



**HAL**  
open science

## **Colmatage détritique synchrone de deux drains karstiques étagés : grotte Roche et Fenêtre 4 (gorges de la Bourne, massif du Vercors, France)**

Vivien Mai Yung Sen, Stéphane Jaillet, Xavier Robert, Yann Rolland, Pierre G Valla, Emmanuel Malet, Edwige Pons-Branchu, Julien Carcaillet

### **► To cite this version:**

Vivien Mai Yung Sen, Stéphane Jaillet, Xavier Robert, Yann Rolland, Pierre G Valla, et al.. Colmatage détritique synchrone de deux drains karstiques étagés : grotte Roche et Fenêtre 4 (gorges de la Bourne, massif du Vercors, France). *Karstologia*, 2025, 85, pp.39-50. <hal-05291005>

**HAL Id: hal-05291005**

**<https://hal.science/hal-05291005v1>**

Submitted on 30 Sep 2025

**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.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC 4.0 - Attribution - Non-commercial use - International License

# Colmatage détritique synchrone de deux drains karstiques étagés : grotte Roche et Fenêtre 4

## (gorges de la Bourne, massif du Vercors, France)

Vivien MAI YUNG SEN<sup>1,2</sup>, Stéphane JAILLET<sup>1</sup>, Xavier ROBERT<sup>3</sup>, Yann ROLLAND<sup>1,3</sup>, Pierre G. VALLA<sup>3</sup>, Emmanuel MALET<sup>1</sup>, Edwige PONS-BRANCHU<sup>4</sup> et Julien CARCAILLET<sup>3</sup>

(1) EDYTEM, Université Savoie Mont Blanc, CNRS, UMR 5204, Le Bourget-du-Lac, France

(2) CEREGE, Aix Marseille Université, CNRS, IRD, INRAE, Aix-en-Provence, France

(3) Institut des Sciences de la Terre (ISTerre), Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, Univ. Gustave Eiffel, Grenoble, France

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

Contact : Vivien.Mai-Yung-Sen@univ-smb.fr

**RÉSUMÉ :** La datation des remplissages sédimentaires souterrains apporte des informations quantitatives précieuses pour reconstituer l'histoire de l'incision des systèmes fluviaux de surface, notamment dans les régions montagneuses. Le système karstique grotte Roche – Fenêtre 4, en rive gauche des gorges de la Bourne (massif du Vercors, Alpes occidentales françaises), est caractérisé par deux drains souterrains étagés et colmatés par des sédiments détritiques. Une étude combinant analyses géomorphologique, sédimentologique et géochronologique a été menée afin de caractériser et dater les processus hydro-sédimentaires responsables du colmatage de ces deux conduits, en lien avec la dynamique d'incision de la Bourne (niveau de base à l'aval) et l'alimentation hydro-sédimentaire du système (depuis le plateau à l'amont). La similarité et la synchronicité du colmatage des deux conduits, pourtant étagés sur 90 m, nous amènent à proposer un mécanisme de congestion sédimentaire, expliquant cette aggradation sédimentaire généralisée dans le système karstique sur plus de 90 m de dénivellation. Au cours d'une ou plusieurs transitions climatiques du Pléistocène supérieur (stades isotopiques marins MIS4-MIS10), l'augmentation du flux sédimentaire en provenance du glacier local de la Grande Moucherolle a entraîné un colmatage progressif du conduit actif de grotte Roche, provoquant la

réactivation temporaire du conduit « fossile » Fenêtre 4, qui a été colmaté à son tour. Ce mécanisme de congestion sédimentaire n'est donc pas contrôlé ici par le niveau de base de la Bourne, mais par les variations climatiques modulant l'alimentation en sédiments du système karstique, en situation paraglacière. Ces résultats illustrent que les âges d'enfouissement obtenus sur des remplissages sédimentaires souterrains, en contexte alpin, sont des indicateurs à utiliser conjointement à une bonne analyse du contexte morpho-climatique pour reconstituer la chronologie de l'incision des vallées.

**MOTS-CLÉS :** Incision, per-descendum, sédiments endokarstiques, datation U-Th, isotopes cosmogéniques, glaciations.

**ABSTRACT:** SYNCHRONOUS DETRITAL CLOGGING OF TWO KARSTIC LEVELS: ROCHE AND FENÊTRE 4 CAVES (BOURNE GORGES, VERCORS MASSIF, FRANCE). Dating of underground sedimentary infills provides precious quantitative information to reconstruct the incision history of fluvial systems, especially in mountainous regions. The Grotte Roche - Fenêtre 4 cave karstic system, localized on the left bank of the Bourne gorges (Vercors massif, Western French Alps) is characterized by two levels of sub-horizontal drains filled with detrital sediments. We carried out a study combining geomorphological, sedimentological and geochronological analyses to understand the hydro-sedimentary

processes responsible for the clogging of these two conduits, in relation to the incision dynamics of the Bourne (forming the downstream base level) and the upstream hydro-sedimentary supply to the system (from the Vercors plateau). The similarity and synchronicity of the clogging of the two conduits, despite being stepped over 90 m, led us to propose a sedimentary congestion mechanism, explaining this generalized sedimentary aggradation in the karstic system over more than 90 m of vertical relief. During one or more climatic transitions during the Upper Pleistocene (marine isotopic stages MIS4-MIS10), an increased sediment input from the Grande Moucherolle local glacier progressively clogged the active Roche Cave, causing the temporary reactivation of the "fossil" Fenêtre 4, which was in turn clogged. This mechanism of sedimentary congestion is therefore not controlled here by the base level of the Bourne river, but by climatic variations influencing the sediment supply to the karst system, in a paraglacial situation. These results show that burial ages obtained from underground sedimentary records, in alpine settings, are indicators that should be used in a combined approach with the analysis of the morpho-climatic context to reconstruct the chronology of valley incision.

**KEYWORDS:** Incision, per-descendum, cave sediments, U-Th dating, cosmogenic burial dating, glaciations.

## Introduction

### A. Contexte scientifique

L'incision des vallées fluviales entraîne une réorganisation des systèmes karstiques souterrains tributaires. En réponse à la baisse du niveau de base imposée par la rivière, de nouveaux conduits actifs se développent à une altitude inférieure et les conduits plus anciens, alors perchés, sont abandonnés. Ce modèle de karstification *per-descendum* [e.g. Harmand et al., 2017] structure des réseaux karstiques étagés. Le couplage entre spéléogénèse et stades d'incision du réseau hydrographique en surface est mis à profit par les géomorphologues qui utilisent les conduits phréatiques étagés fossiles comme des marqueurs de l'incision des vallées [e.g. Jaillot et al., 2004; Haeuselmann et al., 2007]. Cette méthode nécessite de contraindre dans le temps et dans l'espace les différentes étapes de karstification à l'aide de méthodes géochronologiques sur les sédiments et concrétions endo-karstiques. Les dépôts de sédiments détritiques alluviaux enregistrent les phases d'activité hydrologique dans les conduits alors que les phases de concrétionnement sont les témoins de leur abandon [e.g. Jaillot et al., 2023]. L'étude stratigraphique et géochronologique de ces archives sédimentaires permet donc de retracer l'évolution des drains souterrains et la chronologie d'incision de la rivière dont le système karstique est le tributaire [Rixhon, 2023; Calvet et al., 2024].

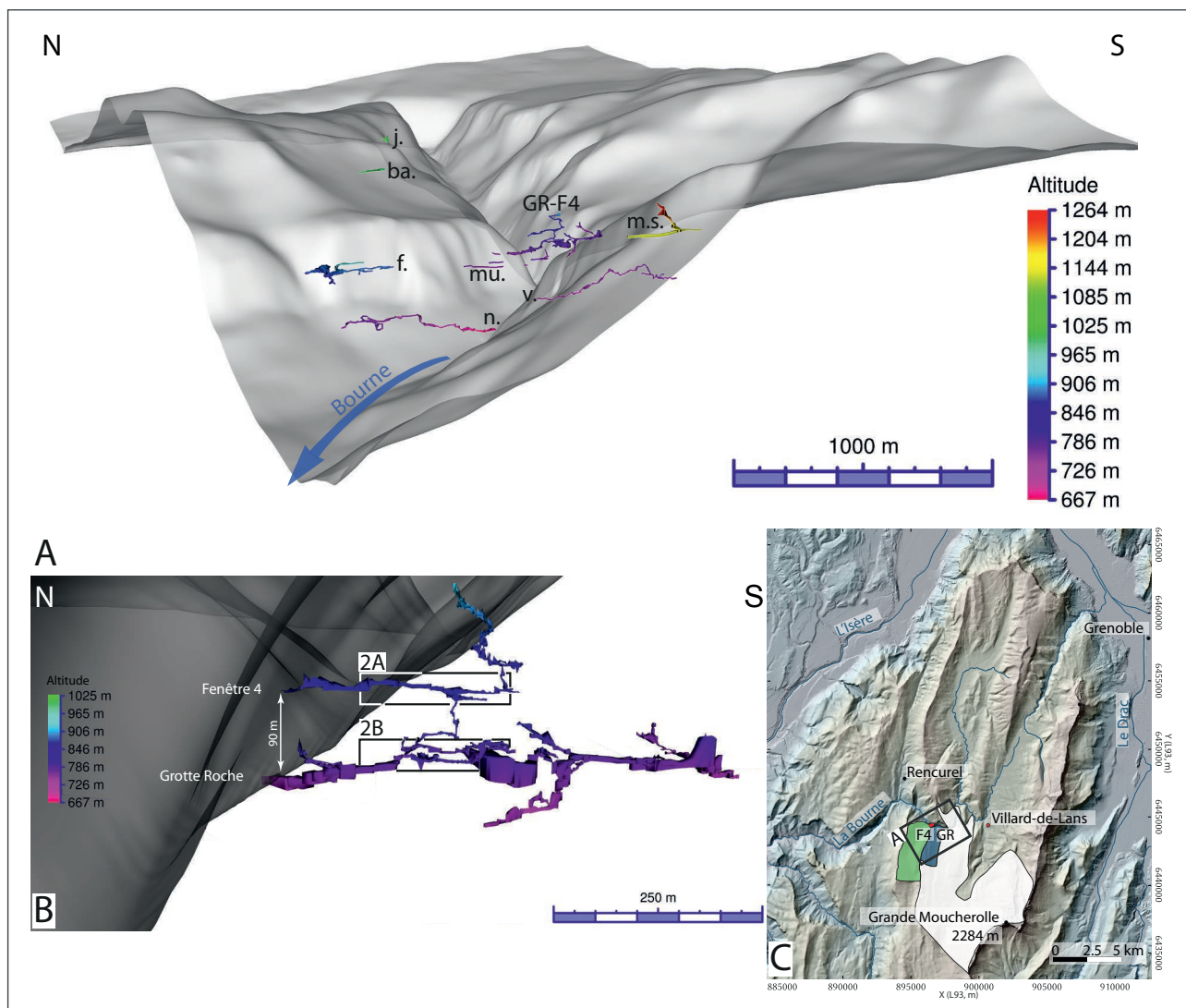
Les méthodes de datation des sédiments détritiques [e.g. Rixhon, 2022], telles que les nucléides cosmogéniques produits *in situ* (e.g.  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  sur quartz), la luminescence stimulée optiquement (OSL), ou encore la résonance paramagnétique électronique (RPE/ESR) mesurent le moment où le sédiment entre dans le système karstique et non l'instant exact du dépôt; mais le temps de transport endokarstique est généralement considéré comme négligeable par rapport à l'incertitude obtenue sur l'âge considéré. Pourtant, le fonctionnement hydro-sédimentaire du système karstique peut être complexifié par des processus de remobilisation sédimentaire ou de réactivation de conduits fossiles, ce qui nécessite d'être prudent avec l'interprétation des âges d'enfouissement obtenus. Par exemple, des dépôts sédimentaires plus anciens, contenus initialement dans des niveaux karstiques plus hauts en altitude, peuvent être remobilisés et se redéposer dans les niveaux phréatiques actifs ce qui mène à une surestimation de l'âge d'activité des conduits [Calvet et al., 2024]. Au contraire, une réactivation de niveaux fossiles perchés lors de mises en charge importantes du système peut mener au dépôt de sédiments significativement plus jeunes que l'âge de creusement initial du conduit. Ces dynamiques sédimentaires compliquent l'interprétation des datations en termes de chronologie d'incision des vallées [Rixhon, 2023; Calvet et al., 2024]. Comprendre ces processus est donc nécessaire pour interpréter les datations de sédiments endo-karstiques en termes de modèles d'incision de vallée, d'autant plus en contexte alpin où les environnements glaciaires/paraglaciaires sont propices à des alluvionnements importants pouvant générer un engorgement des systèmes karstiques [Jaillot et al., 2023].

Cette problématique se pose notamment dans les gorges de la Bourne (massif du Vercors, France), où différentes générations de drains étagés ont été décrites comme creusées en réponse à l'incision des gorges [Delannoy, 1997; Delannoy et al., 2009]. Plus particulièrement, cette question est cruciale pour comprendre l'histoire des écoulements et dépôts sédimentaires des deux drains fossiles étagés d Fenêtre 4 et grotte Roche, situés en rive gauche des gorges de la Bourne. Ces deux cavités ont comme spécificité spéléologique commune d'être largement colmatées par des sédiments sablo-argileux. Les travaux de désobstruction dans grotte Roche entre 1993 et 2008 [Gondras, 2009] ont permis de découvrir 1 608 m de nouvelles galeries et de dévoiler une coupe stratigraphique dans le remplissage sédimentaire [Thomas et al., 2014]. Des travaux de désobstruction, entrepris au fond de la grotte de Fenêtre 4, sont toujours en cours et permettent de dévoiler au fur et à mesure de leur avancée de nouvelles coupes stratigraphiques. L'objectif de cette étude est de déterminer la chronologie de la formation et de l'évolution des conduits karstiques de grotte Roche et Fenêtre 4, et de leurs colmatages sédimentaires respectifs, pour déterminer les implications potentielles de ce cadre temporel sur le modèle d'incision de la Bourne.

### B. Deux cavités étagées connectées à la Bourne

L'histoire de l'incision des gorges de la Bourne s'étale sur les dix derniers millions d'années en relation avec la surrection de la chaîne subalpine du Vercors [Mai Yung Sen et al., 2025]. Ces phases d'incision ont été enregistrées par le creusement de nombreux conduits karstiques étagés depuis la fin du Miocène [Delannoy, 1997]. À partir d'une analyse reposant sur la chronologie relative, l'étagement et le recoupement d'archives karstiques, en surface et dans l'endokarst, Delannoy [1997] a proposé une structuration des conduits karstiques étagés de la Bourne en trois étapes, contrôlées par la tectonique subalpine, potentiellement les changements eustatiques (crise messinienne) et le climat, sous l'action des glaciations quaternaires qui ont eu un impact sur la dernière phase d'incision de la rivière. Le système fossile grotte Roche-Fenêtre 4 n'a jusqu'à présent pas été intégré dans ce modèle.

Le système karstique grotte Roche et Fenêtre 4 correspond à deux cavités sans écoulements horizontaux pérennes appartenant à un ensemble assez dense de cavités fossiles et actives. Elles se développent dans les calcaires urgoniens et s'étagent sur les deux versants des gorges de la Bourne, entre Villard-de-Lans et Rencurel (figure 1). L'altitude de l'entrée de grotte Roche est d'environ 750 m, à peine au-dessus du lit de la rivière actuelle. L'altitude de l'entrée de Fenêtre 4, perchée sur le versant, est d'environ 840 m. Ces deux conduits, interprétés comme des affluents souterrains fossiles de la Bourne [Bourgin, 1941; Couturier, 2013], se développent à la limite entre les bassins d'alimentation de Goule Verte et de Goule Bleue (figure 1C), dont les aires de drainage sont respectivement d'environ 7 km<sup>2</sup> et 3 km<sup>2</sup>. En l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de délimiter précisément les anciens bassins d'alimentation de grotte Roche et Fenêtre 4. Toutefois, les calibres des conduits grotte Roche [~ 14 m de large;

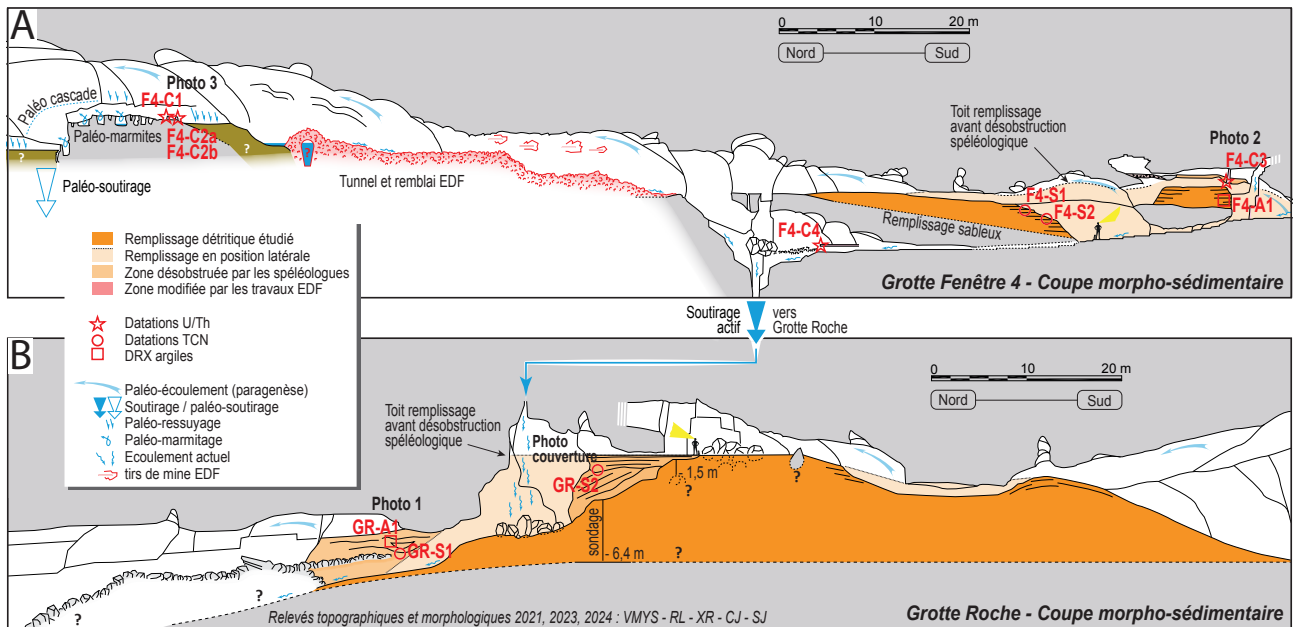


Gondras, 2009] et Fenêtre 4 [~ 5 m de large ; Gondras, 2009] sont significativement supérieurs au calibre de Goule Verte [~ 2 m de large ; Lips, 2009]. Cela suggère que le paléo-bassin d'alimentation du système grotte Roche-Fenêtre 4 était très probablement plus étendu que les bassins actuels de Goule Verte et Goule Bleue et contenait potentiellement tout ou partie du bassin d'alimentation actuel de Goule Blanche (~ 52 km<sup>2</sup> ; figure 1C). Le système a pu ainsi drainer des versants et des plateaux karstiques dont l'altitude actuelle se situe entre 1000 et 2284 m (Grande Moucherolle ; figure 1). Cette zone de drainage est aujourd'hui principalement constituée de calcaires urgoniens, surmontés de lambeaux de Crétacé supérieur. Des dépôts morainiques locaux sont également présents sur le bassin d'alimentation de Goule Blanche et correspondent aux moraines terminales de glaciers locaux qui se sont développés sur le versant ouest de la Grande Moucherolle au cours des péjorations climatiques pléistocènes [Delannoy, 1997].

Le système karstique fossile grotte Roche-Fenêtre 4 s'organise autour des deux drains principaux sub-horizontaux, de direction générale N-S, à environ 750 m d'altitude pour le conduit principal de grotte Roche, et à 840 m d'altitude pour celui de Fenêtre 4 (figure 1B). L'étagement entre les deux conduits est donc d'environ 90 m. Des

**Figure 1:** A. Vue 3D des cavités étagées dans les gorges de la Bourne, entre Villard-de-Lans et Rencurel (massif du Vercors, figure 1C). n. : Goule Noire, v. : Goule Verte, mu. : Grotte Murée inf. et sup., f. : Grotte Favot, ba. : Balme Noire, j. : Méandre Jaune, m.s. : Grotte Merveilleuse Supérieure GR-F4 ; système Grotte Roche - Fenêtre 4. B. Zoom sur le système karstique Grotte Roche - Fenêtre 4 (GR-F4). La localisation des coupes morpho-sédimentaires de la figure 2A et 2B sont indiquées par des rectangles noirs. C. Carte de relief du massif du Vercors Nord (source : IGN RGE Alt. 5 m). Le rectangle noir correspond à l'emprise de la vue 3D en figure 1A. Les bassins d'alimentation des résurgences karstiques Goule Verte, Goule Bleue et Goule Blanche sont représentées respectivement en vert, bleu et blanc sur la carte [Rousset, 1982 ; Siry, 1998].

A. 3D view of the multi-level stepped cave system in the Bourne river canyon, between Villard-de-Lans and Rencurel (Vercors massif, figure 1C). n. : Goule Noire, v. : Goule Verte, mu. : lower and upper Murée cave, f. : Favot cave, ba. : Balme Noire, j. : Méandre Jaune, m.s. : upper Merveilleuse cave, m.i. : lower Merveilleuse cave, GR-F4 : Roche - Fenêtre 4 system. B. Zoom on the Roche - Fenêtre 4 (GR-F4) karstic system. Black rectangles locate the stratigraphic cross-sections shown in figure 2A and 2B. C. Relief map of the northern Vercors massif (source : IGN RGE Alt. 5 m). The black rectangle corresponds to the 3D view shown in figure 1A. The watersheds of the Goule Verte, Goule Bleue and Goule Blanche karstic resurgences are shown in green, blue and white respectively [Rousset, 1982 ; Siry, 1998].



**Figure 2:** Coupes longitudinales morpho-sédimentaires des drains étudiés, séparés par une série de puits non représentés ici. Les coupes sont localisées sur la figure 1B. **A.** Fenêtre 4. **B.** Grotte Roche. L'amont hydro-sédimentaire des deux drains est situé au sud et les gorges de la Bourne au nord. Notez l'importance des sédiments sableux accumulés et la localisation des échantillons datés par les méthodes  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  et U-Th, ainsi que les échantillons pour analyse minéralogique (DRX).  
*Longitudinal cross-sections of the studied drains with morpho-sedimentary analysis, separated by a series of shafts not shown here. The location of the sections is shown in figure 1B. A. Fenêtre 4 (F4). B. Roche Cave (B). The hydro-sedimentary upstream part of the two drains is located to the south and the Bourne gorges to the north. Note the extent of accumulated sandy sediments and the location of samples dated by  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  and U/Th methods, as well as samples for mineralogical analysis (DRX).*

cupules arrondies de taille métrique sont présentes en haut de paroi dans les deux conduits (figure 2). Le conduit de Fenêtre 4 possède un gabarit inférieur (~5 m de large) à celui de grotte Roche (~14 m de large). Si Fenêtre 4 a un tracé plutôt rectiligne, le conduit de grotte Roche montre une forte sinuosité latérale [Gondras, 2009]. Une série de méandres et de puits, avec des ruissellements actifs, trépane le système et assure une connexion spéléologique entre les deux cavités étagées (figure 1B). Une zone de soutirage actif se situe au sommet du puits connectant Fenêtre 4 et grotte Roche (figure 2).

Le colmatage sédimentaire de grotte Roche se trouve au fond de la large galerie d'entrée (~15 m de diamètre), dans une zone de rétrécissement de la galerie (figure 2B et photo 1). La zone d'entrée de Fenêtre 4 est partiellement obstruée par des gélifrats et des concrétions. Une succession de paléo-marmittes, de diamètre décimétrique à métrique, est présente sur le point haut du plancher urgonien de la galerie. Ces paléo-marmittes sont scellées par des stalagmites (figure 2A). Le colmatage sédimentaire de Fenêtre 4 se trouve au fond de la cavité, en contrebas de la zone d'entrée.

## I. Méthodes

### A. Analyse 3D du réseau karstique grotte Roche-Fenêtre 4 et cartographie morpho-sédimentaire

Pour contraindre et analyser l'organisation du réseau grotte Roche-Fenêtre 4, le club des Furets jaunes de Seyssins nous a transmis les données topographiques du réseau karstique, qui ont été compilées sur le logiciel Therion afin de construire un modèle 3D. Une topographie à l'échelle métrique (DistoX2 + dessin) a été réalisée dans le conduit principal de Fenêtre 4 et dans la zone de désobstruction de grotte Roche pour représenter, en coupe et à plus fine échelle, les morphologies de ces deux conduits et leur remplissage souterrain (géométrie et extension des corps sédimentaires). Cette analyse permet de replacer les marqueurs morphologiques des conduits et les sédiments (détritiques et spéléothèmes) dans une chronologie relative lorsque les affleurements le permettent.

### B. Minéralogie et géochronologie des sédiments

Les échantillons sédimentaires analysés sont localisés sur la figure 2. Des analyses par diffraction aux rayons X ont été réalisées sur les sédiments argileux à la plateforme Géochimie-Minéralogie (ISTerre, Grenoble), en utilisant un diffractomètre Bruker D8, pour caractériser la minéralogie des dépôts [e.g. Audra, 1995].

Les phases de concrétionnement se déroulant lorsque les conduits sont abandonnés par les écoulements, les datations U-Th sur les spéléothèmes permettent non seulement de contraindre temporellement ces phases d'abandon, mais aussi d'apporter des repères chronologiques absolus (âge minimum ou maximum) sur le dépôt des sédiments alluviaux. Nous avons carotté plusieurs spéléothèmes de Fenêtre 4, pour réaliser des datations U-Th : deux stalagmites scellant les paléo-marmittes et une stalagmite qui est scellée par le remplissage sédimentaire, au fond de la cavité (photo 2). Enfin, un plancher stalagmitique a été échantillonné dans la zone

### Photo 1:

Remplissage sédimentaire de grotte Roche. La photographie est localisée sur la figure 2B. s : sable massif bien trié, n : dépôt organique noirâtre, a : dépôts argileux, g : graviers, b : dépôt non trié à galets mous, c : argile de colmatage du conduit, u : substratum urgonien, liseré noir : surfaces érosives, liseré blanc : contact entre le sommet du remplissage et le toit de calcaire urgonien. Les échantillons sont indiqués par des cercles noirs.

*Sedimentary infill in Roche Cave.*

*The photograph is localized on figure 2B.*

*s: well-sorted massive*

*sand, n: blackish organic deposit, a: clay deposits, g: gravels, b: unsorted soft-pebble deposit,*

*c: conduit clogging clay, u: Urgonian bedrock, black border: erosive surfaces, white border:*

*contact between top of the deposit and Urgonian limestone roof. Samples are indicated by*

*black circles.*



de soutirage actif (figure 2A). La purification des fractions uranium et thorium en vue des datations a été réalisée sur résine échangeuse d'ions de type U-TEVA après ajout d'un traceur artificiel ( $^{229}\text{Th}$  et  $^{236}\text{U}$ ) suivant un protocole décrit dans Pons-Branchu et al. [2022]. Les mesures des rapports isotopiques ont été réalisées sur un spectromètre de masse MC-ICPMS de type Neptune+ (Thermo Fisher) au laboratoire LSCE (Gif-sur-Yvette).

Pour déterminer l'âge d'enfouissement des sables en mesurant le rapport isotopique entre deux nucléides cosmogéniques produits *in situ*  $^{26}\text{Al}$  et  $^{10}\text{Be}$  [Granger & Muzikar, 2001], deux échantillons de sable ont été prélevés dans Fenêtre 4 et deux dans grotte Roche (figure 2). Après observation à la loupe binoculaire des sables et leur tamisage entre 125 et 800  $\mu\text{m}$ , la purification du quartz a été menée suivant le protocole physico-chimique adapté de Kohl & Nishiizumi [1992]. Après dissolution du quartz, l'extraction du  $^{26}\text{Al}$  et  $^{10}\text{Be}$  a été réalisée par chromatographie par échange d'ions [Braucher et al., 2011]. Les mesures de concentration du  $^{10}\text{Be}$  et du  $^{26}\text{Al}$  ont été réalisées sur le spectromètre de masse par accélérateur ASTER (LN2C, CEREGE, Aix-en-Provence). Le taux de production en  $^{26}\text{Al}$  et  $^{10}\text{Be}$  dans les sédiments en surface, avant leur soutirage dans le karst suit généralement un ratio de production  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  autour de 6,6 [Blard et al., 2019a]. Si la localisation géographique (altitude et latitude) affecte les taux de production absolus en  $^{26}\text{Al}$  et  $^{10}\text{Be}$  [Granger et al., 1997; Dunai, 2010], celle-ci a peu d'impact sur le ratio de production  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ . Seule une estimation de premier ordre de l'altitude est possible car la source paléo-géographique exacte des sédiments n'est

pas connue précisément. Au vu des altitudes actuelles de la zone d'alimentation probable de grotte Roche-Fenêtre 4 (bassins d'alimentation actuels de Goule Verte, Goule Bleue et Goule Blanche; figure 1C), nous avons pris une altitude moyennée à 1 000 m pour les calculs d'âge d'enfouissement. Un test de sensibilité du calcul des âges à l'altitude a été réalisé en prenant une altitude de 1 500 m, ce qui n'affecte pas significativement les âges obtenus. Les processus d'érosion ou de stockage sédimentaire en surface peuvent affecter le ratio de production. En effet, en mobilisant des roches ayant transité à quelques mètres de profondeur sous la surface, des processus d'érosion glaciaire en amont ou le stockage puis le soutirage de sédiments stockés dans des dolines peuvent apporter des sédiments au système karstique, dont le ratio de production  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  est supérieur à 6,6 [Akçar et al., 2017]. Ceci peut amener à une sous-estimation des âges d'enfouissement. Les âges d'enfouissement, basé sur le ratio  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  à 6,6 [Granger et al., 1997] et les demi-vies de désintégration à 0,72 Ma pour l' $^{26}\text{Al}$  [Granger, 2006] et 1,39 Ma pour le  $^{10}\text{Be}$  [Chmeleff et al., 2010] ont été calculés en utilisant la fonction MATLAB « *Burial.m* » explicitée dans Blard et al. [2019b].

## II. Résultats

### A. Cartographie morpho-sédimentaire

Les cupules arrondies en haut de paroi dans les galeries de grotte Roche et de Fenêtre 4 (figure 2) montrent une genèse préliminaire des conduits en régime noyé ou épinoyé. Elles indiquent également des paléo-écoulements

**Photo 2 :**

Remplissage sédimentaire et spéléothème de Fenêtre 4. La photographie est localisée sur la figure 2A. Carottage d'une colonne stalagmitique (gauche) scellée par le remplissage sédimentaire dans Fenêtre 4. st. : colonne stalagmitique, u. : substratum urgonien. L'échantillon de calcite (F4-C3, carotte illustrée à droite) est indiqué par un cercle noir sur les deux photographies. *Sedimentary infill and speleothem in Fenêtre 4.*



*The photograph is localized on figure 2A. Coring of a stalagmitic column (left) sealed by sedimentary infill in Fenêtre 4. st.: stalagmitic column, u.: Urgonian bedrock. The black circle in both photographs indicates the calcite sample (F4-C3, core illustrated on the right) on both photographs.*

en direction du nord, vers les gorges de la Bourne. La section du conduit Fenêtre 4, percée de marmites sur une dizaine de mètres de long, marque une phase d'incision par des écoulements libres, sur ce point haut du conduit. Ce seuil se termine en aval sur un escarpement d'environ 3-4 m de hauteur dont la surface urgonienne est couverte de flûtes centimétriques, marquant ainsi une ancienne chute d'eau. Le seuil est scellé par des concrétions non érodées.

Les remplissages sédimentaires détritiques des deux cavités colmatent localement les deux conduits (figure 2), cependant leur géométrie respective diffère. La hauteur du remplissage de grotte Roche est évaluée à 11 m [affleurement de la photo 1 + sondage à la tarière ; Thomas et al., 2014]. La hauteur du remplissage dans Fenêtre 4 est évaluée à environ 5 m (figure 2A). Dans grotte Roche, le colmatage se fait en amont d'un rétrécissement du conduit séparant deux volumes plus importants (figure 2B). Dans Fenêtre 4, le colmatage se trouve au point bas du drain, en contrebas du conduit, sur une section qui pourrait correspondre à un ancien siphon (figure 2A). Le remplissage sédimentaire ne se prolonge pas dans la zone de soutirage contigu, pourtant en contrebas. Nous interprétons donc ce soutirage, actuellement actif, comme postérieur au dépôt des sédiments.

**B. Les coupes sédimentaires des colmatages de grotte Roche et de Fenêtre 4**

La base du remplissage sédimentaire de grotte Roche n'est pas visible à l'affleurement. Le niveau inférieur est constitué d'un dépôt de sable massif et bien trié (photo 1). Celui-ci est surmonté d'une surface irrégulière érosive recouverte de dépôts noirâtres. Ces dépôts, probablement organiques, pourraient correspondre à des résidus de guano remaniés, ce qui attesterait d'une phase d'émersion prolongée. Cependant, des analyses complémentaires restent nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

Cette surface érosive est surmontée de dépôts argileux de couleur verte (échantillon GR-A1). Le niveau argileux est surmonté de sédiments plus grossiers, de graviers et de sables. La base du remplissage de Fenêtre 4 n'est pas visible non plus à l'affleurement. Le niveau inférieur est constitué de graviers calcaires et d'une matrice mal triée. Au-dessus, se trouvent des alternances sablo-argileuses (échantillon F4-A1) d'épaisseur irrégulière. Les figures sédimentaires soulignent un paléo-courant allant du fond de la cavité vers la sortie actuelle au nord, en direction des gorges de la Bourne. Les colmatages de Fenêtre 4 et de grotte Roche obstruent complètement les conduits et se terminent généralement par une couche d'argile au sommet du remplissage, au contact du toit de la galerie (visible sur la photo 1).

**C. Minéralogie des remplissages sédimentaires de grotte Roche et de Fenêtre 4**

L'observation des sables à la loupe binoculaire montre, pour les échantillons des deux cavités, une forte prédominance de grains de quartz, la présence de silex blancs et également de glauconie. Les résultats DRX montrent une très forte similitude entre les échantillons d'argile GR-A1 et F4-A1 (figure 3). Les analyses sur échantillon total (figure 3A) montrent, dans les deux cas, une minéralogie dominée par le quartz, une forte teneur en illite, smectite et interstratifié illite-smectite puis, en plus faible proportion, des feldspaths potassiques et plagioclases, de la chlorite et de la calcite. Les résultats sur les fractions argileuses montrent également une très forte similarité entre les deux échantillons, les spectres étant quasiment identiques (figure 3B). La fraction argileuse est dominée par un interstratifié smectite-illite, de l'illite, de la smectite, de la kaolinite et de la chlorite.

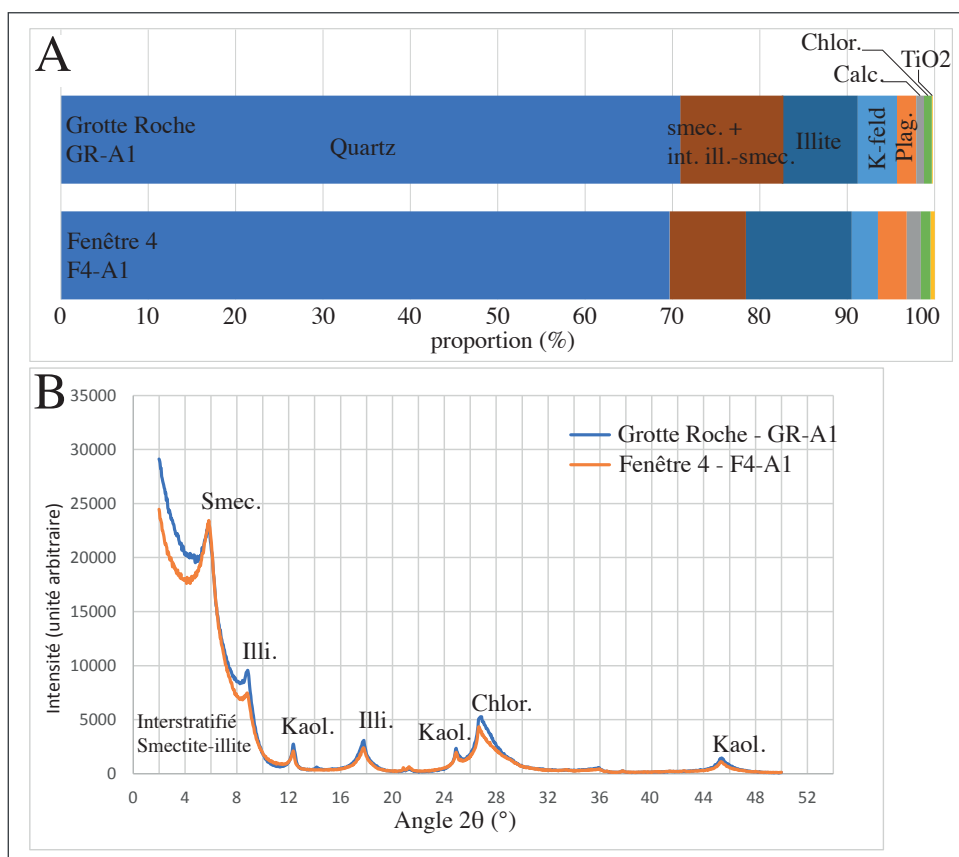
**D. Âges U-Th des concrétions**

Les résultats des analyses U-Th sont présentés dans le tableau 1. Une des deux stalagmites échantillonnées, qui scellent les marmites, a donné un âge U-Th supérieur à 450 ka (F4-C1, photo 3). La deuxième stalagmite (F4-C2) a donné un âge supérieur à 450 ka au cœur de la stalagmite, et un âge de 436 ±26 ka dans une lamine de calcite plus externe. Un âge minimum de la fin du

**Figure 3:** Résultats des analyses DRX sur les remplissages de grotte Roche (GR-A1) et de Fenêtre 4 (F4-A1).

A. Comparaison des proportions minéralogiques sur roche totale. K-feld : feldspath potassique, Plag. : plagioclase, Calc. : calcite, Chrol. : chlorite, TiO<sub>2</sub> : oxydes de titane, smec. + int. ill.-smec. : smectite + interstratifié illite-smectite. B. Comparaison des spectres DRX de la fraction argileuse des échantillons (Ill. : illite, Smec. : smectite, Chlor. : chlorite, Kaol. : kaolinite). Notez la grande similitude des compositions minéralogiques entre les remplissages de grotte Roche et de Fenêtre 4.

*Results of DRX analysis on GR and F4 infills. A. Comparison of mineralogical proportions on bulk rock. K-feld : potassium-rich feldspar, Plag. : plagioclase, Calc. : calcite, Chrol. : chlorite, TiO<sub>2</sub> : titanium oxyde, smec. + int. ill.-smec. : smectite + interstratifié illite-smectite. B. Comparison of DRX spectra of the clay fraction of the samples. Note that the mineralogical composition shows a great similarity between the GR and F4 infills.*



marmitage est donc de 450 ka. La stalagmite scellée par le remplissage détritique (F4-C3, photo 2) a donné un âge U-Th à 349 ±11 ka, correspondant à un âge maximal pour le dépôt des sédiments. Le plancher stalagmitique, dans la zone de soutirage actif, a donné un âge de 46,1 ±0,4 ka, établissant un âge minimal pour le dépôt du remplissage et pour l'initiation du soutirage.

### E. Âges d'enfouissement <sup>26</sup>Al/<sup>10</sup>Be des sables

Les mesures de concentrations en <sup>26</sup>Al et en <sup>10</sup>Be ont permis de calculer des âges d'enfouissement entre 0 et 670 ka pour Fenêtre 4 et entre 0 et 250 ka pour grotte Roche (tableau 2). Ces âges d'enfouissement sont associés à des marges d'erreur significatives. Ils sont très jeunes et donc à la limite inférieure de résolution pour cette méthode de datation qui reste plutôt adaptée à des sédiments plus anciens [Granger et al., 1997]. Les concentrations

en <sup>26</sup>Al et <sup>10</sup>Be de l'échantillon F4-S1 sont environ deux fois plus faibles que pour les trois autres échantillons, menant à une incertitude élevée sur le ratio <sup>26</sup>Al/<sup>10</sup>Be et sur l'âge d'enfouissement correspondant (± 435 ka). Le ratio de l'échantillon F4-S2 est élevé (6,8±0,45), suggérant un ratio initial pré-enfouissement des sédiments supérieur au ratio habituel de surface à 6,6 [Granger et al., 1997]. Les âges obtenus pour les deux échantillons de grotte Roche sont également associés à des erreurs analytiques importantes et donnent des âges maximums cohérents entre eux à 212 et 254 ka. Les incertitudes de

**Tableau 1:** Datations U-Th des spéléothèmes de Fenêtre 4. Les colonnes présentent les concentrations, les rapports isotopiques ( $\delta^{234}\text{U} = (^{234}\text{U}/^{238}\text{U} - 1) \cdot 1000$ ) et les âges non-corrigés et corrigés en utilisant un rapport  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  de 1,5 ±0,5 %.  $\delta^{234}\text{U}_M$  : rapport isotopique mesuré,  $\delta^{234}\text{U}_T$  : rapport isotopique initial. Voir la figure 2 pour la localisation des échantillons.

*U-Th dating results on speleothems of Fenêtre 4. The columns show concentrations, isotopic ratios ( $\delta^{234}\text{U} = (^{234}\text{U}/^{238}\text{U} - 1) \cdot 1000$ ) and ages non-corrected and corrected using a  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  ratio of 1,5 (±0,5 %).  $\delta^{234}\text{U}_M$  : measured isotopic ratio,  $\delta^{234}\text{U}_T$  : initial isotopic ratio. See figure 2 for sample locations.*

Echantillon	<sup>238</sup> U		<sup>232</sup> Th		$\delta^{234}\text{U}_M$		<sup>230</sup> Th/ <sup>238</sup> U		<sup>230</sup> Th/ <sup>232</sup> Th		Age non corrigé		$\delta^{234}\text{U}_T$		Age corrigé	
	ppm	±	ppb	±	%	±	±	±	±	±	ka	±	%	±	ka	±
F4-C1	0.20	0.002	141.84	1.14	40.24	0.85	1.07	0.006	4.55	0.03	>450		>450		>450	
F4-C2a	0.40	0.003	23.36	0.19	-4.93	0.96	0.98	0.002	51.00	0.09	>450		-21.67	4.95	>450	
F4-C2b	0.11	0.001	19.06	0.15	1.18	1.35	0.98	0.002	17.42	0.04	444	24	4.04	4.65	436	26
F4-C3	0.25	0.002	22.09	0.18	79.77	1.07	1.06	0.003	36.87	0.09	353	9	214.16	7.12	349	11
F4-C4	0.14	0.001	0.98	0.01	110.48	1.23	0.39	0.001	170.12	0.61	46	0.3	125.85	1.41	46.1	0.4

ces datations liées aux limites analytiques et aux ratios pré-enfouissement potentiellement supérieurs au ratio de 6,6, utilisé pour calculer l'âge d'enfouissement, ne permettent pas de considérer ces datations comme des âges absolus. Ces datations ne révèlent pas de diachronisme entre les dépôts de grotte Roche et Fenêtre 4. Ils montrent toutefois, un enfouissement et un dépôt des sédiments dans les deux cavités, dans une même enveloppe temporelle au Pléistocène supérieur.

### III. Discussion et conclusions

#### A. Un remplissage sédimentaire tardif déconnecté de la genèse de Fenêtre 4

Les observations morpho-stratigraphiques réalisées dans la cavité Fenêtre 4 montrent que les marques de genèse en régime (épi)noyé et les marques d'incision (marmittages) sont scellées par les stalagmites, elles-mêmes plus anciennes que le corps sédimentaire détritique. Cela montre que le dépôt des sédiments s'est fait lors d'une réactivation du conduit de Fenêtre 4 après un abandon du conduit, marqué par la phase de concrétionnement. L'âge U-Th le plus jeune obtenu sur les stalagmites, à  $349 \pm 11$  ka (F4-C3) correspond donc à un âge maximum pour le remplissage de Fenêtre 4. L'âge U-Th obtenu sur le plancher stalagmitique dans la zone de soutirage

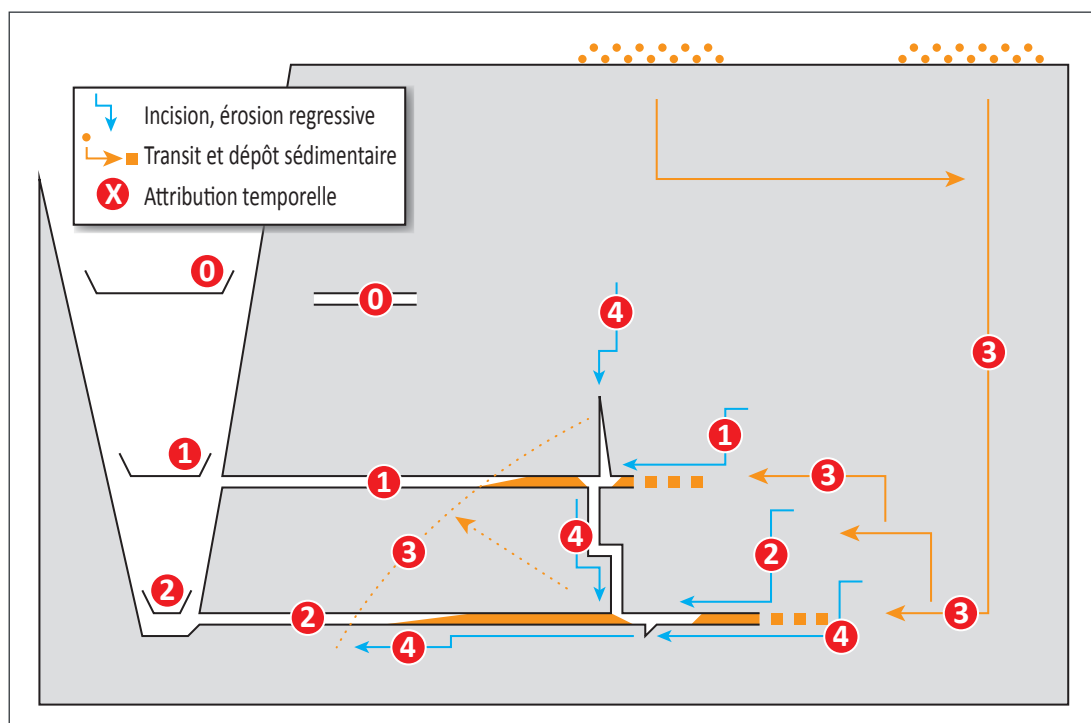
actif de Fenêtre 4, à ca. 46 ka, permet de poser un âge minimum pour le remplissage sédimentaire. Les datations U-Th permettent donc de donner un intervalle pour le dépôt des sédiments, entre  $349 \pm 11$  ka et ca. 46 ka. Cet intervalle est cohérent avec les âges d'enfouissement  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  des sédiments.

#### B. Des remplissages sédimentaires synchrones, ayant une même origine

Les analyses minéralogiques ont montré une forte similitude entre les sédiments de grotte Roche et de Fenêtre 4, appuyant l'hypothèse d'une même source sédimentaire pour les deux remplissages. Les particules sableuses sont probablement issues majoritairement de l'érosion des formations carbonatées de l'Albien et du Crétacé supérieur comme le suggère la présence de glauconie et de silex [Arnaud, 1966; Audra, 1993]. L'analyse des coupes sédimentaires a montré une similarité entre les faciès de grotte Roche et de Fenêtre 4, suggérant une même dynamique générale de dépôts. Les résultats des analyses  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  ne permettent pas de discriminer un âge plus ancien pour le corps sédimentaire le plus haut (Fenêtre 4) par rapport au plus bas (grotte Roche). Les similitudes observées en termes de minéralogie, d'âge et de faciès suggèrent ainsi que les remplissages de Fenêtre 4 et de grotte Roche pourraient correspondre à une même

**Figure 4 :** Modèle d'évolution du système karstique Fenêtre 4-Grotte Roche en lien avec l'incision des gorges de la Bourne. Le modèle conceptuel est organisé en 5 phases successives. 0 : Phase précoce, les conduits Fenêtre 4 et grotte Roche n'existent pas encore. 1 : Creusement phréatique de Fenêtre 4 associé à un niveau de la Bourne. 2 : Creusement phréatique de grotte Roche et abandon de Fenêtre 4 suite à une phase d'incision de la Bourne. 3 : Fonctionnement synchrone de Fenêtre 4 et de grotte Roche, aggradation et colmatages sédimentaires. 4 : Abandon des drains de Fenêtre 4 et de grotte Roche, verticalisation du drainage et trépanation par creusement de puits et méandres. Cette phase est toujours active.

*Evolution model of the Fenêtre 4-Grotte Roche (F4-GR) karstic system linked to the Bourne gorges incision. This conceptual model is organized into 5 successive phases. 0: Early phase, the F4 and GR conduits do not yet exist. 1: Phreatic carving of F4 corresponding to the Bourne river level at that time. 2: Phreatic carving of GR and abandonment of F4 following an incision phase of the Bourne river. 3: Synchronous functioning of F4 and GR cavities, aggradation and sediment clogging. 4: Abandonment of F4 and GR phreatic drains, verticalization of drainage and trepanning by newly formed shafts and meander. This phase is still active.*



Echantillon	Masse de Quartz g	<sup>26</sup> Al		<sup>10</sup> Be		<sup>26</sup> Al / <sup>10</sup> Be		Age d'enfouissement		Age maximum
		atome.g <sup>-1</sup>	±	atome.g <sup>-1</sup>	±	±	±	ka	±	ka
F4-S1	36	2.7E+05	5.3E+04	4.5E+04	2.5E+03	6.00	1.22	238	435	673
F4-S2	40	7.5E+05	4.3E+04	1.1E+05	3.8E+03	6.80	0.45	-72	143	71
GR-S1	39	6.9E+05	5.0E+04	1.1E+05	3.8E+03	6.47	0.52	39	173	212
GR-S2	30	5.6E+05	4.6E+04	8.7E+04	3.3E+03	6.40	0.58	63	191	254

**Tableau 2 :** Concentrations des nucléides cosmogéniques <sup>26</sup>Al et <sup>10</sup>Be et calcul des âges d'enfouissement correspondants pour les remplissages sédimentaires de Fenêtre 4 (F4-S1, F4-S2) et Grotte Roche (GR-S1, GR-S2). Les échantillons ont été spikés avec 500 µl d'une solution de Be à 998±4 µg/ml (Scharlau Be batch lot n°20427401). Les analyses des nucléides cosmogéniques ont été réalisées à ASTER (LN2C, CEREGE). Le ratio <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be du blanc chimique est 7.84 x10<sup>-15</sup> (±12 %). Le ratio <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be du blanc machine est 2.22 x10<sup>-16</sup> (±58 %). Le ratio <sup>26</sup>Al/<sup>27</sup>Al du blanc machine est 9.72 x10<sup>-16</sup> (±71 %).

*Cosmogenic <sup>26</sup>Al and <sup>10</sup>Be concentrations and calculation of corresponding burial ages for the sedimentary infills of Fenêtre 4 (F4-S1, F4-S2) and Roche Cave (GR-S1, GR-S2). The samples were spiked with 500 µl of a 998±4 µg/ml Be carrier (Scharlau Be batch lot n°20427401). Cosmogenic nuclide analyses were carried out at ASTER (CEREGE). The <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be ratio of the chemical blank is 7.84 x10<sup>-15</sup> (±12 %). The <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be ratio of the machine blank is 2.22 x10<sup>-16</sup> (±58 %). The <sup>26</sup>Al/<sup>27</sup>Al ratio of the machine blank is 9.72 x10<sup>-16</sup> (±71 %).*

phase d'aggradation sédimentaire dans le système karstique étagé. D'après les âges U-Th obtenus, nous pouvons placer cette phase d'aggradation sédimentaire entre 50 et 350 ka, entre les stades isotopiques marins MIS 3 et MIS 10. Au cours de cette phase, le drain Fenêtre 4 a été réactivé lors de mises en charge importantes, alors même que le niveau de base reste plus bas que l'exutoire de Fenêtre 4 (figure 4).

### C. Déphasage entre le modèle per-descendum et la dynamique sédimentaire

Notre étude illustre, pour le système karstique de la Bourne, la présence d'un cas de déphasage entre l'âge de creusement du drain Fenêtre 4, >450 ka d'après les âges U-Th sur les stalagmites, et l'âge du dépôt sédimentaire (50-350 ka). Sur la base de l'étagement des conduits et étant confortés par l'âge minimum de 450 ka de Fenêtre 4, nous ne remettons pas en cause le modèle d'évolution karstique *per-descendum*, et interprétons la phase de creusement de grotte Roche comme postérieure à celle de Fenêtre 4. Mais d'après nos résultats, cette phase de comblement sédimentaire interviendrait bien après et impacterait les deux drains étagés de manière synchrone.

La figure 4 propose un modèle d'évolution de ce processus *per descendum* diachrone et de comblement synchrone de drains karstiques étagés. Après un creusement initial de Fenêtre 4 en condition phréatique (étape 1), avec un niveau de la Bourne à une altitude proche de celui du conduit (environ 840 m), une phase d'incision de la rivière provoque une chute progressive du niveau de base et l'apparition d'écoulements libres (marmitage, cascade). L'abandon de la cavité par les écoulements s'accompagne ensuite d'une phase de concrétionnement initiée avant 450 ka et se déroulant au moins jusqu'à ca. 350 ka comme l'attestent les datations

U-Th (tableau 2). L'étape 2 correspond au creusement phréatique du drain de grotte Roche avec une altitude de la Bourne, quelques mètres au-dessus du lit actuel de la rivière. Cette étape est postérieure, ou synchrone, de l'abandon de Fenêtre 4. L'étape 3 correspond à la phase de sédimentation et de colmatage généralisée dans toute la partie aval du réseau karstique. Ce comblement majeur a pu être polyphasé, avec des phases de vidange partielle, comme le montrent les surfaces d'érosion dans le remplissage de grotte Roche (photo 1) et les dépôts noirâtres (potentiellement du guano marquant une surface exondée dans le remplissage). L'abandon du système Fenêtre 4- grotte Roche s'accompagne ensuite du recoupement des conduits par des écoulements libres localisés (étape 4). Ces écoulements, toujours en cours actuellement et soutirant partiellement le remplissage, étaient déjà actifs avant ca. 46 ka d'après l'âge U-Th du plancher stalagmitique dans Fenêtre 4.

### D. Colmatage complet des conduits

Les colmatages des deux conduits Fenêtre 4 et grotte Roche ont été reconnus jusqu'au toit des drains et sur une longueur de plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres (figure 2). Les joints argileux au sommet des colmatages (photo 1), au contact du toit des galeries, montrent que la fin des colmatages s'est effectuée par décantation dans l'espace résiduel entre les sédiments et le toit, jusqu'à obturation complète. Ces obturations de conduits ont nécessairement mené à une réorganisation des écoulements au sein du réseau par le creusement de nouveaux drains ou la réactivation d'anciens conduits.

### E. Contrôle du colmatage sédimentaire du système grotte Roche-Fenêtre 4

La différence de géométrie entre le corps sédimentaire de Fenêtre 4 (remplissage d'un paléo-siphon) et de celui de grotte Roche (obstruction à l'amont d'un rétrécissement du conduit) illustre le contrôle local de la géométrie des conduits sur l'aggradation sédimentaire [Lignier et al., 2012]. Toutefois, la synchronicité des deux dépôts, alors même qu'ils s'étagent sur 90 m de hauteur, nécessite d'invoquer un forçage externe et une dynamique commune à l'échelle du système karstique pour expliquer à la fois la mise en charge importante du karst et le colmatage sédimentaire des conduits. La première hypothèse envisageable qui pourrait expliquer l'aggradation sédimentaire dans grotte Roche, est un forçage « par l'aval » ; c'est-à-dire par une remontée du niveau de base (lit de la Bourne). Cette hypothèse ne peut en aucune manière être invoquée pour expliquer l'aggradation sédimentaire dans Fenêtre 4, qui est perchée 90 m au-dessus de grotte Roche et de la Bourne.

La deuxième hypothèse est un forçage « par l'amont », c'est-à-dire résultant d'un déséquilibre entre la charge sédimentaire et le débit [Soni et *al.*, 1980] qui mène à une aggradation dans le système karstique.

#### F. L'hypothèse d'un contrôle « par l'aval » de l'aggradation sédimentaire dans le système grotte Roche-Fenêtre 4

Les trois processus qui pourraient être impliqués dans une hypothétique remontée du niveau de base sont : une obturation glaciaire, un glissement de terrain/écroulement rocheux à l'aval ou une phase d'alluvionnement de la Bourne. Nous pouvons écarter la possibilité d'une obturation glaciaire de la rivière, car l'aval du système se trouve hors de l'extension des glaciers pléistocènes [Coutterand, 2010; figure 1C]. Un glissement de terrain ou écroulement rocheux est également difficilement envisageable car aucune observation de terrain ne le suggère. Enfin, la pente du lit de la rivière est trop élevée pour envisager une dynamique d'alluvionnement sur cette portion de la Bourne (pente de 6 % entre Goule Blanche et Goule Noire). En effet, par comparaison, les nombreuses terrasses alluviales déposées par la rivière au Pléistocène sur le cours aval de la Bourne, près de la confluence avec l'Isère, ont une pente bien plus faible (<1 %), similaire à la pente actuelle de la rivière dans cette zone. Nous pouvons donc conclure que cette partie amont des gorges est en incision constante au cours du Pléistocène, excluant une remontée du lit de la Bourne et donc un contrôle « par l'aval » de l'aggradation dans le système grotte Roche-Fenêtre 4.

#### G. Contrôle « par l'amont » de l'aggradation sédimentaire dans le système grotte Roche-Fenêtre 4

Par élimination, c'est donc une modification des flux entrants d'eau et de sédiments dans le système karstique qui ont provoqué une phase d'aggradation généralisée,

aboutissant au colmatage des conduits. En surface, en contexte alpin, cette dynamique est plutôt observée en période de transition climatique. Les régimes hydrologiques saisonniers contrastés et l'augmentation de la charge sédimentaire provoquent un alluvionnement le long des cours d'eau situés à l'aval des glaciers [dépôts fluvio-glaciaire, e.g. Starkel, 2003; Cordier et *al.*, 2017; Mai Yung Sen et *al.*, 2024]. Une forte surcharge sédimentaire peut également survenir au moment de la déglaciation [e.g. Rolland et *al.*, 2017]. Dans le karst, des phases d'alluvionnement endokarstique associées à des stades climatiques froids ont aussi été mises en évidence [e.g. Ballesteros et *al.*, 2023; Maire, 1990].

Sur la partie amont de la zone d'alimentation possible du système grotte Roche-Fenêtre 4 (bassins d'alimentation de Goule Verte, Goule Bleue et Goule Blanche; figure 1C), se trouve l'emprise d'un ancien glacier local pléistocène, sur le versant ouest de la Grande Moucherolle [Delannoy, 1997]. Les eaux et les sédiments issus de ce glacier ont pu alimenter le système grotte Roche-Fenêtre 4 au cours d'une période glaciaire du Pléistocène supérieur. Nous proposons donc que cette phase d'aggradation généralisée dans le système grotte Roche-Fenêtre 4 a eu lieu au cours d'un ou plusieurs stades climatiques froids pouvant se placer entre le MIS10 et le MIS4, ceci sur la base des contraintes géochronologiques obtenues dans notre étude. L'aggradation sédimentaire a dans un premier temps pu s'amorcer dans le conduit grotte Roche, ce qui a mené à une réduction de la section et donc du débit maximal possible dans ce niveau bas par obstruction du drain, provoquant la réactivation du niveau Fenêtre 4 par débordement, et menant *in fine* au colmatage du système grotte Roche-Fenêtre 4 (figure 4).

De fortes perturbations des écoulements souterrains dans les réseaux karstiques alpins ont pu avoir lieu au cours des phases froides du Quaternaire, avec des mises en charge importantes des systèmes karstiques. Cela a déjà été montré dans différents systèmes karstiques



**Photo 3** : Carottage des stalagmites F4-C1 et F4-C2 dans la grotte de Fenêtre 4. La photo est localisée sur la figure 2A. Ces échantillons scellent l'abandon de la rivière souterraine qui s'écoulait vers la Bourne.  
Coring of stalagmites F4-C1 and F4-C2 in Fenêtre 4 Cave. The location of the photograph is shown in Figure 2A. These samples seal off the abandoned underground river that flowed toward the Bourne river.



**Photo 4 :** Les gorges de la Bourne, vues vers l'amont au droit de la grotte Favot et du pont de Goule Noire. Grotte Roche et Fenêtre 4 se situent en rive gauche, 500 m en amont du pont. *Upstream view of the Bourne Gorge, opposite Favot Cave and the Goule Noire Bridge. Roche Cave and Fenêtre 4 are located on the left bank, 500 m upstream from the bridge.*

alpins grâce à la présence de dépôts fins carbonatés et varvés dans des conduits fossiles [Audra & Rochette, 1993 ; Bini *et al.*, 1998]. Ces mises en charge ont jusqu'à présent été interprétées comme dues à des obstructions glaciaires aux exutoires des réseaux (*i.e.* un contrôle « par l'aval »). Nous proposons ici, un contrôle du colmatage du système grotte Roche-Fenêtre 4, « par l'amont » et donc par des apports détritiques surabondants. Des phases d'aggradation sédimentaire généralisées dans les systèmes karstiques alpins seraient donc également possibles sans impliquer d'obturation glaciaire des exutoires mais par un contrôle hydro-sédimentaire des zones d'alimentation, ici dans le cas de la Bourne par un déséquilibre entre les flux hydro-sédimentaires à l'aval d'un glacier local et perché, et le calibre des conduits karstiques à l'exutoire, où se concentrent les écoulements.

## H. Implications pour les modèles d'incision des rivières

Ces observations et analyses sur les colmatages sédimentaires du système karstique GR-F4 nous ont permis de proposer un modèle de « congestion sédimentaire », que nous interprétons comme contrôlé climatiquement à l'amont du système. Il s'agirait d'un analogue au modèle d'aggradation fluvio-glaciaire proposé pour les rivières alpines [e.g. Mai Yung Sen *et al.*, 2024]. Le présent modèle, bien qu'élaboré à partir d'une étude locale de deux conduits étagés dans les gorges de la Bourne (photo 4), pourrait s'appliquer à d'autres systèmes karstiques en contexte paraglacière. En ce sens, il conviendrait d'être prudent quand il s'agit de calculer des taux d'incision de vallées à partir de drains souterrains étagés et de la datation de sédiments endokarstiques en contexte alpin. En effet, cet exemple montre que des phases d'aggradation sédimentaire phréatique peuvent se produire à plus de 90 m au-dessus du niveau de la rivière (niveau de base), dans des conduits fossiles et à proximité immédiate de la vallée. D'autres exemples (pyrénéens) avaient de même montré cette complexité des modalités de sédimentation souterraine en relation avec les terrasses alluviales étagées [Jaillet *et al.*, 2025].

En l'état, cette étude apporte des conclusions claires sur la modalité d'un comblement synchrone de drains étagés par ailleurs diachrones dans leur creusement. Réalisée sur deux drains séparés de moins de 100 m de dénivellation, elle montre que les modalités de creusement / comblement, même à proximité du niveau de base, sont sous la dépendance de processus connexes comme ici la dynamique climatique des apports détritiques, ponctuellement très largement supérieurs aux capacités de drainage du karst. Il conviendrait désormais de tenir compte de ce type d'observation dans l'analyse de l'étagement karstique mais surtout dans l'utilisation des sédiments détritiques et de leur datation comme marqueurs quantitatifs de cet étagement en lien avec l'incision des vallées.

## Remerciements

Ce travail a été soutenu par le LabEx OSUG-2022 (Univ. Grenoble Alps) et le programme ANR-PIA (ANR-18-MPGA- 0006). Nous remercions chaleureusement les spéléologues des Furets Jaunes de Seyssins qui nous ont partagé leurs données topographiques des grottes étudiées. Nous remercions Olivier Dutel pour la visite des travaux de désobstruction dans F4. Nous remercions Baudoin Lismonde et plus généralement, les membres du Comité départemental de Spéléologie de l'Isère, pour les discussions sur les cavités de la Bourne. Nous remercions Nouméa Boutin-Paradis (ISTerre, plateforme Geo-Thermo-Chronologie) pour l'appui précieux apporté pour la préparation des isotopes cosmogéniques, ainsi que Rachel Martin (ISTerre, équipe Minéralogie) et Bruno Lanson (ISTerre, équipe Minéralogie) pour la préparation des échantillons et les analyses DRX. Nos remerciements vont également à la plateforme analytique Panoply et à Arnaud Dapoigny (LSCE) pour son assistance pendant la mesure des isotopes U et Th. Enfin, nous remercions les deux relecteurs anonymes pour leurs remarques qui ont contribué à l'amélioration du manuscrit.

## Bibliographie

- AKÇAR N., IVY-OCHE S., ALFIMOV V., SCHLUNEGGER F., CLAUDE A., REBER R., CHRISTL M., VOCKENHUBER C., DEHNERT A., RAHN M. and SCHLÜCHTER C., 2017 - Isochron-burial dating of glaciofluvial deposits : First results from the Swiss Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42, 2414-2425.
- ARNAUD H., 1966 - Contribution à l'étude géologique des plateaux du Vercors méridional. *Trav. Lab. Géol. de Grenoble*, 42, 33-51.
- AUDRA P., 1993 - *Karsts alpins, genèse de grands réseaux souterrains : exemples, les Tennengebirge, Autriche, l'Île de Crémieu, la Chartreuse et le Vercors, France*, thèse de géographie, Univ. Joseph Fourier Grenoble I, 328 p.
- AUDRA P. et ROCHETTE P., 1993 - Premières traces de glaciations du pléistocène inférieur dans le massif des Alpes. Datation par paléomagnétisme de remplissages à la grotte Vallier (Vercors, Isère, France). *Compte Rendu de l'Académie des Sciences*, 317, Série II, 1403-1409.
- AUDRA P., 1995 - Signification des remplissages des karsts de montagne. Quelques clés à l'usage des spéléologues. *Karstologia*, 25, 13-20.
- BALLESTEROS D., FARRANT A., SAHY D., GENUITE K., BEJARANO I. and NEHME C., 2023 - Going with the flow: Sedimentary processes along karst conduits within Chalk aquifers, northern France. *Sedimentary Geology*, 452, 106422.
- BINI A., TOGNINI P. et ZUCCOLI L., 1998 - Rapport entre karst et glaciers durant les glaciations dans les vallées préalpines du sud des Alpes. *Karstologia*, 32, 7-26.
- BLARD P.-H., LUPKER M., ROUSSEAU M. and TESSON J., 2019A - Two MATLAB programs for computing paleo-elevations and burial ages from paired-cosmogenic nuclides. *Methods X*, 6, 1547-1556.
- BLARD P.-H., LUPKER M. and ROUSSEAU M., 2019b - Paired-cosmogenic nuclide paleoaltimetry. *Earth and Planetary Science Letters*, 515, 271282.
- BOURGIN A., 1941 - La Bourne et ses affluents souterrains. *Revue de Géographie Alpine*, 29, 39-89.
- BRAUCHER R., MERCHEL S., BORGOMANO J. and BOURLÈS D.L., 2011 - Production of cosmogenic radionuclides at great depth: a multi element approach. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 309 (1-2), 1-9.
- CALVET M., GUNNELL Y., DELMAS M., BRAUCHER R., JAILLET S., HÄUSELMANN P., DELUNEL R., SORRIAUX P., VALLA P.G. and AUDRA P., 2024 - Valley incision chronologies from alluvium-filled cave systems. *Earth-Science Reviews*, 258, 104963.
- CHMELEFF J., VON BLANCKENBURG F., KOSSERT K. and JAKOB D., 2010 - Determination of the  $^{10}\text{Be}$  half-life by multicollector ICP-MS and liquid scintillation counting. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268, 192-199.
- CORDIER S., ADAMSON K., DELMAS M., CALVET M. and HARMAND D., 2017 - Of ice and water: Quaternary fluvial response to glacial forcing. *Quaternary Science Reviews*, 166, 57-73.
- COUTTERAND S., 2010 - *Étude géomorphologique des flux glaciaires dans les Alpes nord-occidentales au Pléistocène récent. Du maximum de la dernière glaciation aux premières étapes de la déglaciation*. Université Savoie Mont Blanc, 472 p.
- COUTURIEUX M., 2013 - Étude de Cavité, grotte de la Fenêtre 4. UF3 du brevet d'état d'éducateur sportif option spéléologie.
- DELANNOY J.-J., 1997 - *Recherches géomorphologiques sur les massifs karstiques du Vercors et de la transversale de Ronda (Andalousie) : les apports morphogéniques du karst*, thèse de Doctorat d'État. Univ. Joseph Fourier - Grenoble 1, 678pp.
- DELANNOY J.-J., GAUCHON C., HOBLÉA F., JAILLET S., MAIRE R., PERRETTE Y., PERROUX A.-S., PLOYON E. and VANARA N., 2009 - Karst: from palaeogeographic archives to environmental indicators. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 15, 83-94.
- DUNAI T.J., 2010 - *Cosmogenic nuclides: principles, concepts and applications in the earth surface sciences*. Cambridge University Press.
- GONDRAS E., 2009 - Isère : la grotte Roche. 15 ans de... dé-remplissage ! *Spéleo magazine*, 66, 22-23.
- GRANGER D.E., KIRCHNER J.W. and FINKEL R.C., 1997 - Quaternary downcutting rate of the New River, Virginia, measured from differential decay of cosmogenic  $^{26}\text{Al}$  and  $^{10}\text{Be}$  in cave-deposited alluvium. *Geology*, 25, 107-110.
- GRANGER D.E. and MUZIKAR P.F., 2001 - Dating sediment burial with in situ-produced cosmogenic nuclides: theory, techniques, and limitations. *Earth and Planetary Science Letters*, 188, 269-281.
- GRANGER D. E., 2006 - A review of burial dating methods using  $^{26}\text{Al}$  and  $^{10}\text{Be}$ . In A. M. Alonso-Zarza & L. H. Tanner, In Situ-Produced Cosmogenic Nuclides and Quantification of Geological Processes. *Geological Society of America*.
- HÄUSELMANN P., GRANGER D.E., JEANNIN P.-Y. and LAURITZEN S.-E., 2007 - Abrupt glacial valley incision at 0.8 Ma dated from cave deposits in Switzerland. *Geology*, 35, 143-146.
- HARMAND D., ADAMSON K., RIXHON G., JAILLET S., LOSSON B., DEVOS A., HEZ G., CALVET M. and AUDRA P., 2017 - Relationships between fluvial evolution and karstification related to climatic, tectonic and eustatic forcing in temperate regions. *Quaternary Science Reviews*, 166, 38-56.
- JAILLET S., PONS-BRANCHU E., BRULHET J. and HAMELIN B., 2004 - Karstification as a geomorphological witness of river incision: example of the Marne Valley and Cousance karst system (Eastern Paris Basin). *Terra Nova*, 16, 167-172.
- JAILLET S., HONIAT C., PONS-BRANCHU E., COUCHOUD I., HOBLÉA F., RACINE T. and SPÖTL C., 2023 - Cave sediments in the Western Bauges karst: A record of Middle and Upper Pleistocene glacial advances in the French Alps. *Geomorphology*, 433, 108707.
- JAILLET S., HEZ G., CALVET M., DELMAS M., PONS-BRANCHU E. and GUNNELL Y., 2025 - Counter-intuitive links between cave genesis and subaerial stream dynamics in the Têt Valley–Lachambre network, eastern Pyrenees, France. *International Journal of Speleology*, 54(1), ijs2534.
- KOHL C. and NISHIZUMI K., 1992 - Chemical isolation of quartz for measurement of in situ-produced cosmogenic nuclides. *Geochem. Cosmochim. Acta* 56, 3583-3587.
- LIGNIER V., JAILLET S., PERROUX A.-S., THOMAS M., MALET E., DEVES G., MOREL L. and DELANNOY J.-J., 2012 - Dynamique sédimentaire et effets de site en zone noyée du karst : l'exemple du siphon de Chevaline (Grottes de Choranche, Vercors, France). *Karstologia*, 60, 23-44.
- LIPS S., 2009 - Goule Verte. *Scialet*, revue du CDS Isère, n° 38, p. 20-23.
- MAI YUNG SEN V., VALLA P.G., VAN DER BEEK P.A., LEMOT F. and CROUZET C., BROCARD G., 2024 - Paleo-valley infills record landscape response to late-Quaternary glacial/interglacial climate oscillations in the French western Alps. *Quaternary Science Reviews*, 331, 108632.
- MAI YUNG SEN V., ROLLAND Y., VALLA P. G., JAILLET S., BRUGUIER O., BIENVEIGNANT D. and ROBERT X., 2025 - Fold-and-Thrust Belt and Early Alpine Relief Recorded by Calcite U–Pb Dating of an Uplifted Paleo-Canyon (Vercors Massif, France). *Terra Nova*, <https://doi.org/10.1111/ter.12761>
- MAIRE R., 1990 - *Recherches géomorphologiques et spéléologiques sur les karsts de haute montagne : Europe, Méditerranée, Moyen-Orient, Andes, Nouvelle-Guinée*, thèse de Doctorat d'État, Université de Nice, 406 p.
- PONS-BRANCHU E., BARBARAN J., CAFFY I. DAPOIGNY A., DRUGAT L., DUMOULIN J.P., MEDINA ALCAIDE M.A., NOUET J., SANCHIDRIÁN TORTI J.L., TISNERAT-LABORDE N., JIMÉNEZ DE CISNEROS and VALLADAS H., 2022 - U-series and radiocarbon cross dating of speleothems from Nerja Cave (Spain): evidence of open system behavior. Implication for the Spanish rock Art chronology. *Quaternary Science Reviews*. 290. 107634.
- RIXHON G., 2022 - A question of time: historical overview and modern thought on quaternary dating methods to produce fluvial chronologies. *Quaternaire*, 33, 75-98.
- RIXHON G., 2023 - Deeper underground: Cosmogenic burial dating of cave-deposited alluvium to reconstruct long-term fluvial landscape evolution. *Earth-Science Reviews*, 239, 104357.
- ROLLAND Y., PETIT C., SAILLARD M., BRAUCHER R., BOURLÈS D., DARNAULT R. ... & ASTER TEAM, 2017 - Inner gorges incision history: A proxy for deglaciation? Insights from Cosmic Ray Exposure dating ( $^{10}\text{Be}$  and  $^{36}\text{Cl}$ ) of river-polished surfaces (Tinée River, SW Alps, France). *Earth and Planetary Science Letters*, 457, 271-281.
- ROUSSET P., 1982 - *Carte d'hydrogéologie du Vercors*, thèse, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 52 p.
- SIRY L., 1998 - *Détermination des limites des bassins versants karstiques entre Goule Blanche et Goule Verte dans les gorges de la Bourne (Vercors-Isère)*, mémoire de maîtrise. Univ. Joseph Fourier Grenoble I.
- SONI J.P., RANGA RAJU K.G. and GARDE R.J., 1980 - Aggradation in Streams Due to Overloading. *J. Hydr. Div.*, 106, 117-132.
- STARKEL L., 2003 - Climatically controlled terraces in uplifting mountain areas. *Quaternary Science Reviews*, 22, 2189-2198.
- THOMAS M., JAILLET S., BERTHET J., CAILHOL D., FANGET B. et HEZ G., 2014 - Analyse 3D de la conservation du remplissage détritique de la grotte Roche (Vercors, France). *Karstologia*, 64, 25-30.