



HAL
open science

Crues holocènes et stalagmites corrodées de l'évent de Foussoubie (Ardèche, France)

Stéphane Jaillet, Edwige Pons-Branchu, Didier Cailhol, Christophe Gauchon

► **To cite this version:**

Stéphane Jaillet, Edwige Pons-Branchu, Didier Cailhol, Christophe Gauchon. Crues holocènes et stalagmites corrodées de l'évent de Foussoubie (Ardèche, France). 18th International Congress of Speleology, Jul 2022, Le bourget du Lac, France. pp.67-70. hal-04389664

HAL Id: hal-04389664

<https://hal.science/hal-04389664v1>

Submitted on 15 Jan 2024

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.

Public Domain

Crues holocènes et stalagmites corrodées de l'évent de Foussoubie (Ardèche, France)

Stéphane JAILLET⁽¹⁾, Edwige PONS-BRANCHU⁽²⁾,
Didier CAILHOL⁽³⁾ & Christophe GAUCHON⁽¹⁾

(1) Laboratoire EDYTEM, Université Savoie Mont Blanc, CNRS, Pôle Montagne, 73 376 Le Bourget-du-Lac, stephane.jaillet@univ-smb.fr (corresponding author)

(2) Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPSL, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

(3) Inrap 13 rue du Négoce 31650 Saint-Orens-de-Gameville – didier.cailhol@inrap.fr

Résumé

En amont des Gorges de l'Ardèche, le système karstique de Foussoubie avec 23 km de développement et un bassin d'alimentation de 14,4 km² se caractérise par un drain dominant alimenté à partir d'une perte unique. Il est caractérisé par des crues importantes affectant une zone épinoyée bien développée. L'exutoire du système (l'Event de Foussoubie) est le siège de mises en charge plurimétriques, commandées par un seuil de déversement au droit du porche d'entrée. Deux stalagmites assez détritiques, ont été datées par la méthode U/Th. Quatre dates ont été obtenues entre 2,05 ± 0,4 ka et 3,95 + 3,07 / - 2,37 ka qui placent l'ensemble de ces croissances dans l'Holocène tardif. L'analyse des sections polies des deux échantillons fait apparaître plusieurs surfaces d'érosion montrant qu'au cours de cette période des phases de crues intenses (comme c'est le cas actuellement) séparent des phases plus calmes autorisant la croissance des stalagmites. Plusieurs interprétations sont proposées : modification du seuil au niveau du porche, changement géométrique de la perte, évolution du couvert végétal sur le plateau ou dans le bassin d'alimentation.

Abstract

Holocene floods and eroded stalagmites from the Foussoubie Cave (Ardèche, France). Upstream of the Gorges de l'Ardèche, the Foussoubie karstic system, with 23 km of development and a 14.4 km² catchment area, is characterized by a dominant drain with a single sink. It is characterized by significant flooding affecting a well-developed epiphreatic zone. An overflow sill at the entrance porch controls the multi-metric flood in the system's spring (the Foussoubie Event). In the section of the gallery between the downstream siphon and the entrance porch, two detrital stalagmites have been dated by the U/Th method. Four dates were obtained, ranging between 2.05 ± 0.4 ka and 3.95 + 3.07 / - 2.37 ka, which place all these growths in late Holocene. Analysis of the polished sections of the two samples reveals several erosion surfaces, showing that during this period, phases of intense flooding (as is currently the case) separate calmer phases allowed the growth of stalagmites. Several interpretations are proposed: modification of the threshold at the porch, geometric change of the sink, evolution of the vegetation cover on the plateau or in the catchment basin.

1. Introduction

Si les stalagmites sont connues pour être des indicateurs pertinents des variations paléo-environnementales, elles s'avèrent aussi de précieux enregistreurs des crues souterraines. Diverses études ont déjà mis en avant l'enregistrement des crues par les stalagmites, essentiellement par piégeage de sédiments détritiques inter-stratifiés dans les lamines (DASGUPTA *et al.*, 2010 ; FRAPPIER *et al.*, 2014 ; DENNISTON *et al.*, 2017). C'est chaque fois plutôt un enregistrement de paléo-mises en charge avec des circulations lentes d'eaux turbides, qui viennent déposer de minces films détritiques. Lorsque la stalagmite est dans le passage du courant d'eau, ce peut être alors des traces érosives laissées par les flux d'eau et qui affectent les stalagmites elles-mêmes en laissant, dans la structure interne, des surfaces d'érosion. C'est le cas

proposé ici à partir de l'exemple du système de Foussoubie. En rive droite des gorges de l'Ardèche, ce système karstique (23 km de développement souterrain, LE ROUX, 1984, fig. 1) est connu pour la violence de ses crues souterraines. Alimentée par un bassin d'alimentation de 14,4 km², la perte unique (la goule), concentre les écoulements dans un drain épinoyé où les mises en charges ont été étudiées et enregistrées sur plusieurs mètres de hauteur (JAILLET *al.*, 2012 ; ERGUY *et al.*, 2021). A l'aval du système un siphon de 350 m de longueur connaît des mises en charges importantes supérieures à 12 m. C'est dans ce tronçon aval que deux stalagmites ont fait l'objet d'une analyse spécifique consistant à les replacer dans leur contexte morphologique, à analyser leurs croissances et à les dater.

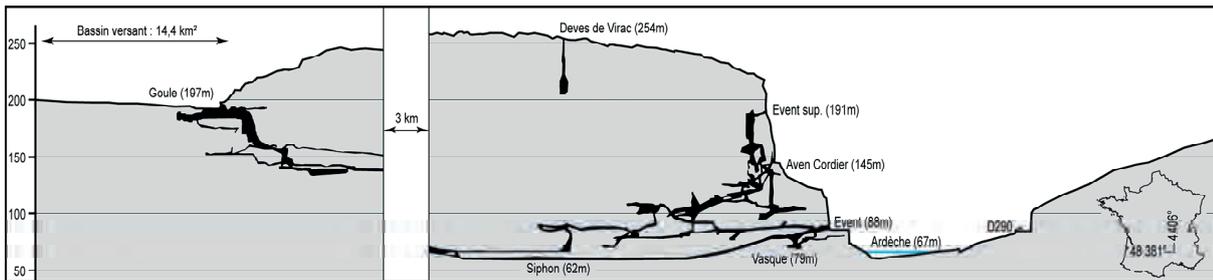


Figure 1 : Le système de Fousoubie en rive droite des gorges de l'Ardèche (23 km) draine un bassin versant de 14,4 km² auquel s'ajoute une alimentation par infiltration. L'évent est l'exutoire temporaire du système.

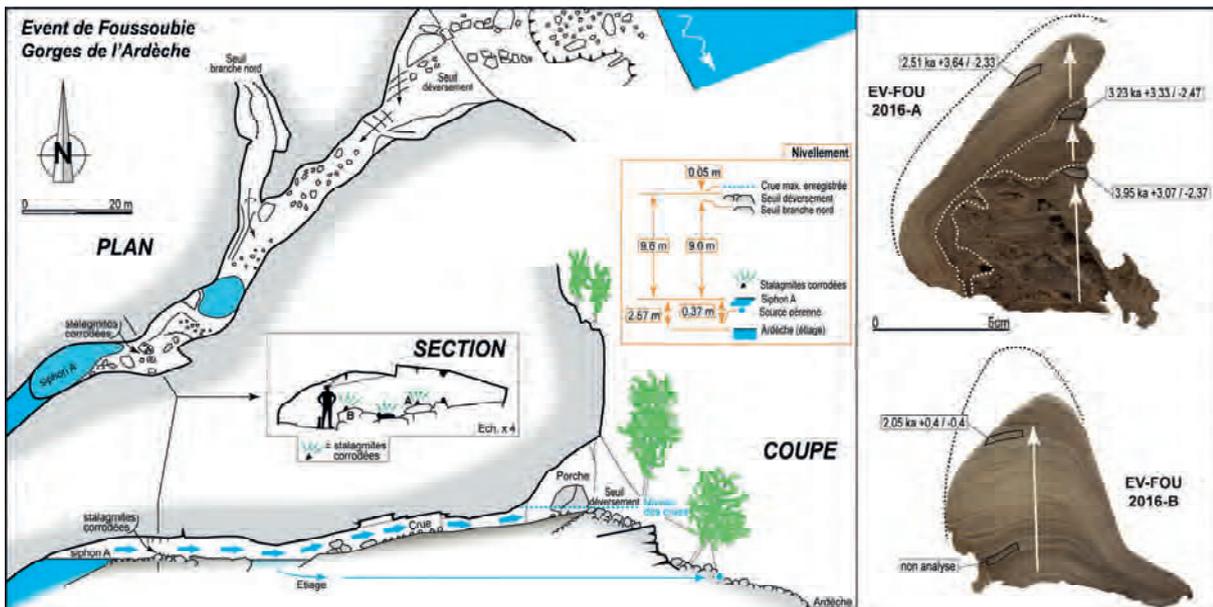


Figure 2 : Plan et coupe détaillée de l'évent de Fousoubie et localisation des stalagmites étudiées dans le tronçon aval du système karstique. Le tronçon de galerie entre le siphon A et le seuil de déversement est le siège de mises en charge récurrentes ennoyant les stalagmites. Les sections polies des stalagmites EV-FOU-2016 A & B montrent les différentes phases d'érosion affectant leur croissance au cours de l'Holocène. Pour EV-FOU-2016-A, des phases de croissances continues sont séparées par des phases de corrosions intenses. La période actuelle est une phase de corrosion.

2. Méthodes : une étude des stalagmites corrodées

L'étude du site a été conduite selon une double approche : (i) topographique et géomorphologique d'une part et (ii) analytique sur les stalagmites d'autre part. Sur place, un relevé topographique de l'évent a été réalisé, en coupe et en plan (fig. 2). Nous avons entrepris un nivellement fin des points clés de déversement des eaux à savoir le siphon A, les seuils, le point d'émergence et l'Ardèche. Ces mesures, réalisées au niveau de chantier, complètent les mesures des hauteurs d'eau réalisées avec des sondes ReefNet au niveau du siphon A. Deux stalagmites corrodées ont été sélectionnées quelques mètres en aval du siphon A (fig. 3). Elles ont connu et connaissent encore des phases érosives majeures. Elles ont été tranchées dans l'axe de la galerie souterraine afin de bien identifier l'alternance des phases érosives et des phases de croissance. Cinq micro-échantillons ont été prélevés et analysés au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement à Gif Sur Yvette. Ils contiennent une fraction importante d'argile rendant leur

datation difficile. La technique de préparation mise en œuvre consiste à dissoudre totalement l'échantillon (fractions carbonatée et argileuse). Des échantillons de 100 à 300 mg ont été dissouts en HCl dilué dans des béchers contenant une quantité connue de traceur ²²⁹Th ²³³U ²³⁶U. Le résidu argileux non dissout est séparé par centrifugation du surnageant et attaqué par un mélange de HF et HNO₃ concentrés, à chaud pendant une nuit puis évaporé et repris en HCl dilué. Les deux fractions ainsi dissoutes sont mélangées puis traitées classiquement pour une datation suivant un protocole présenté dans PONS-BRANCHU et al. 2014. Brièvement, après coprécipitation avec FeOH, les fractions U et Th sont purifiées sur colonne échangeuse d'ions (ici U-TEVA en milieu nitrique). L'analyse est réalisée sur MC-ICPMS Neptune™ +.

3. Résultats : nivellement et mises en charge

Entre le siphon A et le point d'émergence en bordure de l'Ardèche, la dénivellation est de 0,37 m. Celle-ci est à 2,2 m au-dessus du cours de l'Ardèche en étiage. Entre le siphon A et le seuil de débordement au niveau du porche, la dénivellation est de 9,6 m. Ce point commande le moment où l'évent est en crue et déverse par cet orifice temporaire perché (fig. 2). Entre le siphon A et le seuil de débordement au niveau du seuil déversoir en direction de la branche nord et du siphon B, la dénivellation est de 9,01 m. Ce seuil est donc 0,59 m plus bas que le seuil de déversement. Ces éléments altimétriques constituent des seuils clés qui commandent les mises en charge du réseau. Ces mises en charge justement ont été analysées à partir d'un enregistrement des hauteurs d'eau au droit du siphon A, grâce à une sonde ReefNet (période 2011 / 2018). Les données analytiques sont présentées dans un travail spécifique (ERGUY *et al.*, 2022) dont nous extrayons les éléments essentiels. Au droit du siphon A, la hauteur maximale enregistrée est 9,65 m, c'est-à-dire 5 cm au-dessus du seuil de déversement. Le siphon C, perché par rapport au siphon A, connaît une mise en charge maximale enregistrée de 8,31 m. Sur la période de 2011 à 2018, il y a en moyenne 47 épisodes par an, de montée des eaux supérieure à 1 m. Les mois qui connaissent le plus de variations sont mars (11), novembre (9), mai (6) et octobre (5). La plupart de ces montées des eaux ne donnent pas lieu à un débordement par le seuil. La moyenne est évaluée à un débordement tous les 3 ans. Enfin, sur les épisodes intenses,

la vitesse de montée de l'eau est comprise entre 4 et 6 cm/mn. Si le débit de pointe à la sortie du siphon A est de 7,3 m³/s (avec évacuation par le seuil), le débit moyen des crues est de l'ordre de 1m³/s (avec évacuation par l'exutoire en bordure de l'Ardèche par des griffons plus ou moins étagés sur 2m de hauteur). Ces éléments permettent d'évaluer correctement la fréquence et l'intensité des crues subies par les stalagmites étudiées, placées quelques mètres en aval du siphon et donc ennoyées plusieurs dizaines de fois par an.



Figure 3 : Un des ensembles stalagmitiques étudiés présente des marques de corrosion importantes, associées aux crues régulières affectant le système. Le prélèvement de deux stalagmites a permis de réaliser des datations et leur analyse sur section polie.

4. Résultats : Datations et surfaces d'érosion

Les données de concentrations, rapports isotopiques et âges (avant et après correction) sont présentées figure 4. Tous les échantillons analysés présentent des caractéristiques similaires : des concentrations en uranium élevées (plus de 700 ppb), une signature isotopique en uranium appauvrie en ²³⁴U ($\delta^{234}\text{U}$ négatif) et une contribution importante de thorium détritique, marquée par des teneurs élevées en ²³²Th et des rapports ²³⁰Th/²³²Th faibles (pour l'échantillon de la stalagmite B) ou très faibles (échantillons de la stalagmite A). Les âges déterminés doivent donc être corrigés de cette fraction détritique. Pour l'échantillon B, une correction basée sur un rapport (²³⁰Th/²³²Th) de $1,5 \pm 50\%$ est appliquée, et les incertitudes propagées, donnant un âge brut de 2,87 ($\pm 0,02$) ka BP avant correction et 2,05 ($\pm 0,43$) ka BP après correction. Pour les échantillons de la stalagmite A, le contenu en thorium détritique ne permet pas d'envisager une telle correction avec une composition de la phase détritique prédéterminée. Cependant, ces 3 échantillons étant issus de la même séquence, une correction basée sur la détermination de la valeur de correction permettant de rendre compte de l'ordre stratigraphique est possible (routine STRUTage, ROY BARMAN *et al.*, 2016). Pour cette stalagmite, les âges avant correction s'échelonnent entre 33,40 ($\pm 0,18$) et 16,78 ($\pm 0,11$) ka BP, avec des inversions stratigraphiques, et après correction entre 2,51 (+3,64/-2,33) et 3,95 (+3,07/-2,37) ka BP. La valeur du rapport de correction déterminée par la

routine STRUTage (²³⁰Th/²³²Th = $0,84 \pm 0,10$) est compatible avec ce qui est attendu pour des argiles.

L'analyse des sections polies a été réalisée sur deux tranches avec un axe de coupe parallèle au flux d'eau. L'échantillon EV-FOU-2016-A présente trois surfaces d'érosion que les dates encadrent partiellement (fig. 2). L'échantillon EV-FOU-2016-B est plus récent et n'offre qu'une surface d'érosion correspondante à la période actuelle. Ces deux échantillons se succédant partiellement, il est possible d'avancer que les deux échantillons enregistrent la chronologie suivante : croissance stalagmitique jusqu'au moins 3,95 (+3,07/-2,37) ka BP suivi d'une phase d'érosion importante. Une seconde phase de croissance stalagmitique est identifiée jusqu'au moins 3,23 (+3,33/-2,47) ka BP suivie d'une nouvelle phase d'érosion intense. Une nouvelle phase de croissance s'étend jusqu'au moins 2,51 (+3,64/-2,33) ka BP pour l'échantillon A et 2,05 (+0,4/-0,4) ka BP pour l'échantillon B. Elle est oblitérée par une troisième phase d'érosion toujours active. Sur la base des dates et de l'emboîtement des surfaces, il ne semble pas raisonnable de distinguer les dernières phases de croissance qui finalisent les deux échantillons. Au contraire elles sont plus probablement synchrones. Au final, c'est donc ici 3 phases de croissances et 3 phases d'érosion qui sont enregistrées sur une période couvrant les 5 derniers milliers d'années.

Echantillon	$[^{238}\text{U}]$ ppm		$\delta^{234}\text{UM}$ (‰)		$(^{230}\text{Th}/^{238}\text{U})$		$(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})$		Age brut (ka BP)		Age corrigé (ka BP)		
EV FOU 2016 A1	0,867	0,007	-6,3	$\pm 1,1$	0,176	$\pm 0,0003$	0,93	0,002	21,24	$\pm 0,07$	3,95*	+3,07	-2,37
EV FOU 2016 A2	0,722	0,006	-8,3	$\pm 1,0$	0,262	$\pm 0,0009$	0,69	0,002	33,40	$\pm 0,18$	3,23*	+3,33	-2,47
EV FOU 2016 A3	1,160	$\pm 0,010$	-65,9	$\pm 1,3$	0,133	$\pm 0,0006$	0,76	0,004	16,78	$\pm 0,11$	2,51*	+3,64	-2,33
EV FOU 2016 B2	0,934	0,008	-36,8	$\pm 0,8$	0,026	$\pm 0,0001$	5,26	0,029	2,87	$\pm 0,02$	2,05	+0,4	-0,4

Figure 4 : Données de concentrations, de rapports isotopiques et d'âges U/Th. $\delta^{234}\text{U} = ([^{234}\text{U}/^{238}\text{U}] - 1) \times 1000$. Les âges sont exprimés en milliers d'années avant l'année 1950 (ka BP). Les âges * ont été corrigés en utilisant la routine STRUTage (ROY BARMANN et al., 2016). Pour B2, l'âge a été corrigé en utilisant $(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}_{\text{det}}) = 1,5 \pm 50\%$.

5. Conclusions

Il a été possible de montrer que la fréquence des crues affectant le conduit n'est pas une constante. Sur les cinq derniers milliers d'années, des phases calmes, sont séparés par des phases érosives n'autorisant pas cette croissance et affectant les concrétions de manière importante, laissant chaque fois une surface d'érosion caractéristique (fig. 2). La succession des phases d'érosion et des phases de croissance rythme les conditions hydrodynamiques du conduit dont on mesure combien elles évoluent sur des échelles de temps courtes. On a vu que le seuil de déversement est un élément clé du contrôle des mises en charge puisque les crues les plus importantes, celles qui déversent, ne dépassent que de quelques centimètres ce seuil. Il est donc possible d'envisager que la dynamique gravitaire (effondrements) qui affecte le porche, est un élément de contrôle de la variabilité des mises en charge dans la zone aval. Dans cette occurrence, il conviendrait de mieux cerner le rythme de ces effondrements, mais aussi d'expliquer comment après une phase d'effondrement, une évacuation du matériel est suffisante pour expliquer qu'aucune mise en charge ne soit plus possible durant les phases calmes. L'affleurement des calcaires, reconnu de manière peu profonde sous le tablier de bloc ne milite pas pour cette unique explication. Des édifices stalagmitiques identifiés et datés dans la partie amont du réseau montre de même des phases d'érosion alternant avec des phases de croissances (JAILLET et al.,

2012). Mais les gammes de dates alors reconnues plaçaient ces alternances dans le pléistocène et laissaient donc entendre un contrôle climatique à ces variations. La variabilité de la dimension de la perte (entrée unique des eaux d'infiltration rapide) constitue alors une piste non négligeable pour expliquer l'alternance de phases de croissance et de phases érosives. Le plateau (infiltration lente) comme le bassin versant de la perte (infiltration rapide) sont de même le siège de changements importants de l'occupation de l'espace. On ne peut donc exclure un contrôle lié l'importance du couvert végétale lui-même sous influence climatique et / ou anthropique.

Les stalagmites de l'événement de Foussoubie se retrouvent finalement en position intéressante, au carrefour d'influences variées : (i) locales (dynamique gravitaire du porche et du seuil de déversement), (ii) éloignées mais ponctuelles (dynamique dimensionnelle de la perte à l'amont), (iii) anthropiques (gestion et occupation de l'espace pour le bassin versant et le plateau sus-jacent), (iv) voire climatiques (variabilité à l'échelle du Pléistocène, mais aussi de l'Holocène). Elles enregistrent évidemment une variabilité des conditions hydrodynamiques d'un tronçon de conduit. D'autres analyses permettront de démêler la part des influences externes (hommes, climat) et des contrôles internes (géométrie et seuils dimensionnels) dans cette évolution singulière.

Références

- DASGUPTA S., SAAR M.O, EDWARDS R.L. et al. (2010) Three thousand years of extreme rainfall events recorded in stalagmites from Spring Valley Caverns, Minnesota. *Earth Planet Sci Lett* 300(1-2):46-54
- DENNISTON R.F., LUETSCHER M. (2017) Speleothems as high-resolution paleoflood archives. *Quaternary Science Reviews* vol. 170, pp. 1-13.
- ERGUY M., JOHANNET A., PISTRE S. et al. (2022) Hydrogeological Behaviour Characterization of the Foussoubie Karst Network using Statistical Approaches. *Congrès UIS 2021, Savoie-Technolac, symposium 05*.
- FRAPPIER A.B., PYBURN J., PINKEY-DROBNIS A.D. et al. (2014) Two millennia of tropical cyclone-induced mud layers in a northern Yucatán stalagmite reveal: Multiple overlapping climatic hazards during the Maya Terminal Classic "megadroughts" *Geophys Res Lett* 41(14):5148-5157.
- JAILLET S., CAILHOL D., ARNAUD J et al. (2012) Les crues du système karstique de Foussoubie (Ardèche, France). Une analyse morphologique et hydrodynamique des circulations dans la zone épinoyée du karst. *Collection Edytem* 13, 115-138.
- LE ROUX P. (1984) Système Goule/Event de Foussoubie. Historique résumé de son exploration (Avril 1984). SERAHV n°18, *Soc. d'Et. et de Rech. Arch. et Hist. de Vagnas*, 12-20.
- PONS-BRANCHU E., DOUVILLE E., ROY-BARMAN M. et al. (2014) A geochemical perspective on Parisian urban history based on U-Th dating, laminae counting and yttrium and REE concentrations of recent carbonates in underground aqueducts. *Quat. Geochr.* 24, 44-53.
- ROY-BARMAN M., PONS-BRANCHU E. (2016) Improved dating of carbonates with high initial ^{230}Th using stratigraphical and coevality constrains on U-Th ages. *Quaternary Geochronology*, 32, 29-39.