biospéologie pour lesquelles seules des perspectives d'études seront proposées.

1 - Analyse morphométrique : l'impact des crues

À l'échelle des drains, il est possible de mesurer l'impact des crues dans les morphologies pariétales (Jaillet, 1999). Ces morphologies de paroi renseignent souvent avec efficacité sur la dynamique des flux qui ont prévalu à leur mise en place (Curl, 1974 ; Slabe, 1995) et sont de mieux en mieux corrélées aux débits (Cailhol, 2011). Dans le système de Foussoubie, le comptage de panneau de coups de gouges à la base des puits a permis de proposer des gammes de débits étagés selon la taille des microformes. Dans une section calibrée, en amont du Siphon 0, le débit maximal a pu ainsi être évalué à 5 m^3/s. Il est conforté par d'autres observations réalisées en amont qui montrent que le Passage de Joly doit constituer un frein local et donc un verrou qui limite le flux maximal entrant dans le système (Jaillet et *al.*, 2000). De même, la cartographie détaillée des impacts morphologiques pariétaux sur les concrétions permet-elle de reconstituer la ligne d'eau en crue dans différentes zones du système. Ce travail, amorcé pour le Carrefour du 14 juin (collectif Foussoubie, 2010), sera étendu à tous les carrefours et sites-clés afin de proposer une analyse croisant enregistrement hydrométrique et enregistrement morphométrique.

Mais il est des cas où cet impact morphologique affecte des édifices concrétionnés. En ce cas, par le recours à la datation, il est possible de caler les évènements et de proposer une lecture des crues sur une épaisseur de temps plus importante. Cela permet de proposer un enregistrement des crues et des mises en charge intercalées dans la croissance des stalagmites comme cela a été reconnu à Choranche dans le Vercors (Perrette, 2000), au Rupt-du-Puits dans le Barrois (Jaillet et *al.*, 2006) ou à Orgnac dans le Bas Vivarais (Couchoud et *al.*, 2012).

2 - Un enregistrement des crues dans les coulées stalagmitiques

L'impact des crues sur le concrétionnement est majeur dans le réseau de Foussoubie. Dans la partie aval du système, d'importantes coulées sont recoupées à l'emporte-pièce, traduisant un changement important dans la dynamique de l'écoulement et un basculement vers une érosion fluviatile importante (Figure 11). Le choix s'est ici porté sur deux coulées stalagmitiques importantes : l'une latérale au flux, c'est-à-dire alimentée par un affluent du drain principal, mais sous l'effet des crues de ce drain, et l'autre dans le flux principal, à la base des puits.

La coulée basculée de la galerie SCUCL est un édifice stalagmitique important, de l'ordre de 2 m d'épaisseur, aujourd'hui effondré (Figure 18). Il a poussé au débouché d'un affluent impénétrable, dans la galerie principale, 400 m en aval du Siphon 0. Aujourd'hui effondré et sous l'emprise des crues, il subit les effets de l'érosion. Au regard de la compréhension des crues du système, l'intérêt de l'édifice est double :

– il scelle une série de nappes fluviatiles séparées chacune par la calcite de l'édifice. Cinq nappes ont été identifiées (Figure 18) :

A : nappe de galets noirâtres cimentés (extension 2-3 cm) ;
B : galets hétérogènes cimentés, extension 4-5 cm à matrice sableuse ;
C : galets hétérogènes cimentés, extension 1-2 cm à matrice sableuse ;
D : nappe de galets triés cimentés, extension 6-8 cm ;
E : nappe de galets triés cimentés, extension > 10 cm ;
F : nappe de fond de galerie, plus ou moins mobile, non cimentée, extension > 20 cm. L'évolution temporelle de ces nappes montre que les galets présentent une extension de plus en plus importante au cours du temps.

– la chute de l'édifice est scellée par des repousses stalagmitiques elles-mêmes en cours d'érosion (Fou6 et Fou7). Les datations U-Th, réalisées à l'Université de Melbourne, donnent un âge non corrigé de 215,5 ka (+/- 3,) pour Fou4, 12,8 ka (+/- 0,1) pour Fou6 et 8,4 ka (+/- 0,1) pour Fou7. Les incertitudes sont données à 2 sigma. Notons que pour Fous6, le rapport $^{230}Th/^{232}Th$ pénalise l'âge corrigé et implique une forte incertitude.

De ces différents éléments, il est possible de proposer la reconstitution suivante : avant 215 ka et sur une durée qu'il est difficile d'estimer sans la datation de Fou1, le système connaît un fonctionnement de type épinoyé avec transit sédimentaire discontinu et plutôt aggradant. La coulée latérale, alimentée par un affluent, scelle les nappes de galets. Celles-ci sont constituées d'éléments dont la taille va en s'agrandissant, traduisant probablement une compétence plus élevée des écoulements jusqu'à la fin de la croissance de l'édifice à 215 ka. Après cette date, et probablement associé à un abaissement du niveau du remplissage (dynamique d'érosion), la coulée s'effondre. Des repousses holocènes (Fou7 : 8,4 ka) sont identifiées. Leur croissance n'est possible qu'avec des écoulements modérés. Aujourd'hui ces repousses sont en cours d'érosion et il ne subsiste plus que leur base (Figure 18).

La coulée de la base des puits est un édifice stalagmitique tout aussi imposant et qui apporte un éclairage complémentaire. Localisé dans le flux principal, 200 m en aval de la Goule, il est balayé régulièrement par les crues qui pénètrent le système. La calcite y est plus brune et les éléments détritiques plus abondants. Ceci tient à l'alimentation de la coulée directement par la perte et non par un affluent comme c'était le cas précédemment. Là encore, l'édifice n'est plus actif et il subit les effets drastiques de l'érosion (Figure 19). Un relevé (Figure 20) a permis d'identifier des phases de croissance séparées par des phases d'ablation. Trois surfaces d'érosion, auxquelles s'ajoute la surface actuelle, tronquent l'édifice stalagmitique et recoupent clairement les lamines de la coulée. Deux échantillons encadrant la série ont été analysés et datés au LSCE à

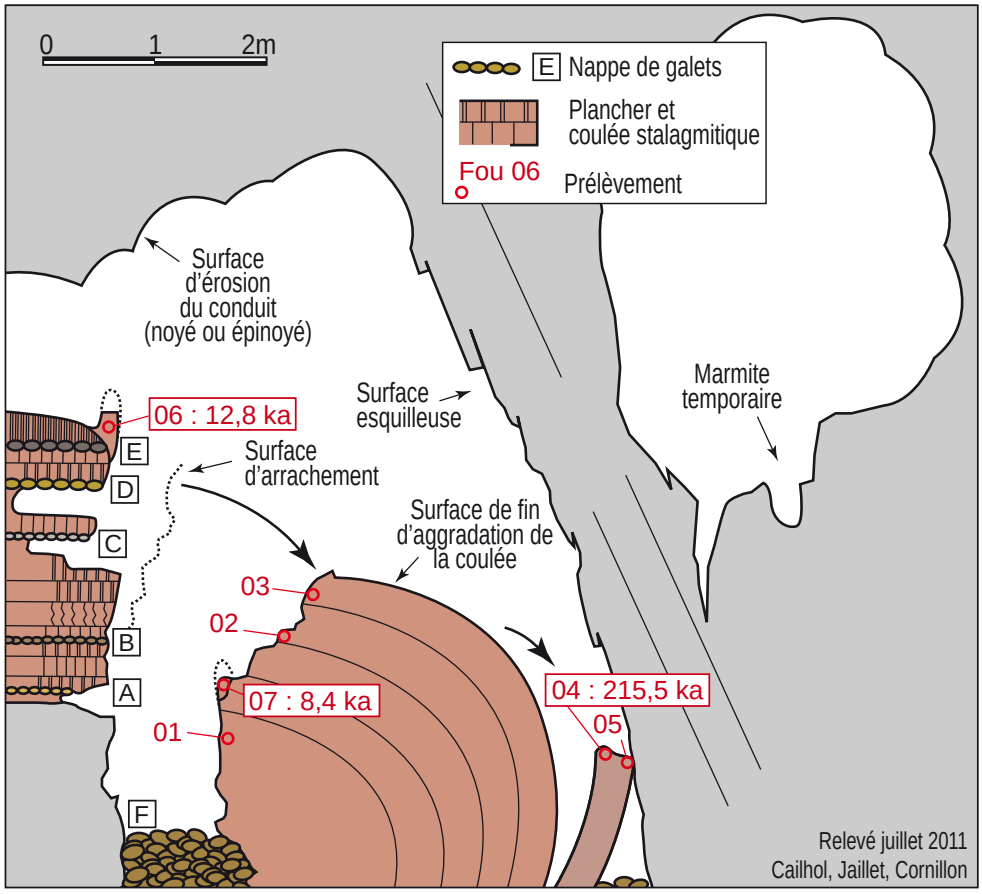

Figure 18 - Coupe de la coulée stalagmitique basculée dans la galerie SCUCL (ici se dédoublant localement en deux conduits) et position des échantillons prélevés et datés. Noter les alternances de nappes de galets et de coulées stalagmitiques sur le coté de la galerie. Les dates sont données non corrigées.

Figure 19 - La coulée stalagmitique de la base des puits, peu en amont du Siphon 0, est un édifice concrétionné qui a subi des phases de croissance séparées par d'intenses périodes d'érosion. Photo S. Jaillet.

Gif-sur-Yvette. Fou11 présente un âge non corrigé de 122,7 ka (+/- 3) et Fou17 un âge de 47,0 ka (+/-0,6).

Il apparaît possible de proposer la reconstitution suivante : à 122 ka, c'est-à-dire durant le stade isotopique 5e, le conduit est déjà creusé et connaît une phase de comblement par la calcite. Ceci implique des conditions climatiques favorables (c'est le cas), mais aussi des conditions d'écoulements peu contrastées. À la suite de cette première phase de croissance, durant 70 000 ans et à trois reprises au moins, le drain de Foussoubie va tantôt être le siège d'une croissance stalagmitique, tantôt être marqué par une dynamique d'incision et de surcreusement de la calcite. Depuis environ 40 ka, les conditions n'ont pas été réunies pour voir à nouveau la calcite se déposer, bien que depuis 13 ka les conditions climatiques le permettent en Ardèche (Genty, 2012).

Il ne semble donc pas possible d'interpréter ces alternances qu'à la seule lumière des variations climatiques et c'est sans doute dans les variations des conditions d'alimentation du système (cf. *supra* l'évolution du site de la Goule) qu'il faut rechercher l'explication de cette évolution contrastée. L'enregistrement calcitique présenté ici tient bien à l'évolution des conditions du milieu et les grandes phases d'érosion (dont la dernière est toujours active) doivent trouver explication autant dans l'évolution géomorphologique du karst que dans l'évolution des conditions environnementales.

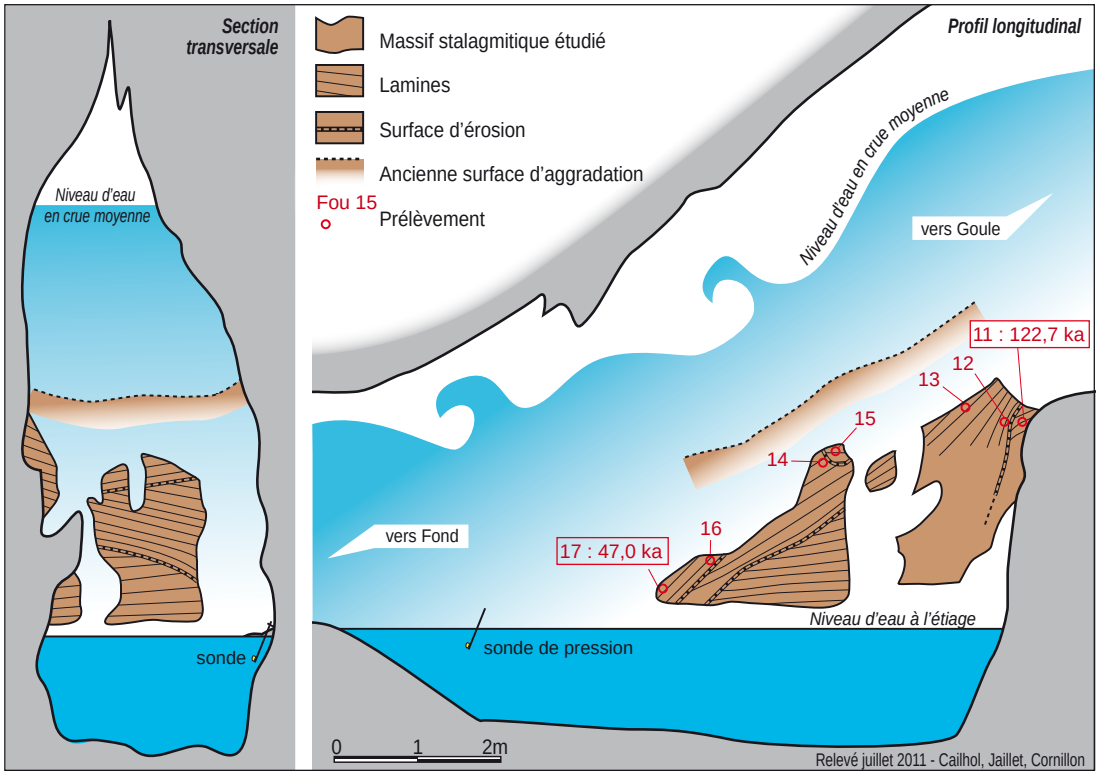

Figure 20 - Coupes transversale et longitudinale de la coulée stalagmitique de la base des puits dans son contexte actuel avec variations des niveaux d'eau. La position des échantillons prélevés est indiquée. Noter les surfaces d'érosion qui séparent les phases de croissance. Les dates sont données non corrigées.

Laboratoire	Date mesure	Echantillon	Méthode	Code labo	238U (µg/g)		232Th (ng/g)		$d^{234}U_m$		($^{230}Th/^{232}Th$)		($^{230}Th/^{238U}$)		age (kyr)		$d^{234}U_{(t)}$		age cor(kyr)**	
Melbourne	août-2011	Fou4	MC-ICPMS								158,5		0,86710384	0,0038868	**215,5**	**±3,1**			**215,5**	**±3,6**
Melbourne	août-2011	Fou6	MC-ICPMS								0,9		0,08365681	0,0008577	**12,8**	**±0,1**			**-11,6**	**±26,1**
Melbourne	août-2011	Fou7	MC-ICPMS								9,4		0,06515398	0,0008171	**8,4**	**±0,1**			**7,1**	**±1,3**
Gif/Yvette	mai-2012	Fou11	MC-ICPMS	Gif-2919	0,156	±0,00010	63,6	±0,42	122,9	±3,3	5,4	±0,1	0,7777	0,0079	**122,7**	**±3,0**	173,9	±4,9	**106,5**	**±11,2**
Gif/Yvette	mai-2012	Fou17	MC-ICPMS	Gif-2920	0,484	±0,00040	86,9	±0,74	175,2	±2,2	6,6	±0,1	0,4182	0,0037	**47,0**	**±0,6**	200,1	±2,5	**39,2**	**±4,6**

*Tableau 2 - Rapports isotopiques et âges U-Th des prélèvements effectués sur les deux coulées étudiées (Analyse Gif/Yvette et Université de Melbourne). ** Les âges ont été corrigés en utilisant un rapport 230/232 = 1,5 +/- 50%. Les incertitudes sont données à 2 sigma.*

3 - Des pistes de recherches en dendrochronologie et biospéologie

On note dans la Goule de Foussoubie plusieurs troncs d'arbre de dimensions importantes, et ceci jusqu'à près de 4 km de l'entrée. Il semble intéressant d'en dresser un inventaire et de chercher à évaluer la date de mort (qui donne une date minimum à la pénétration) de ces troncs dans le système karstique pour évaluer les vitesses de transit de ces objets sur un parcours souterrain plurikilométrique. Une dizaine d'échantillons a déjà été prélevée (Figure 21), généralement des rondelles ou des carottages quand les conditions ne permettaient pas de sectionner le fût. L'objectif est ici d'étudier le rôle des grandes crues dans la mobilité de macro-objets au sein du système. Il s'agira de répondre notamment aux questions suivantes : les modalités de remobilisation de la charge détritique et des troncs d'arbres sont-elles liées à quelques grandes crues ou à une série de crues régulières ? Existe-t-il une corrélation entre la date de pénétration des arbres dans le système et leur situation géographique dans le système, autrement dit, les plus vieux troncs sont-ils les plus éloignés de la perte ? Les premières identifications montrent une diversité d'essences dont certaines ne semblent plus présentes dans le bassin-versant. Ceci serait à relier à des changements d'occupation du milieu, changements dont il serait possible de retrouver les effets dans la dynamique des écoulements. La constitution de courbes de références par essence devrait s'avérer lourde à mettre en œuvre mais l'originalité de la démarche laisse espérer un résultat assez inédit.

La biologie souterraine a déjà été associée à la compréhension du fonctionnement des systèmes karstiques. Les travaux menés autour du laboratoire de Moulis ont fait école en ce domaine. Dans le cas de la Goule de Foussoubie, des observations préliminaires ont été réalisées et ont permis de dresser un premier inventaire faunique durant l'été 2011 (Duguet et Peyronel, 2011). On identifie une faune trogloxène apportée par les crues du ruisseau la Planche. Les données brutes montrent une diversité importante des macroinvertébrés aquatiques, sachant qu'au mois d'août la majorité des larves ont normalement déjà émergé dans les cours d'eau aériens. La majorité des amphibiens identifiés sont des crapauds communs (*Bufo bufo*), mis à part deux têtards d'Alyte accoucheur (*Alytes obstetricans*)

Figure 21 - Prélèvement à la scie d'une rondelle d'un tronc d'arbre coincé dans une anfractuosité de la galerie SCUCL, ici peu en amont du Camp de base, à près de 3500 m de l'entrée. Photo S. Jaillet.

et un juvénile de Grenouille rieuse (*Pelophylax ridibundus*) trouvés dans les premières vasques près de l'entrée. Ceci suggère une situation écologique assez inédite. En effet, des amphibiens – en grande majorité des crapauds communs – sont emportés dans le réseau karstique lors d'épisodes de crue, jusqu'à plusieurs kilomètres de l'entrée ; ils se retrouvent « piégés », car la présence de puits empêche leur retour en surface. Par la suite, le suivi batrachologique est susceptible de s'orienter vers l'étude de l'effet des inondations de la Goule de Foussoubie sur la dispersion des animaux, la structure d'âge du peuplement d'amphibiens ou de leur régime alimentaire. Un croisement avec les résultats de l'analyse hydrologique brute pourrait s'avérer fécond.

Conclusion

« *(…) à 500 ou 600 m en amont du Pont-d'Arc, s'offre sur la rive droite, en face d'un paysage splendide, l'embouchure de la mystérieuse Goule de Foussoubie, énigme hydrologique que nous n'avons pu résoudre (…)* » écrivait Martel en 1894. Près de 120 ans après, ces observations préliminaires tant dans le domaine de la géomorphologie endokarstique que dans le domaine de l'hydrologie souterraine apportent un éclairage nouveau sur la connaissance du système de Foussoubie sans pour autant prétendre résoudre cette fameuse « énigme hydrologique ».

En effet, bien des questions demeurent. Certes, avec ces premières observations géomorphologiques et hydrologiques, on dispose à présent des bases fonctionnelles et structurelles pour la connaissance du système de Foussoubie. Les calages chronologiques apportés par les datations de différentes zones concrétionnées constituent une piste intéressante mais montrent aussi la nécessité de préciser plus encore les choses pour mieux contraindre les différents stades de son évolution. Dans le domaine de l'hydrologie, il reste encore à distinguer les parts de l'infiltration et du ruissellement, parts pouvant évoluer selon l'état hydrologique du système. Quel est le rôle joué par le ruisseau aérien du Rieussec dans la dynamique des écoulements endo- et exokarstiques ? Dans la partie aval, les modalités d'écoulement dans la zone d'émergence restent à préciser, notamment le rôle du Siphon C2. De même, la caractérisation des différents seuils entre les deux branches siphonnantes et les relations avec la source de Vanmalle (Figure 3) restent à contraindre pour permettre de cerner les modalités du raccordement à l'Ardèche. Dans le domaine de la paléogéographie, le raccordement des drains aux évolutions connues du réseau hydrographique reste à définir finement. De même, sur une échelle de temps plus réduite (échelle historique), l'évolution du bassin et de son occupation (drainage, défrichement…) reste à évaluer pour mieux comprendre l'influence de ces évolutions sur la dynamique endokarstique

Cette étude démarrée sur le réseau de Foussoubie est un projet collectif riche de multiples synergies. Il repose sur une approche pluridisciplinaire du système. En effet, cet objet souterrain permet, par ses dimensions et par sa géométrie, l'observation de son fonctionnement en situation de crue et ceci dans sa totalité. L'approche croisant géomorphologie, hydrologie, biologie souterraine, et bientôt de manière plus originale la dendrochronologie, offre un regard spatialisé et assez complet des différentes phases du fonctionnement du système sur différents pas de temps. Sans doute demain le développement de ces travaux vers la modélisation nous permettra de pousser plus loin encore la compréhension du système de Foussoubie et de confirmer le caractère emblématique de ce karst qui déjà nous semble avoir valeur d'exemple.

Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement le Comité départemental de spéléologie de l'Ardèche qui met à disposition chaque année le matériel pour l'équipement de la Goule de Foussoubie durant toutes les campagnes. Le site d'Orgnac a toujours bien voulu mettre à disposition une à deux salles de travail durant ces campagnes. Elles ont toujours constitué notre « point de ralliement » et ce fut très précieux. Françoise Prud'homme nous a mis chaque année son terrain à disposition pour le traditionnel « barbecue d'ouverture de campagne ». Enfin Molière a ravi nos soirées estivales. Comment ne pas finir sans lui laisser la parole : « Ce doit être beau, on n'y comprend rien ».

Liste des membres du collectif Foussoubie (2009 – 2011)

Judicaël ARNAUD, Laurent ASTRADE, Christian BAYLE, Magali BAYLE, Élisa BOCHE, Didier CAILHOL, Xavier CAILHOL, Florence COLINET, Thomas CORNILLON, Gilles ÉTIENNE, René ESCAT, Christophe GAUCHON, Juliette GAUCHON, Loys GAUCHON, Patrick HARLEZ, Stéphane JAILLET, Jérôme JOURET, Patrick LE ROUX, Thierry MARCHAND, Philippe MONTEIL, Amandine PERRET, Gilbert PLATIER, Guillaume POLIOL, Françoise PRUD'HOMME, Benjamin SADIER, Matthieu THOMAS, Benjamin THOMINE, Étienne VENNETIER.

Bibliographie

Audra P., 2010. La spéléogenèse épigène. Grottes et karsts de France. *Karstologia mémoires*, 19, 44-45.

Audra P., Palmer A., 2011. The pattern of caves: controls of epigenic speleogenesis. *Géomorphologie, Relief, Processus, Environnement*, 4, 359-378.

Audra P., Nobécourt J.-C., 2012. Flooding in epiphreatic passages. Analysis of the 4-5 Nov. 2011 flood in the Chamois Cave Alpes-de-Haute-Provence, France. Congrès suisse de Spéléologie sous presse.

Belleville L., 1985. Hydrologie karstique : géométrie, fonctionnement et karstogenèse des systèmes karstiques des gorges de l'Ardèche. Thèse doctorat, Institut Dolomieu, Grenoble, 228 p.

Bigot J.-Y., 2006. Les conduits de raccordement des émergences aux niveaux de base des vallées. Actes de la 16ème rencontre d'Octobre, Méaudre, Spéléo-Club de Paris, 41-48.

Cailhol D., 2011. Analyse croisée débits / vagues d'érosion du moulin de Voguë Ardèche). *Karstologia*, 57, 28-32.

Callot Y., 1979. A propos des plateaux calcaires ardéchois ; karst, rapport fond-surface et évolution des paysages calcaires, Thèse de Géographie, Université de Reims, 341 p.

Choppy J., 1992. Hydraulique externe et circulation karstique. Synthèses spéléologiques et karstiques, 43.2, les facteurs géographiques, 75 p.

Choppy J., 2008. Pourquoi se creusent les grottes ? *Karstologia mémoires*, 16, 200 p.

Collectif Foussoubie, 2009. Compte-rendu campagne juillet 2009, rapport interne, 23 p.

Collectif Foussoubie, 2010. Compte-rendu campagne juillet 2010, rapport interne, 35 p.

Collectif Foussoubie, 2011. Compte-rendu campagne juillet 2011, rapport interne, en cours.

Couchoud I., Genty D., Bourges F., Drysdale R., Jaillet S., 2012. Les spéléothèmes de l'Aven d'Orgnac : potentialités et études en cours. *In* Delannoy J.-J., Jaillet S., Sadier B. (dir.), Karsts - Paysages et Préhistoire. *Collection EDYTEM*, 13, 139-148.

Curl R.-L., 1974. Deducing flow velocity in cave conduits from scallops. *The NSS Bulletin*, 6, 2, 1-5.

Douville E., Sallé E., Frank N., Eisele M., Pons-Branchu E., Ayrault S., 2010. Rapid and accurate U–Th dating of ancient carbonates using inductively coupled plasma-quadrupole mass spectrometry. *Chemical Geology*, 272, 1-11.

Duguet R., Peyronel O., 2011. Des amphibiens dans la Goule de Foussoubie. *LPO 07*, 36, 8-12.

Genty D., 2012. Les spéléothèmes de la grotte Chauvet Pont-d'Arc : apports chronologiques et paléoclimatiques. Synthèse des travaux publiés. *In* Delannoy J.-J., Jaillet S., Sadier B. (dir.), Karsts - Paysages et Préhistoire. *Collection EDYTEM*, 13, 79-88.

Häuselmann P., 2011. Spéléogenèse dans la zone épinoyée, un nouveau modèle. Grottes et karsts de France. *Karstologia mémoires*, 19, 46-47.

Jaillet S., 1999. La crue sous terre. Mémoire Instructeur. *Cahier de l'EFS*, 10, 152 p. rééd. 2004.

Jaillet S. (dir.), 2000. Impact morphologique des crues dans la zone d'entrée de la Goule de Foussoubie Ardèche. Actes de la 10ème rencontre d'Octobre, Paris, Spéléo-Club de Paris, 130-136.

Jaillet S., 2001. Capture et réorganisations des écoulements souterrains dans le système karstique du Rupt-du-Puits (Lorraine-Champagne, France). Actes de la 11ème rencontre d'octobre, Lisle-en-Rigault, 123-145.

Jaillet S., Pons-Branchu E., Maire R., Hamelin B., Brulhet J., 2006. Enregistrement de paléo-mises en charge holocènes dans deux stalagmites du réseau du Rupt-du-Puits Barrois, France). Analyses morphologiques des lamines et datations U/Th en TIMS. *Geologica Belgica*, 9, 3-4 Han-sur-Lesse Symposium - nov. 2004), pp. 297-307. http://popups.ulg.ac.be/Geol/document.php?id=1304

Jaillet S., Sadier B., Arnaud J., Azéma M., Boche É., Cailhol D., Filipponi M., Le Roux P., Varrel E., 2011. Topographie, représentation et analyse morphologique 3D de drains, de conduits et de parois du karst. *In* Jaillet S., Ployon E., Villemin T. (dir), Images et Modèles 3D en Milieux Naturels. *Collection EDYTEM*, 12, 119-130.

Le Roux P., 1984. Système Goule/Event de Foussoubie. Historique résumé de son exploration, avril 1984. *SERAHV*, 18, Soc. d'Et. et de Rech. Arch. et Hist. de Vagnas, 12-20.

Le Roux P., 1989. Système Goule-Event de Foussoubie. *In* Spéléo sportive en Ardèche de Drouin P. et Marchand T., Ed. Edisud, Aix-en-Provence, 49-58.

Le Roux P., Drouin P., 2001. Bibliographie de Foussoubie. Système Goule-Event de Foussoubie. Event sup., aven Cordier, source de Vanmalle et autres cavités du secteur immédiat. *In* « Compte-rendu du stage Equipier scientifique Juillet 2000 », 25 p. + topo 1/2500°HT 781 réf. + 166 renvois).

Letrône M., 1963. L'accident de la Goule de Foussoubie (Ardèche). *Spelunca*, 3, 31-33.

Martel E.-A., 1894. Les sources riveraines du canon de l'Ardèche. *In* Les Abimes, les eaux souterraines, les cavernes, les sources, la spéléologie, chap IV., 94-108.

Mocochain L. Clauzon G. Bigot J.-Y., Brunet P., 2006. Geodynamic evolution of the peri-Mediterranean karst during the Messinian and the Pliocene: evidence from the Ardèche and Rhône Valley systems canyons, Southern France. *Sedimentary Geology*, 188-189, 219-233.

Mocochain L., Audra P., Clauzon G., Bellier O., Bigot J.-Y., Parize O., Monteil P., 2009. The effect of river dynamics induced by the Messinian Salinity Crisis on karst landscape and caves: Example of the Lower Ardèche river mid Rhône valley. *Geomorphology*, 106, 46-61.

Mottet G., 1993. Géographie physique de la France. PUF., 655 p.

Pascal M., Elmi S., Busnardo R., Lafarge D., Truc G., Valleron M.-M., Chedhomme J., Combier J., 1989 a. Carte géologique de la France 1/50.000, feuille Bourg-Saint-Andéol, 889. Orléans, BRGM.

Pascal M., Lafarge D., Chedhomme J., Glintzboeckel C., 1989 b. Notice explicative de la carte géologique de la France, feuille Bourg-Saint-Andéol, Orléans, BRGM, 67 p.

Perrette Y., 2000. Etude de la structure interne des stalagmites : contribution à la connaissance géographique des évolutions environnementales du Vercors (France). Développement et application d'une approche multiparamètre des archives stalagmitiques. Thèse de Doctorat, Université de Savoie, 325 p.

Rias P., 1991. 1963 – Foussoubie, *in* « Le gouffre Jean Bernard, -1602 m. Record du monde de profondeur ». Samoëns, Haute-Savoie. Ed. Gap, 20-24.

Slabe T., 1995. Cave Rocky Relief and its Speleogenetical Significance. ZRC 10, Ljubljana, 128 p.

Vervier P., 1988. Hydrologie et dynamique des peuplements aquatiques souterrains - Comparaison de deux systèmes karstiques des Gorges de l'Ardèche. Université Claude Bernard, Lyon I, 220 p.