



HAL
open science

French mountain karsts, markers of landscape evolutions

Stéphane Jaillet, Marc Calvet, Jean-Jacques Delannoy, Fabien Hobléa,
Richard Maire, Yves Perrette, Philippe Vernant

► To cite this version:

Stéphane Jaillet, Marc Calvet, Jean-Jacques Delannoy, Fabien Hobléa, Richard Maire, et al.. French mountain karsts, markers of landscape evolutions. *Karstologia*, 2022, 79, pp.21-34. hal-04346145

HAL Id: hal-04346145

<https://cnrs.hal.science/hal-04346145v1>

Submitted on 18 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.

Stéphane JAILLET⁽¹⁾,
Marc CALVET⁽²⁾,
Jean-Jacques
DELANNOY⁽¹⁾,
Fabien HOBLÉA⁽¹⁾,
Richard MAIRE⁽³⁾,
Yves PERRETTE⁽¹⁾ et
Philippe VERNANT⁽⁴⁾

French mountain karsts, markers of landscape evolutions

Les karsts des montagnes françaises, marqueurs des évolutions paysagères

ABSTRACT: The largest French speleological networks have been explored in the French mountains (Alps and Pyrenees). They combine considerable depths and total lengths (8 networks exceed -1000 m, 92 exceed -500m, nearly 50 networks are longer than 10 km). They present a wide morphological diversity and interest for reconstructions of the past. Through seven outstanding examples published in the last two decades, we propose here an overview of these karsts around four themes: identification of remnant high-altitude levels, cave levels, glacial heritage, and recent environmental records.

KEYWORDS: mountain karst, cave levels, dating, Alps, Pyrenees.

RÉSUMÉ : Les karsts des montagnes françaises (Alpes et Pyrénées) offrent les plus grands réseaux spéléologiques explorés depuis un siècle en France. Associant des profondeurs et des développements importants (8 réseaux dépassent -1000 m ; 92 dépassent -500 m ; près de 50 réseaux supérieurs à 10 km), ils présentent une grande diversité morphologique et d'intérêts pour les reconstitutions du passé. À travers sept exemples éloquentes publiés dans les deux dernières décennies, nous proposons ici un aperçu de ces karsts autour de quatre entrées thématiques : l'identification des hauts niveaux altitudinaux, l'étagement des drains, les héritages glaciaires et les enregistrements environnementaux récents.

MOTS-CLÉS : karst de montagne, karst étagé, datations, Alpes, Pyrénées.

Introduction

In 1899, while exploring the Trou du Glaz (Dent de Crolles, Chartreuse), E.-A. Martel stopped on a narrow shaft, but foresaw a speleogenic continuity with the Guiers Mort resurgence located 365 m below, that he explored the same year. But he did not foresee at that time that a huge density of cavities existed within the mountain with 55 km of karstic networks beneath a 2 km² plateau. 120 years later, nearly

100 caves with length exceeding 10 km are known in France. Half of them is in the mountains (29 in the French Alps and 18 in the French Pyrenees), among which, réseau Félix Trombe (117 km, massif d'Arbas), Pierre-Saint-Martin (84 km, Arres d'Anie), Alpe, Granier (respectively 72 km and 55 km, Chartreuse), Prérrouge (56 km, Bauges). During the 70's the development of the alpine speleology technics led to a rapid increase of the exploration of mountain caves, and subsequently, to major scientific advances understanding of the speleogenesis and the knowledge of the French mountains morphogenesis.

Well known for their great deepness related to the mountain uplift, most of these networks also show cave

Introduction

Lorsqu'en 1899, E.-A. Martel explore le Trou du Glaz (Dent de Crolles, Chartreuse) et s'arrête dans un puits étroit, il pressent la communication spéléologique avec la résurgence du Guiers Mort, 365 m plus bas, qu'il explore la même année. Mais il ne se doute pas que plus de 55 km de réseaux souterrains se nichent sous un plateau de moins de 2 km² : une densité de vides karstiques considérable existe sous la montagne. 120 ans plus tard, la France compte un peu moins d'une centaine de cavités dépassant les 10 km de développement spéléologique dont une moitié en contexte montagnard (29 dans les Alpes françaises, 18 dans les Pyrénées françaises). Les plus grands réseaux souterrains français sont des karsts de montagne : réseau Félix Trombe (117 km, massif d'Arbas), Pierre-Saint-Martin (84 km, Arres d'Anie), Alpe et Granier (respectivement 72 km et 55 km, Chartreuse), Prérrouge (56 km, Bauges) pour n'en citer que quelques-uns. Cette exploration spéléologique en montagne, a été le support de connaissances scientifiques majeures tant pour la spéléogenèse que pour la connaissance des évolutions morphologiques des deux chaînes de montagnes françaises.

(1) Université Savoie Mont Blanc, CNRS, EDYTEM, Pôle Montagne, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex (France). stephane.jaillet@univ-smb.fr

(2) UMR 7194 HNHP, Université de Perpignan-Via Domitia, 52 avenue Paul Alduy, 66860 Perpignan cedex (France)

(3) Laboratoire Passages, Maison des Suds, CNRS-Université Bordeaux-Montaigne (France)

(4) Laboratoire Géosciences Montpellier, CC060, Université Montpellier, Pl. Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5 (France)

patterns with several levels. Shafts and meanders connect low dipping solution conduits shaped in phreatic or epiphreatic context. These network patterns reported in the French, Swiss and Austrian Alps as well as in the Pyrenees are remarkable records of the geodynamic evolution of the mountain ranges and the intermittent incision of large valleys acting as the local base level of the karst networks. Depending on the geological and geographical contexts, the explored caves are either perched caves or caves close to the valley bottom. Most of the time, these networks result from a long speleogenic evolution that both recorded the uplift and the incision of the mountain ranges since the Neogene. Quaternary glaciers in the valleys and on the summits have also affected the karsts and sometimes generated specific underground deposits. Finally, (pre) historic human activities as well as past or more recent climate changes have been recorded by the concretion growth in mountain caves.

We illustrate the diversity and richness of the French mountains karst through 7 valuable examples of recent work. The analysis of the karstic network pattern, the study and dating of clastic sedimentary sequences or of speleothems, the effects of the climate and environment or of the human society in the karst provide invaluable information on the paleogeographic, climatic or environmental conditions that affected the French mountain ranges.

1. Old perched mountain karsts

In mountainous context, the generated karst pattern is controlled by the large altitude difference between the infiltration areas (karren, sink holes...) and the spring outlets in the valley bottoms. The zone of interaction between water infiltration areas and the bedrock, sometimes stretching over more than 1000 m of height difference, is classically divided into 4 levels from top to bottom: (i) the infiltration zone where the epikarstic aquifer develops. It is related to the pressure release of the massif and its thickness can reach 100m; (ii) the vertical transfer zone where infiltration follows vertical shafts on heights up to 1000 m (photo 1); (iii) near the base level, the horizontal transfer zone can generate long speleogenic networks; (iv) finally, upstream the spring outlets, the area of cave diving lies in the phreatic zone. Depending on the geology of the place, one or more of these levels can be missing. In mountain karst, the phreatic zone is often missing especially in karstic networks situated above impervious layers. The horizontal transfer zone is generally interpreted using 2 complementary speleogenesis models: the first one is associated to large water table rises (epiphreatic zone with roller coaster tubular passages) [Audra *et al.*, 2011, 2013] while the second one is related to an underground river with a steady riverbed slope related to the piezometric surface and associated to a controlled recharge [Gabrovšek *et al.*, 2014]. The position of the horizontal transfer zone in the karstic massif indicates a level of stability during the formation of the karst. The origin of the level of stability has then to be found in the geological history of the area.

Harmand *et al.* [2017] suggest that the incision steps of the valley are correlated with the terrace levels. Regarding higher elevations, the karst is often the only

Bien que connus pour leur développement vertical faisant le lien avec la surrection des reliefs, la plupart de ces réseaux souterrains offrent aussi des systèmes étagés remarquables. Les puits et les méandres relient alors des galeries de faible pente façonnées en régime phréatique ou épiphreatique. Cela fait de ces systèmes, connus aussi bien dans les Alpes françaises, suisses ou autrichiennes que dans les Pyrénées, de remarquables enregistreurs de l'évolution géodynamique des chaînes alpines et de l'incision saccadée des grandes vallées qui servent de niveau de base local au karst. Ces réseaux sont pour la plupart l'expression d'une longue évolution spéléogénique qui a enregistré la mise en place des chaînes, leur surrection et leur incision depuis le Néogène. Les glaciers du Quaternaire ont également marqué les karsts et sont notamment à l'origine de différents dépôts souterrains spécifiques. Enfin plus récemment, les activités humaines (pré)historiques ainsi que les modifications environnementales passées et plus récentes ont été enregistrées dans les concrétions des grottes de montagne.

À travers sept exemples éloquentes issus de travaux récents, nous proposons d'illustrer la diversité et la richesse des karsts des montagnes françaises, ainsi que des informations qui y sont contenues. L'analyse de l'agencement d'un réseau karstique, l'étude d'une séquence détritique ou d'un spéléothème et leurs calages dans les temps géologiques,



Photo 1 : The "Puits des Pirates" (328 m, gouffre d'Aphanicé, massif des Arbaïlles, Pyrénées) is a typical shaft in the vertical transfer zone in mountain areas.

Le puits des Pirates (328 m, gouffre d'Aphanicé, massif des Arbaïlles, Pyrénées) est un puits typique de la zone de transit vertical du karst en zone de montagne. Photo F. Lallier



Photo 2 : At 1 144 m asl, the "Antre de Vénus" cave (Northern Vercors) is a horizontal cavity with a length of 850 m. With its fluvial deposits, it is interpreted as one of the ponors of a vast paleo-poljé and a marker of an elevated base level of the hydrographic network during the Neogene [Delannoy et al., 1998].

À 1 144 m NGF, l'Antre de Vénus (Vercors septentrional) est une cavité horizontale de 850 m de développement. Avec ses remplissages fluviaux, elle est interprétée comme un des ponors d'un vaste paléo-poljé et témoignerait en ce sens d'un haut niveau de base du réseau hydrographique au cours du Néogène, avant la mise en place du réseau hydrographique actuel [Delannoy et al., 1998]. Photo S. Caillaud

marker of older events whose surface markers have been completely removed [Audra et al. 2006]. In Switzerland, the study of the Siebenhengste karst has shown more than 10 levels, among which the oldest are related to the Pliocene [Häuselmann et al., 2002, 2007]. Similar studies in the Alpine arc show how important the dating constraints are [Häuselmann et al., 2020] and confirm foreseen evolutions [Mugnier, 1965], especially based on morphoanalysis or identification of cave petrographic evidence linked to high level paleo-poljés for example in the Antre de Vénus (septentrional Vercors) [Delannoy et al., 1998] (photo 2). In order to illustrate our development, we will now consider the following examples : the Granier karst in the Chartreuse (Isère/Savoie) and the Coume Ouarnède karst (Haute-Garonne).

A. Granier perched karst (Chartreuse)

Mount Granier, located north of the Chartreuse high plateaus, peaks at 1933 m. Its Barremian limestone (Urgonian facies) summit surface (2,8 km²) is part of a perched syncline dipping eastward. Bounded by deep valleys and abrupt scarps, the Granier high plateau is a type example of perched karst whose current outlet, les Eparres, is controlled by a lithologic level located 700 m above the bottom of the Isère valley.

The speleogenic-karstologic integrated approach of the Granier network (77 km of shafts and passages among which 55.8 km are interconnected with 13 entrances) combines speleographical [Hobléa, 1999a], speleomorphological and sedimentological analyses. It allowed to decipher 5 levels of karstification between 1200 and 1850 m of elevation [Hobléa, 1999b], (figure 1). E3 to E5 levels provide evidence of the cold Pleistocene periods, while the more elevated E1 and E2, located between 1850 and 1630 m, are steadily dipping phreatic tubular paleo-drains crossing the Granier from side to side (tunnel caves) towards the Chambéry water gap along a paleo-drainage path [Choppy, 1994]. The 2 previous levels have fluvial sedimentary sequences showing evidence of warm climate weathering. Those sediments are covered by speleothems out of the U/Th dating range [Hobléa, 2001].

de l'environnement et des sociétés, sont autant de vecteurs d'informations sur les conditions paléogéographiques, climatiques ou environnementales qui ont marqué les montagnes françaises.

I. Des marqueurs d'évolutions perchées anciennes (néogènes)

En contexte de montagne, l'organisation du karst est commandée par la forte dénivellation entre les zones d'infiltration des eaux (lapiés, dolines...) et les points d'émergence généralement situés en fond de vallée. Sur parfois plus de 1 000 m de dénivellée, l'infiltration s'organise et il est désormais classique de séparer le karst en quatre horizons étagés : (i) la zone d'introduction où se développe un aquifère épikarstique. En lien avec la détente mécanique généralisée du massif, elle peut atteindre la centaine de mètres de dénivellée ; (ii) en dessous, organisant le drainage à la faveur de puits (photo 1) s'étend la zone de transit vertical qui peut, dans certains contextes, atteindre les 1 000 m de dénivellée ; (iii) à proximité du niveau de base, la zone de transit horizontal se traduit par des développements spéléologiques qui peuvent être importants ; (iv) enfin, souvent juste en amont des exutoires, la zone noyée est celle des explorations spéléonautiques. Selon les contextes géologiques, une ou plusieurs de ces zones peuvent faire défaut. Dans les karsts de montagne, il est assez fréquent que la zone noyée soit absente, notamment quand le système karstique est resté perché car calé sur un niveau de base lithologique imperméable. La zone de transit horizontal est désormais interprétée selon deux modèles génétiques complémentaires : le premier où la genèse est associée à d'importantes mises en charge du réseau (zone épinoyée à galeries tubulaires en montagnes russes) [Audra et al., 2011, 2013] et le second lié à une rivière souterraine à faible pente, calée sur la surface piézométrique et associée à une recharge contrôlée [Gabrovšek et al., 2014]. L'analyse de la position de la zone de transit horizontal dans le massif karstique est intéressante car elle marque un niveau de stabilité dans l'évolution du karst dont il reste ensuite à rechercher les causes dans l'histoire géologique du massif.

This pre-quaternary speleogenesis was confirmed in 2005 thanks to the Terrestrial Cosmogenic Nuclide (TCN) dating $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ [Granger et al., 2001; Häuselmann et al., 2005]. Two samples of sand located in level E2 [Hobléa et al., 2011] provided burial ages; the first sample collected in the Mégalerie du Trou Lilou at an elevation of 1705 m was buried 4,3 Ma ago, during lower Pliocene (Zanclean) (ILIL3, figure 1) while the second sample collected in the northern part of the network in the Pulsatiles de la Cuvée des Ours passage at an elevation of 1650 m was buried 3.4 Ma ago (PULS4, figure 1) during the upper Pliocene (Piacenzian). Those first alluvium burial ages in the French Alpine karst validate the hypotheses of a Neogene speleogenesis of high karstic levels earlier than (and therefore undeformed by) the Tortonian Alpine folding event. During the Neogene, the paleo-Granier was a large tabular syncline structure but not the current residual perched karst yet [Hobléa et al., 2011].

B. The Félix Trombe – Henne Morte network (Arbas Massif)

The Félix Trombe – Henne Morte network with 57 entrances and about 117 km of interconnected passages and shaft is the largest French caving system. Better known as the Coume Ouarnède by cavers, this karstic network is located on the northern side of the Central Pyrenees (figure 2). The highest entrance (la Coquille) lies at an elevation of 1448 m, and the lowest point is deeper than the Goueil di Her outlet, at 491 m [Clément and Vennarecci, 2003]. The location of the system, downstream the high crystalline Pyrenean peaks, and the network of multi-level passages developing over 1 000 m deep are ideal to apply the $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ TCN burial dating on quartz cobbles in the karstic alluvium [Granger et al., 1997]. In order to date the base level in the 900 m NGF passages, two samples of small quartz pebbles have been collected over 100 m from Pène Blanque and Commingeois entrances respectively at the altitudes of 900 m and 920 m. The obtained burial ages are 3.7 ± 0.97 Ma (Pène Blanque) and 3.16 ± 0.31 Ma (Commingeois) [Genti, 2015]. The limestone thickness above the samples collected at higher elevations is too

On sait que l'enregistrement des différents stades d'incision des vallées est souvent corréléable avec les niveaux de terrasses [Harmand et al., 2017]. Mais pour les niveaux les plus hauts, le karst est parfois le seul marqueur des phases les plus anciennes dont les témoins ont totalement disparu en surface [Audra et al., 2006]. En Suisse, les travaux réalisés sur le karst des Siebenhengste ont mis en évidence plus de 10 niveaux de karstification dont les plus anciens sont à rattacher au Pliocène sur la base de datations cosmogéniques [Häuselmann et al., 2007]. D'autres travaux similaires engagés dans l'ensemble de l'arc alpin [Häuselmann et al., 2020] soulignent la pertinence de ces calages chronologiques confirmant des évolutions anciennes déjà pressenties [Mugnier, 1965], notamment par l'analyse des formes ou par l'identification de restes pétrographiques en grotte, rattachés à de hauts niveaux de paléo-poljé : cas de l'Antre de Vénus (Vercors septentrional) [Delannoy et al., 1998] (photo 2). Deux exemples éloquentes sont ici proposés : le karst du Granier en Chartreuse (Isère/Savoie) et le karst de la Coume Ouarnède (Haute-Garonne).

A. Le karst perché du Granier (Chartreuse)

À l'extrémité nord-est des hauts plateaux de Chartreuse, le mont Granier, culminant à 1933 m, constitue un volet synclinal perché penté vers l'est, dont la surface sommitale (2,8 km²) est entièrement développée dans les calcaires barrémiens à faciès urgonien. Bordé de profondes vallées et d'escarpements vertigineux, le haut plateau du Granier constitue un archétype de karst perché, dont l'émergence actuelle, la source des Éparres, est calée sur un niveau de base lithologique 700 m au-dessus du fond de la vallée de l'Isère.

L'approche spéléo-karstologique intégrée du réseau du Granier (77 km de conduits dont 55,8 km interconnectés à partir de 13 entrées), combinant analyses spéléographiques, spéléomorphologiques et sédimentologiques, a permis de distinguer cinq niveaux étagés de karstification, entre 1850 et 1200 m d'altitude, (figure 1). Les étages E3 à E5 portent la signature des périodes froides du Pléistocène, tandis que les étages E1 et E2, les plus hauts perchés, entre 1850 m et 1630 m, sont constitués de paléo-drains phréatiques tubulaires peu inclinés, traversant le Granier de part en

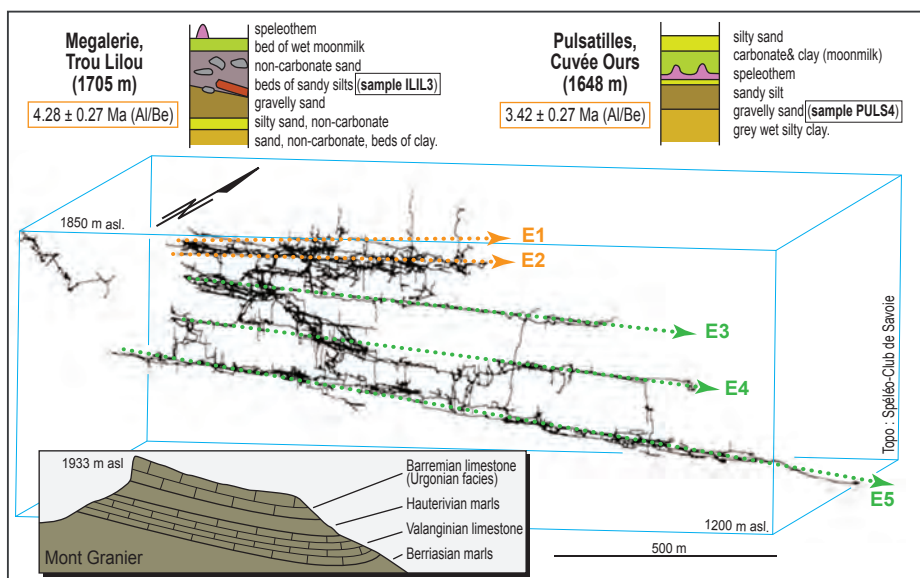


Figure 1 : Levels of underground networks in the Granier system and cosmogenic dating of the E2 level. So far, these results are the only absolute $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ datings carried out in the perched karsts of the Northern French Alps (from Hobléa et al., 2011). Étagement des réseaux souterrains dans le système du Granier et datations par la méthode cosmogénique du niveau E2. Ces résultats restent pour l'instant les seules datations absolues $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ réalisées dans les karsts perchés des Alpes françaises du Nord (d'après Hobléa et al., 2011).

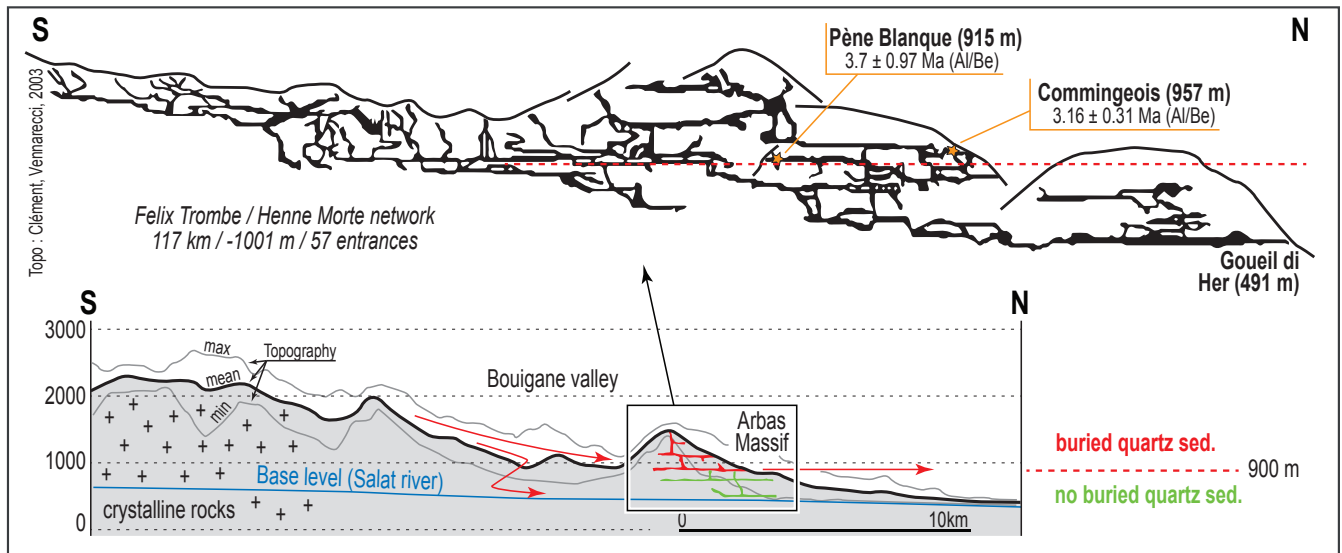


Figure 2 : Synthetic south / north section of the Arbas Massif karst showing the levels of the underground networks over a 1000 m height. Two $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ datings on quartz pebbles allowed to get an age of more than 3 Ma for the 900 m asl level. The lower levels without any allochthonous material indicate the disconnection of the crystalline catchment by the incision of the Bouigane valley (from Genti, 2015).

Coupe synthétique sud / nord du karst du Massif d'Arbas montrant l'étagement des réseaux souterrains sur 1000 m de dénivellation. Deux datations $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ entreprises sur des galets de quartz ont permis de proposer un âge de plus de 3 Ma au niveau 900 m NGF. Les niveaux inférieurs dépourvus de matériaux allochtones signent la déconnexion des amonts cristallins par l'incision de la vallée de la Bouigane (d'après Genti, 2015).

thin to estimate the burial ages accurately enough. For levels located below the 900 m elevation, no allochthonous quartz sediments have been found, even among the numerous pebbles of the Goueil di Her outlet epiphreatic passage. Therefore, the transport inside the network of previously deposited quartz pebbles in the higher levels seems unlikely. The previous observations suggest that since roughly 3 million years, the Arbas massif has been disconnected from the river flow of the crystalline peaks located south. The river capture of the watershed heads is most likely related to the westward propagation of the Bouigane river which incises the south of the Arbas massif (figure 2) [Genti, 2015]. These results constrain the river downcutting rates of the area. Depending on the elevation of the base level used (~460 m for the Ger, ~550 m for the Bouigane of ~500 m for the Goueil di Her), the average incision rate over the last 3 Ma ranges from 60 to 130 m/Ma.

These two examples, chosen from two massifs nowadays perched and disconnected from their upstream watersheds show that, for the highest network levels, the karst can be the unique record of former paleo-drainages. Moreover, their studies allow to quantify river incision rates and paleo-denudation rates. When the network levels are still connected with the valleys, the alluvium recording is then invaluable for the understanding of the river incision history.

II. Cave levels and deepening stages of the valleys

Horizontal passages distributed over several levels are particularly sought- after to analyze the river incision of mountainous valleys. The following examples _the Conflent karst in the Eastern Pyrenees and the Coulmes karst in the Vercors (Alps) illustrate such studies.

part (type grottes tunnels), selon un paléo-chemin de drainage orienté vers la cluse de Chambéry. Ces deux niveaux renferment des séquences sédimentaires d'assèchement à base fluviale porteuses de signatures d'altérations sous climat chaud, scellées par des spéléothèmes plus anciens que les limites de la méthode de datation U/Th [Hobléa, 2001]. Autant d'indices d'une spéléogénèse anté-quaternaire, qui a pu être démontrée en 2005 grâce à la méthode des isotopes cosmogéniques $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ [Granger et al., 2001 ; Häuselmann et al., 2005]. Deux échantillons de sables quartzeux prélevés dans l'étage E2 ont ainsi été datés [Hobléa et al., 2011] : l'un issu de la Mégalerie du Trou Lilou à 1 705 m d'altitude a donné un âge d'enfouissement Pliocène inférieur (Zancléen) à 4,3 Ma (ILIL3, figure 1) ; l'autre prélevé plus au nord du système, dans la galerie des Pulsatiles de la Cuvée des Ours à 1 650 m d'altitude s'est révélé également enfoui au Pliocène, mais au Plaisancien, vers 3,4 Ma (PULS4, figure 1). Cette première datation d'âge d'enfouissement d'un remplissage de karst alpin français a ainsi permis de valider les hypothèses de spéléogénèse néogène de ces hauts niveaux de galeries postérieurs à la phase tortonienne du plissement alpin qui ne les a pas déformés. Au Néogène, le paléo-Granier, vaste structure synclinale tabulaire, n'était ainsi pas encore le karst perché résiduel observable actuellement [Hobléa et al., 2011].

B. Le réseau Félix Trombe – Henne Morte (Massif d'Arbas)

Le réseau Félix Trombe – Henne Morte avec 57 entrées et environ 117 km de galeries et de puits connectés est le plus grand réseau spéléologique français. Plus connu des spéléologues sous le nom de Coume Ouarnède, ce karst est situé sur le versant nord des Pyrénées Centrales (figure 2). L'entrée la plus haute (la Coquille) s'ouvre à 1 448 m d'altitude et le point le plus bas est sous la résurgence du Goueil di Her située à 491 m [Clément and Vennarecci, 2003]. La localisation au pied des hauts massifs cristallins

A. Cave levels in the Eastern Pyrenees: the Conflent

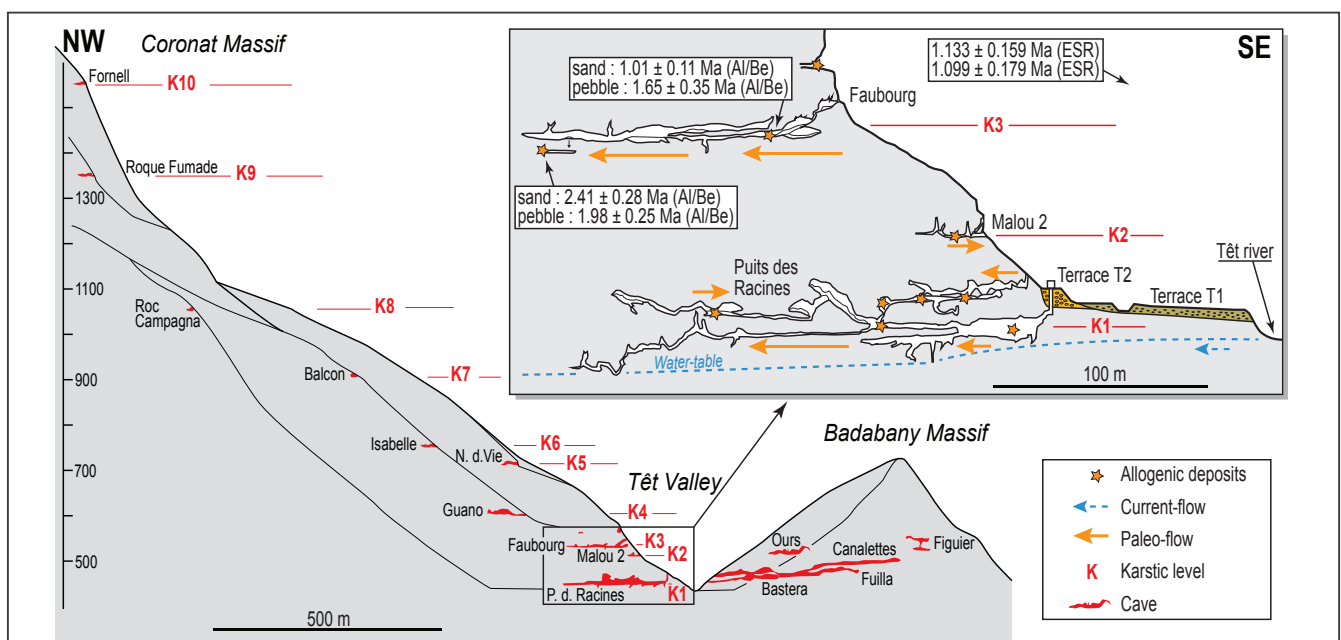
Large karst networks with up to 10 levels over a height of 500 m and sometimes more than 1 000 m are common in the Pyrenees [Calvet *et al.*, 2021 and references therein]. Among them, the karst systems of Arres d'Anie, Arbailles, Cotiella, Arbas, Tarascon syncline, the upper Aude valley and finally the Conflent which is the one presented here. The Conflent karst expands in the Devonian limestones of the Villefranche syncline, a stacking of recumbent folds and thrusts, later refolded in a synclinorium and inherited from the Hercynian tectonics. The Têt river flows in an epigenetic gorge incised in the high elevation surfaces since roughly 10 Ma [Calvet *et al.*, 2015,2019]. Quartz rich alluvium (sands and pebbles), fed by the Têt river and its southern tributaries, are reported in almost all the caves ranging between 1350 m and 400 m above sea level (figure 3). The river has formed this karst by successive self-captures and no systematic connections are known between each of the main levels either by shafts or meanders. The lower large horizontal systems with more than 70 km of passage suggest a consistent evolution model. The cave levels can be correlated to the lower terraces T1 and T2 corresponding to the last two glacial cycles (En Gornier below T1, Les Ambullas below T2, Feuilla-Canalettes correlated to T1 and maybe T2 and T3) [Hez *et al.*, 2015]; other caves (e.g., le Faubourg) are clearly associated with the highest terrace level T5 (+120 m) dated by ESR at 1.2 Ma for the

pyrénéens et les galeries étagées sur 1 000 m de verticale en font un candidat idéal pour appliquer la méthode de datation de l'âge d'enfouissement des galets de quartz par le couple d'isotopes cosmogéniques $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ [Granger *et al.*, 1997]. Afin de contraindre l'âge de l'écoulement dans le niveau de galeries vers 900 m NGF, deux échantillons de petits galets de quartz ont été collectés à plus de 100 m des entrées des grottes de Pène Blanque et des Commingeois à des altitudes respectives de 900 m et 920 m. Les âges d'enfouissement obtenus sont $3,7 \pm 0,97$ Ma (Pène Blanque) et $3,16 \pm 0,31$ Ma (Commingeois) [Genti, 2015]. Des échantillons ont été trouvés plus haut mais l'épaisseur de calcaire au-dessus des cavités n'était pas suffisante pour garantir une analyse correcte. En revanche, aucune trace de sédiments allochtones riches en quartz n'a pu être mise en évidence dans les galeries plus basses, sous la cote 900 m, même au Goueil di Her. La remobilisation des sédiments des étages supérieurs semble donc inexistante ou très limitée. Ces observations indiquent que depuis environ 3 millions d'années le massif d'Arbas est découplé des apports cristallins situés au sud. La capture de ces têtes de bassins est probablement liée à la propagation vers l'ouest de la Bouigane, vallée incisée au sud du massif d'Arbas (figure 2) [Genti, 2015]. Ces résultats apportent ainsi des éléments de contrainte pour les vitesses d'incision des réseaux hydrographiques. Suivant que l'on prend le Ger (~460 m), la Bouigane (~550 m) ou le Goueil di Her (~500 m) comme référence, on obtient des taux moyens d'incision des vallées entre 60 et 130 m/Ma.

Ces deux exemples, choisis sur deux massifs aujourd'hui perchés et dégagés de leur couverture ou déconnectés de leurs bassins amont montrent que pour ces hauts niveaux perchés, les karsts constituent parfois des enregistreurs uniques de ces paléo-circulations. Ils offrent en outre l'opportunité de contraindre les vitesses d'incision. Mais d'autres enregistrements plus riches encore sont possibles. Quand le lien entre les réseaux et les vallées est mieux conservé, l'étagement fournit alors des enregistrements inestimables. C'est le cas de l'étagement des réseaux associés à l'incision des vallées.

Figure 3: The karst levels of the Conflent is an excellent example of horizontal karstification along a valley flank. Ten levels record the incision stages of the Têt valley, even in the absence of alluvial terraces. The lowest levels have been dated and confirm the Plio-Pleistocene incision of the last 150 meters of the valley [from Hez *et al.*, 2015; Calvet *et al.*, 2019].

Le karst étagé du Conflent est un exemple éloquent de karstification horizontale en bordure de vallée. Dix niveaux enregistrent les stades d'incision de la vallée de la Têt, même en l'absence de terrasses alluviales. Les niveaux les plus bas ont pu être datés et confirmer l'incision plio-pléistocène des 150 derniers mètres de la vallée [d'après Hez *et al.*, 2015 ; Calvet *et al.*, 2019].



Villefranche site [Delmas *et al.*, 2018]. But the karstic record continues upwards and potentially documents a nearly 900m incision of the Têt valley. The speleomorphology of the passages suggests mainly watertable caves with alternation of epiphreatic regimes.

TCN burial dating ($^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$) has yet to be sorted out. The first data on the Faubourg cave suggest a low incision rate between 2 and 1 Ma in line with the T5 location. The N.D. de Vie cave at +270 m can be associated with the base level position at the end of Miocene or early Pliocene (~5 Ma) [Calvet *et al.*, 2015]. Concerning higher elevations, the expected burial ages are out of the $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ range. The $^{10}\text{Be}/^{21}\text{Ne}$ methodology, applied to lower and upper levels has led to contradictory results [Sartégou *et al.*, 2018]. This latter work shows the difficulty of the TCN burial dating method when cobble samples collected in the lower levels, next to each others in the same sedimentary sequence, result in ages ranging between 3 and 0.2 Ma. The regional context with Neogene and Quaternary sediments deposited upstream and then re-transported by the river, can lead to complex pre-burial history; this is demonstrated by the Al/Be ratio of the current river alluvium very far from the reference ratio of 6.7 [Sartégou *et al.*, 2018]. The valley incision can be documented in the karst with good reliability only between 400 m and 800 m elevations where the river incised limestones. Above 800 m, cave levels are all located on the northern valley flank (figure 3), which corresponds to the hanging wall of the Conflent half-graben, where the formation and burial history of the caves might be related to successive sedimentary cycles of the Conflent basin during Miocene [Calvet *et al.*, 2015, 2019].

B. Cave levels in the Prealps: the Coulmes massif

The Coulmes massif, located on the western edge of Vercors, has a several million year-old morphogenetic history. The oldest marker of this history is a unique topography in the Alps: a tower karst created in the vicinity of the Miocene sea that surrounded the Vercors massif then [Delannoy, 1997]. Evidence of this karstification can be found underground (level 1, figure 4). Before the incision of the hydrographic network, a long period of stability has led to poljes levels from which water was flowing into a karstic system with very few markers left (level 2, figure 4). In the area the karst grew considerably (50 km, +600 m) thanks to the incision of deep gorges (Bourne and Vernaison). Four levels of underground drainage with (epi)phreatic morphologies have been identified. Each of them is the marker of an entrenching period of the hydrographic network induced by the Alps uplift. The different levels are connected by meandering networks and shafts which are clues of the karst system adjustment and the increase of the vertical transfer as the Bourne gorges were deepening. The fourth level (level 6, figure 4) results from a combination of deepening gorges and the vicinity of the Hauterivian marls. Once the karstification reaches the marls, it cannot follow the river entrenching; thus it is no longer the marker of the hydrographic network evolution. It is then fixed by the lithologic base level. Perched above the Bourne talweg, the karstic system spreads by extending its drainage network upstream [Delannoy *et al.*, 2009]. It induces upstream cave exploration of underground rivers

II. Des karsts étagés dépendants des grandes vallées

En effet, les karsts présentant un étagement de conduits horizontaux sont particulièrement recherchés pour analyser l'incision des vallées en domaine de montagne, comme le montrent les deux exemples du karst du Conflent dans les Pyrénées orientales et du karst des Coulmes dans le Vercors (Alpes).

A. Un karst étagé pyrénéen : le Conflent

Les grands systèmes horizontaux étagés sont la règle dans les massifs karstiques pyrénéens avec jusqu'à dix niveaux reconnus, sur un dénivelé de 500 à plus de 1 000 m selon les massifs [Calvet *et al.*, 2021]. On citera ceux des Arres d'Anie, des Arbailles, du Cotiella, du massif d'Arbas, du synclinal de Tarascon, de la haute vallée de l'Aude et enfin du Conflent présenté ici. Ce karst se développe dans les calcaires dévoniens du synclinal de Villefranche structuré par la tectonique hercynienne en un empilement de plis couchés cisailés par des chevauchements et reployés tardivement en synclinorium. La Têt traverse ce synclinal par une gorge épigénique creusée en contrebas des aplanissements sommitaux depuis une dizaine de millions d'années [Calvet *et al.*, 2015]. Des alluvions siliceuses (sables et galets) sont reconnues dans pratiquement tous les réseaux étagés entre 1 350 et 400 m (figure 3). C'est le fleuve qui a généré ce karst par autocaptures successives et on ne connaît pas de relations internes systématiques entre niveaux par puits ou méandres. Les grands systèmes horizontaux inférieurs, qui totalisent plus de 70 km de galeries, fournissent un modèle évolutif cohérent. On a pu montrer leur relation avec l'étagement des plus basses terrasses alluviales T1 et T2, qui représentent les deux derniers cycles glaciaires (En Gornier sous T1, Les Ambullas sous T2, Feuilla-Canalettes associé à T1 et potentiellement à T2 et T3) [Hez *et al.*, 2015]; d'autres cavités (le Faubourg notamment) sont clairement associées au plus haut niveau de terrasse T5, vers +120 m, lequel est précisément daté sur le site de Villefranche à 1,2 Ma par ESR [Delmas *et al.*, 2018]. Mais l'enregistrement karstique se poursuit vers le haut et documente l'incision de la vallée de la Têt sur près de 900 m. Les formes des galeries indiquent un régime de type « *water table* » alternant avec des épisodes épinoyés.

La datation de ce système étagé *via* les nucléides cosmogéniques ($^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$) se heurte encore à de nombreuses incertitudes. Le réseau du Faubourg marque un long stationnement de la Têt entre 2 et 1 Ma, en très bon accord avec l'âge de la haute terrasse T5. La cavité de Notre-Dame de Vie, à +270 m, pourrait dater de la fin du Miocène ou du Pliocène inférieur (~5 Ma) [Calvet *et al.*, 2015]. Plus haut, la méthode utilisée a atteint ses limites intrinsèques et le couple ^{21}Ne et ^{10}Be a donné des résultats très contradictoires. Ces travaux [Sartégou *et al.*, 2018] ont montré les difficultés de la méthode avec parfois un même dépôt, échantillonné à quelques décimètres de distance galet par galet, livrant des âges disparates entre 3 et 0,2 Ma. Le contexte régional, riche en matériel sédimentaire néogène et quaternaire, produit des sédiments à l'histoire pré-enfouissement complexe, ce qui vient fausser les résultats. Par ailleurs, l'incision de la vallée ne peut être suivie qu'entre 800 et 400 m d'altitude, là où elle est encaissée dans les

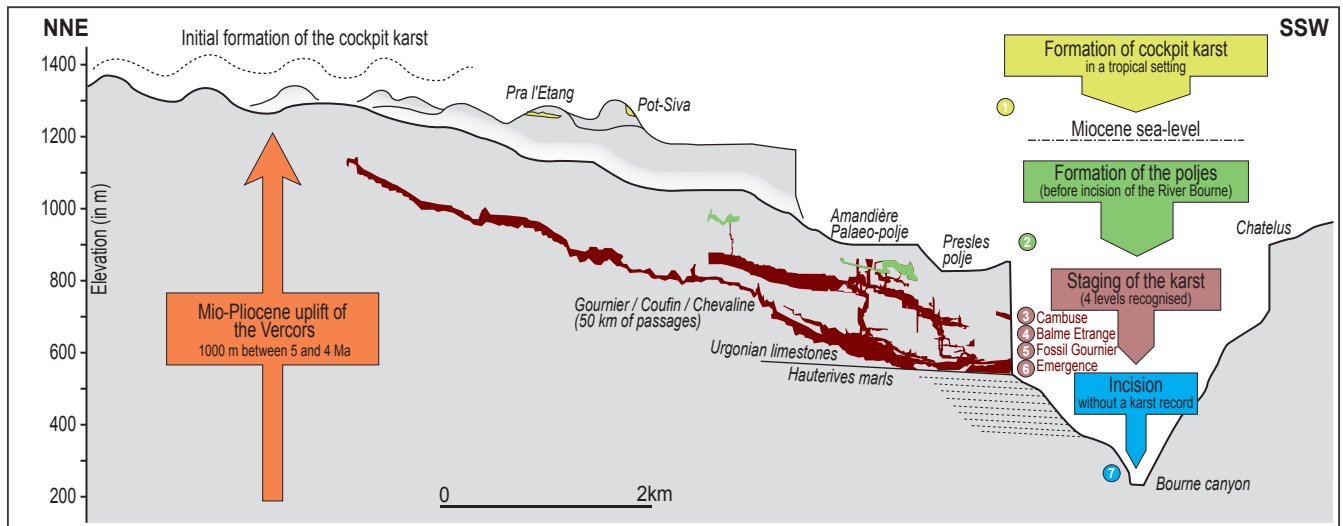


Figure 4 : The karst of Coulmes, Choranche and Gournier caves (Western Vercors) is an example of karst levels now disconnected from the evolution of the Bourne valley. The highest levels, related to the Neogene, are a cockpit karst and tunnel caves. Between 900 and 600 m asl, levels record the incision of the Bourne. It continues its incision, but the karst remains perched on the Hauterivian marls [from Delannoy, 1997, Delannoy et al., 2009].

Le karst des Coulmes, des grottes de Choranche et de Gournier (Vercors occidental) est un exemple de karst étagé aujourd'hui déconnecté de l'évolution de la vallée de la Bourne. Les niveaux les plus hauts, rapportés au Néogène subsistent sous forme d'un karst à buttes et de grottes tunnels. Entre 900 et 600 m NGF, des niveaux étagés enregistrent l'incision de la Bourne. Celle-ci poursuit son incision, mais le karst reste perché sur les marnes de l'Hauterivien [d'après Delannoy, 1997 ; Delannoy et al., 2009].

up to +600 m above the outlet (Gournier cave). This long history, with 6 drainage levels, has been preserved in the Coulmes massif by its relatively low altitude and its isolation between the Isère and Bourne valleys. Moreover, the lack of quaternary glaciers has allowed the preservation of morphogenic markers.

These two examples in the Pyrenees and the Alps enlighten the richness brought by cave levels spread over a large range of elevations. Linked to the base level, they evolve with the hydrographic network incision while recording it. Other parameters can influence the karst evolution in mountains, for example the glaciers.

III. Glacier markers in the mountain karsts

The Quaternary glaciations have produced glaciers in the Alpine and Pyrenean valleys perturbing the underground karstic flows. These repeated glacier perturbations can reactivate underground karstic flows; they can change the water level drastically and bring large volume of clastic sediments underground. Conversely, they can also progressively drain ancient alluvium and speleothems infills; hence the reactivation of karstic networks. This is well illustrated by the large passages of Niaux-Lombrives [Sorriaux, 1982, Sorriaux et al., 2016]. The karst can preserve markers of several glacial cycles while little, if any, markers remain in the valley or the glacial piedmonts. It is now accepted that glaciers are not major speleogenic agents [Lauritzen et al., 2013, Audra, 2007]. However, glacial cycles are well

calcaires. Au-dessus de 800 m, les niveaux de grottes s'étagent sur le seul versant N de la vallée (figure 3) et ont potentiellement enregistré une histoire complexe, associée aux cycles sédimentaires néogènes piégés dans le bassin du Conflent, à leur remblaiement et à leurs déblaiements successifs, au cours du Miocène inférieur et au cours du Miocène supérieur.

B. Un karst étagé des Préalpes : le massif des Coulmes

Le massif des Coulmes, sur le rebord occidental du Vercors, se caractérise par une histoire morphogénique de plusieurs millions d'années. Les plus anciens témoins sont un relief unique dans les Alpes : un karst à buttes agencé à proximité de la mer miocène qui bordait alors le Vercors [Delannoy, 1997]. On retrouve sous terre quelques témoins de cette karstification (niveau 1, figure 4). Avant l'incision généralisée du réseau hydrographique, le karst a connu une longue période de stabilité à l'origine des poljés étagés dont les eaux rejoignaient un système karstique aux témoins souterrains aujourd'hui peu nombreux (niveau 2, figure 4). C'est avec le creusement en profondes gorges du réseau hydrographique (Bourne et Vernaison) que le karst souterrain prend de l'ampleur (50 km ; + 600 m). Quatre étages de drainage souterrain, caractérisés par des morphologies (épi)noyées, ont pu être distingués. Chacun d'entre eux est le témoin d'un stade d'enfoncement du réseau hydrographique régional engendré par le soulèvement généralisé des Alpes. Ces différents étages sont reliés par des réseaux méandriformes entrecoupés de puits, expression du réajustement du système karstique et de l'accentuation du transit vertical à mesure de l'incision de la Bourne. Le quatrième niveau de drainage karstique est lié à une double cause (niveau 6 ; figure 4) : une nouvelle phase d'enfoncement des gorges et la proximité des marnes hauteriviennes. Dès lors, le karst souterrain ne peut plus se réajuster en fonction de l'incision des gorges et perd sa fonction de « témoins » de l'évolution du réseau hydrographique. Il reste définitivement bloqué sur le niveau de base lithologique. Bien que perché au-dessus du talweg de la Bourne, le système karstique continue à se développer en étendant son réseau de drainage, cette fois, vers l'amont de son impluvium [Delannoy et al., 2009]. Cela se traduit dans l'exploration spéléologique par une remontée des rivières

preserved in the karst. The two following examples clearly illustrate it: the Pierre-Saint-Martin karst (Western Pyrenees) recording several glacial cycles over more than 400 ka in its Aranzadi passage and the Bauges karst surrounding the Chéran valley infilled by the Isère glacier transfluence.

A. Aranzadi sedimentary records (Pierre Saint-Martin)

The Aranzadi dry gallery is located in the downstream part of the large Pierre Saint-Martin karstic network in Western Pyrenees. In this 300 m long and 20 m wide passage, the biggest endokarstic sedimentary records of mid-Pleistocene glacial cycles have been discovered and studied in a mountain environment [Maire, 1990; Quinif et al., 1998]. The Saint-Vincent river capture in the Devonian limestones of the Hercynian bedrock has preserved this thick sedimentary sequence (photo 3). Several unconformities show 3 sequences dated by speleothems: 1) a 5 m thickness lower unit of blocks and debris flows; 2) a main unit of fluvio-glacial sequence (10-20 m thick) composed of finely laminated silt and carbonated clay (varves, glacial flour) in connection with glacial erosion of cretaceous limestones; 3) the upper unit with 4 to 6 stepped fluvial terraces. About 40 U/Th datings (CERAK laboratory, Yves Quinif) allowed to establish the chronology. The lower unit corresponds to a colder period earlier than 330 ka (MIS 10). The second unit (varves), dated between 225 and 300 ka, is associated to MIS 8. The fluvial terraces correspond to the incision of the varves during the MIS 7 interglacial period before the river capture due to the Verna room collapse. Indeed, the lower terrace is covered with non-eroded stalagmites, the oldest one being 194 ka old, while the older Verna stalagmite (225 ka) is eroded and located on a balcony at the same altitude as the Aranzadi passage. The interval between these two ages (194 and 225 ka) shows evidence of the age of the Verna room collapse and, consequently, of the Aranzadi gallery drying up which allowed the exceptional preservation of this complex sedimentary sequence.



Photo 3 : The main varved sequence (MIS 8) of the Aranzadi Gallery with its stepped river terraces (MIS 7). Thanks to the river capture by the Verna room collapse, the deposits have been well preserved. L'ensemble principal varvé (stade 8) de la galerie Aranzadi avec ses terrasses fluviales étagées (stade 7). Aujourd'hui déconnectés par la capture de la salle de la Verna, les dépôts sont restés dans un excellent état de conservation. Cliché R. Maire.

souterraines jusqu'à + 680 m par rapport aux émergences (grotte de Gournier). Cette très longue histoire, avec ses 6 niveaux de drains, a pu être conservée dans le massif des Coulmes du fait de sa modeste altitude et de son isolat entre vallées de l'Isère et de la Bourne. L'absence de glace au Quaternaire a ici contribué à la préservation de tous ces témoins morphogéniques.

À travers ces deux exemples, pyrénéen et alpin, on mesure la richesse informationnelle qu'apporte une lecture altitudinale des karsts étagés. Sous la dépendance du niveau de base, ils accompagnent l'incision du réseau hydrographique dont ils sont de précieux enregistreurs. Mais d'autres facteurs influencent les karsts de montagne : les glaciers.

III. L'enregistrement glaciaire dans les karsts de montagne

Durant le Quaternaire, les vallées alpines et pyrénéennes ont été envahies par les glaciers impliquant une perturbation importante des circulations karstiques souterraines. Ces influences glaciaires répétées réactivent les circulations karstiques souterraines, modifient considérablement les hauteurs d'eau dans le karst et sont fréquemment associées à la pénétration sous terre d'une charge détritique importante. À l'inverse, elles sont aussi capables de déboucher progressivement des karsts anciens presque totalement colmatés par des sédiments fluviaux et des spéléothèmes, et de les réactiver, ce qui est particulièrement bien illustré par les grandes galeries de Niaux-Lombrives [Sorriaux et al., 2016]. Le karst devient alors un réceptacle parfois exceptionnel, abritant des témoins de plusieurs cycles glaciaires peu ou pas documentés dans les vallées et les piémonts glaciaires. Si on a longtemps associé une karstogenèse intense aux phases glaciaires, on admet désormais que les glaciers ne sont pas des agents spéléogénétiques majeurs [Lauritzen et al., 2013]. Les phases glaciaires sont cependant très bien enregistrées sous terre et deux exemples permettent de l'apprécier : le karst de la Pierre-Saint-Martin (Pyrénées) occupé par un glacier à plusieurs reprises et sa galerie Aranzadi enregistrant ces phases sur plus de 400 ka, et le karst des Bauges autour de la vallée du Chéran (Savoie), envahie par une transfluence du glacier de l'Isère.

A. Les remplissages d'Aranzadi (Pyrénées-Atlantiques)

La galerie Aranzadi se situe dans la partie aval du grand réseau de la Pierre Saint-Martin. Sur plus de 300 m de long, les plus importants remplissages endokarstiques d'origine glaciaire/interglaciaire connus en milieu montagnard y sont datés du Pléistocène moyen [Quinif et al., 1998]. La très bonne conservation de cette séquence hypogée (photo 3) provient de sa déconnexion du système actif par la capture de la rivière Saint-Vincent dans les cal-

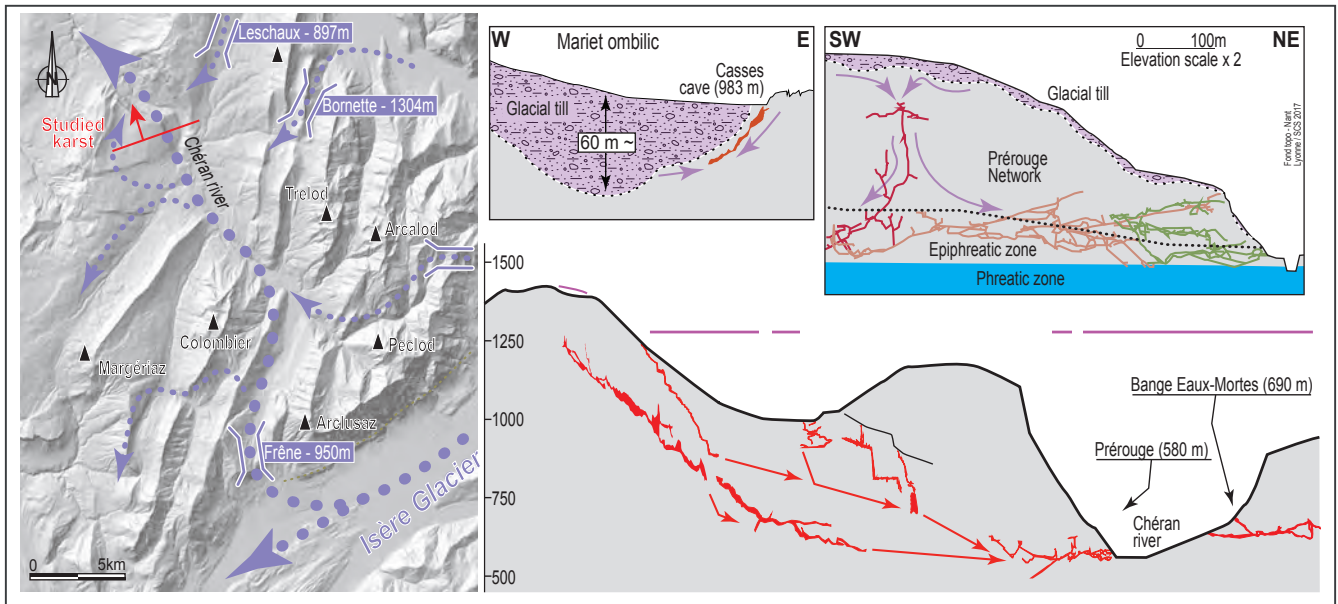


Figure 5 : Impact of the late Pleistocene glaciations in the glacial karstic networks at the edge of the Chéran valley (Prérounge Karst). The phases of glacial advance and retreat are controlled by the Frêne pass perched 700 m above the “Combe de Savoie”. They are recorded underground with fluvio-glacial clastic invasions in pro-glacial sinkholes (Trou des Casses) or at the outlet levels (Grotte de Prérounge) [Jaillet et al., 2018a and b].

Impact des glaciations fini-pléistocènes dans les réseaux karstiques juxta-glaciaires en marge de la vallée du Chéran (Karst de Prérounge). Les phases d'avancées et de retrait glaciaires sont contrôlées par le col de Frêne perché 700 m au-dessus de la Combe de Savoie. Elles sont enregistrées sous terre sous forme d'invasion détritique fluvio-glaciaire au droit de pertes pro-glaciaires (Trou des Casses) ou au niveau des exutoires (grotte de Prérounge) [Jaillet et al., 2018a et b].

B. A juxta-glacial karst: the western Bauges

The western Bauges karst (figure 5) has recorded the most recent glacial periods. During the Quaternary glacial periods, this 800km² Prealps massif was surrounded by the Isère glacier outflows. During glacial maximums, the glacier outflowed on the massif through several passes on the SE side. One of the transfluence flowed through the Frêne pass (963 m NGF) that overlooks the Savoie valley 700 m below. Most of the ice from the Isère glacier flowed through this pass and then towards the Albanais depression and then through the Chéran water gap [Coutterand, 2010]. The Prérounge karst (>50 km) spans several levels between the highest caves (1500 m NGF) and the outlet (580 m NGF). Glacial markers are reported from the lower to the upper levels and are mostly clastic fluvio-glacial sediments. However, these sediments are not everywhere in the karstic system, they are mostly concentrated in two key points: the pro-glacial sinkhole and the outlet caves (figure 5). For example, the trou des Casses cave was a juxta-glacial swallow hole on the edge of the Mariet depression, (glacio-karstic umbilicus perched at 1000 m NGF) [Jaillet et al., 2018a and b]. Some speleothems covered by fluvio-glacial deposits [Mugnier, 1965] suggest an increase of the glacial overflow after MIS 4 [Hobléa, 1999a; Jaillet et al., 2018a]. At a lower elevation, large clastic sediment volumes are

calcaires dévoniens du socle hercynien sous-jacent. La séquence présente trois ensembles détritiques discordants calés par des spéléothèmes : 1) un ensemble inférieur épais de 5 m à galets et coulées de débris surmontant des blocs de base ; 2) un ensemble principal de 10 à 20 m finement laminé à limons et argiles carbonatés correspondant à des varves à farine glaciaire issue des calcaires crétaqués ; 3) un ensemble de 4 à 6 terrasses fluviales étagées dans l'ensemble principal. Une quarantaine de datations U/Th (laboratoire CERAK, Yves Quinif) ont permis d'établir une chronologie. L'unité inférieure date d'une période froide antérieure à 330 ka BP (stade isotopique 10). L'ensemble principal varvé, qui se situe entre 225 et 300 ka BP, est attribué au stade glaciaire 8. Les terrasses fluviales ont ensuite enregistré l'incision des varves lors de l'interglaciaire du stade 7 juste avant la capture de la rivière suite à l'effondrement de la salle de la Verna. En effet, la basse terrasse est scellée par des stalagmites non corrodées dont la plus ancienne est datée à 194 ka BP. Or la plus ancienne stalagmite de la Verna (225 ka BP) est située en balcon au même niveau que la galerie Aranzadi et est corrodée par l'ancienne rivière. Ces deux dates (194-225 ka BP) encadrent donc l'assèchement brutal de la galerie Aranzadi par l'écroulement de la Verna, permettant son exceptionnelle conservation sans retouche possible par les glaciations postérieures.

B. Un karst juxta-glaciaire : les Bauges occidentales

Le karst des Bauges occidentales (figure 5) est un enregistreur de phases plus récentes. Lors des périodes froides du Quaternaire, ce massif des Préalpes françaises d'une superficie de 800 km² est ceinturé par les diffusions du glacier de l'Isère. Lors des maxima glaciaires, le glacier a pénétré dans le massif par des transfluences empruntant différents cols sur sa bordure sud-est dont le col du Frêne (983 m NGF) qui domine la Combe de Savoie de 700 m. C'est en effet par ce col que l'essentiel des glaces iséroises envahit le massif rejoignant la dépression de l'Albanais par la cluse du Chéran [Coutterand, 2010]. Le karst de Prérounge (> 50 km) est étagé entre 1 500 m NGF (points les plus hauts du système) et 580 m NGF (émergence). L'impact glaciaire y est reconnu sur toute la hauteur du

found in the downstream part of the Prérrouge cave (photo 4). Eroded then sediment covered stalagmites date these clastic sediments from MIS 3. These fluvio-glacial intra-karstic fans (CFGI) are systematically in the vicinity of the karst / glacier contacts, they plug passages with clastic sediments that present-day river flows have yet to remove. In between these two zones of preferential allochthonous sediment deposits, the passages do not show any significant glacial impact except for temporary or permanent flooding (perched sumps with speleothems MIS 5) [Jaillet *et al.*, 2018b].

The 2 previous examples illustrate the inestimable information provided by glacial endo-karstic records. Below the equilibrium line, even during the glacial maximum, water flow allowed fluvio-glacial sediment transport and deposit in the karst. Dating these events can be achieved thanks to speleothems covered by or covering clastic sediments. As the following example shows it, speleothems can also be invaluable recorders of environmental conditions.

IV. Anthropogenic recording in mountain karst

Since the last glacial period, most of the karsts in the French mountains are far from glacial dynamics. Some retreating glaciers under the present-day global warming can be found on the limestone massif of Grand Ruan (Haute-Savoie). Everywhere else, depending on the altitude, the glaciers have given way to bare rock, alpine meadows or forests; these ones started to settle during Holocene for the mid-altitude regions (Prealpine limestone massifs, northern Pyrenean foreland). The concretion growth in caves during the Holocene (present-day interglacial) has recorded vegetation evolution and the creation of new soils. Speleothems provide invaluable recording of climate change and environmental conditions, they can also

système souterrain et s'exprime essentiellement par la pénétration du matériel détritique fluvio-glaciaire au sein du karst. Cependant cette invasion n'est pas totale. Elle est reconnue essentiellement sur deux points clés du karst : les pertes pro-glaciaires et le système des exutoires (figure 5). Par exemple, en bordure de la dépression du Mariet (ombilic glacio-karstique perché à 1000 m NGF), le trou des Casses a fonctionné en perte juxtaglaciaire [Jaillet *et al.*, 2018]. Des spéléothèmes scellés par des dépôts fluvio-glaciaires [Mugnier, 1965] ont permis de montrer la recrudescence de l'invasion glaciaire après le stade isotopique 4 [Jaillet *et al.*, 2018]. Plus bas, la zone aval de la grotte de Prérrouge est aussi marquée par un important remplissage détritique (photo 4). Là encore, des stalagmites érodées et scellées permettent de rattacher ces invasions détritiques au stade isotopique 3. Chaque fois ces cônes fluvio-glaciaires intrakarstiques (CFGI) restent limités à proximité des contacts karst / glacier, créant des bouchons détritiques que les écoulements fluviaux actuels peinent encore à éliminer. Entre ces deux zones préférentielles de pénétration de matériaux allochtones, les conduits souterrains ne présentent pas d'impact significatif hormis des restes d'ennoiement temporaire ou pérenne (siphons perchés contenant des spéléothèmes MIS 5).

Ces deux exemples montrent la richesse des enregistrements endokarstiques en contexte glaciaire. En dessous de la ligne d'équilibre glaciaire, les circulations hydrologiques toujours possibles même au maximum du froid, entraînent la pénétration de matériel fluvio-glaciaire que des datations sur spéléothèmes permettent d'encadrer et de contraindre. Ces spéléothèmes constituent d'ailleurs en eux-mêmes d'excellents enregistreurs de l'environnement comme le montre l'exemple suivant.



Photo 4 : The Etiornaux underground river is a major conduit of the Prérrouge karst. It collects the water of the glacial-karst depression of Mariet and functioned for a time under glacial cover. During the deglaciation phases it must have received very important flows.

Le collecteur des Etiornaux est un drain majeur du karst de Prérrouge. Il draine l'ensemble de la dépression glacio-karstique du Mariet et a fonctionné un temps sous recouvrement glaciaire. Durant les phases de déglaciation il a dû connaître des écoulements très importants.

Photo Yann Gardère.

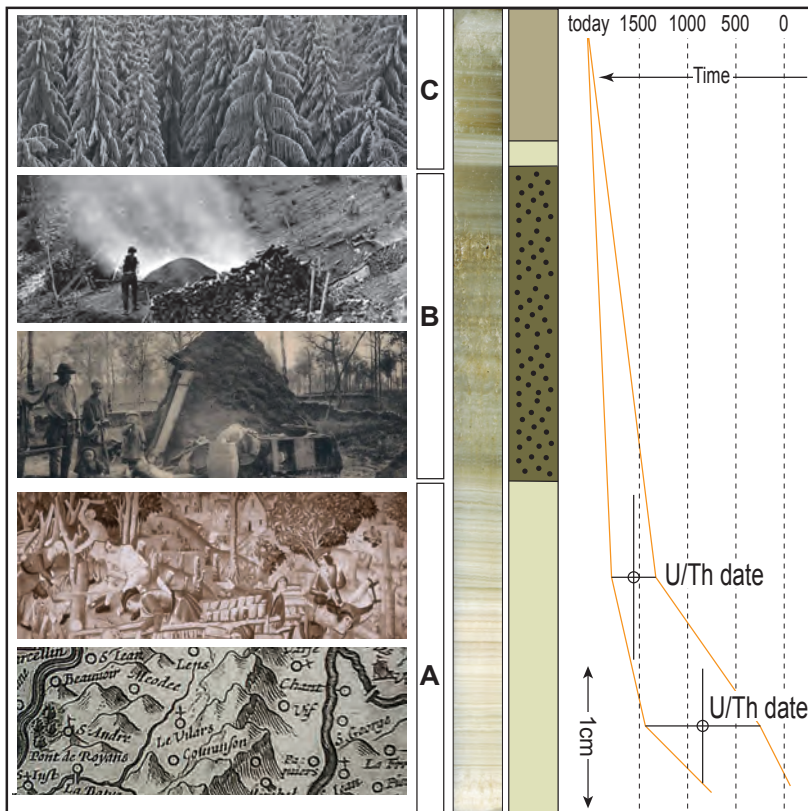


Figure 6 : High-resolution recording of the environmental trajectory of the Coulmes plateau (Western Vercors) in a stalagmite in the Choranche cave. Over 1000 years, three phases of human activity on the Coulmes are identified (from Perrette, 2000). Enregistrement haute résolution de la trajectoire environnementale du plateau des Coulmes (Vercors occidental) dans une stalagmite de la grotte de Choranche. Sur 1000 ans, trois hases de l'activité anthropique sur les Coulmes sont identifiées (d'après Perrette, 2000)

be used to decipher anthropic activities such as ancient lumbering, in the mountainous limestone ecosystems. The Choranche cave stalagmites are a demonstrative example of these studies.

Historical archives and cadastral data are the most commonly used sources to study past anthropic activities in mountainous areas. In Vercors, an important pre-industrial revolution wood charcoal activity (end of 19th century) had been reported based on archives and surface evidence (charcoal pile, former hamlets...) [Hanus, 2005]. The Choranche caves stalagmites bring additional data on this topic. Those caves are located beneath the Coulmes plateau (figure 4), known for its ancient wood charcoal industry supplying the Saint Gervais Royal foundry (1678-1873) and later, for the numerous small companies of the Isère valley. The coring of active stalagmites allowed to trace back the human and environmental history over the last 500 years (figure 6). Petrographic, florescence and reflectance analyses of the calcite [Perrette, 2000] showed 3 units: the first one (A – figure 6) is composed of opaque white calcite with fine levels less coalescent associated with wood charcoal and insoluble minerals; the second one (B – figure 6), totally different, is grey with less coalescing calcite containing numerous fragments of wood charcoal, ferro-manganic nodules and insoluble minerals; the third

IV. Un enregistrement anthropique en karst montagnard

Depuis la fin de la dernière phase glaciaire, la plupart des karsts de montagne française ne sont plus soumis aux dynamiques glaciaires. Le massif calcaire du Grand Ruan (Haute-Savoie) porte encore quelques glaciers en net retrait sous l'effet du réchauffement climatique actuel. Partout ailleurs, en fonction de l'altitude, les glaciers ont laissé place à la roche à nue, à la pelouse ou à la forêt ; celles-ci se sont installées dès l'Holocène dans les régions de moyenne altitude (massifs préalpains calcaires et retombée septentrionale des Pyrénées). Le karst souterrain a enregistré cette avancée de la végétation dans les montagnes, son développement et la mise en place de nouveaux sols. Le concrétionnement qui s'est développé dans les grottes durant tout l'Holocène (interglaciaire actuel) est l'expression de ces changements. Si les concrétions sont d'excellents enregistreurs du climat et de l'environnement, elles permettent également d'appréhender le rôle des activités anthropiques dans les écosystèmes de montagne calcaire, voire de renseigner sur la nature

des usages anciens de la forêt. Les stalagmites des grottes de Choranche sont à ce titre un exemple démonstratif.

Pour retrouver les usages anthropiques passés des zones de montagne, les archives historiques et les cadastres sont les supports les plus utilisés. Dans le Vercors, on savait que l'activité charbonnière avait été importante avant la révolution industrielle (fin XIX^e siècle) grâce aux archives et aux témoins encore visibles à la surface du massif (aménagements, anciens hameaux...) [Hanus, 2005]. Les stalagmites des grottes de Choranche offrent un support complémentaire. Ces grottes se développent sous le plateau des Coulmes (figure 4), connu pour son ancienne activité charbonnière en lien avec la Fonderie Royale de Saint Gervais (1678-1873) puis avec les nombreuses petites industries de la vallée de l'Isère. Des carottes prélevées dans des stalagmites actives ont permis de retracer l'histoire des Hommes et de l'environnement sur les 500 dernières années (figure 6). L'analyse pétrographique ainsi que de la fluorescence et de la réflectance de la calcite ont mis en avant trois ensembles. Le premier (A - figure 6) se caractérise par une calcite blanche opaque avec de fins niveaux moins coalescents et associés à des charbons de bois et des minéraux insolubles ; le deuxième ensemble (B - figure 6) a un tout autre aspect : de couleur grise, la calcite peu coalescente contient de nombreux fragments de charbons de bois ainsi que des nodules ferro-manganiques et des insolubles. La transition avec l'ensemble supérieur (C - figure 6) se fait en deux étapes : un retour à une cristallisation coalescente et une disparition de la couleur grise. L'ensemble C se caractérise par une calcite compacte et translucide. Le croisement de ces observations avec l'étude des sols du massif des Coulmes et les archives historiques disponibles a permis de relier ces trois ensembles à trois usages de la forêt : tout d'abord la pratique de l'essartage

one (C – figure 6) is a solid and translucent calcite. The transition between to the upper level from B to C has two steps, first a coalescent crystallization and then the fading of the grey color. The study of the soils of the Coulmes massif and the historical archives relate these 3 units to 3 forest activities: first the clearing stage (unit A), then an intensive wood charcoal industry (unit B) and finally back to a forested environment (unit C). U/Th dating and laminae counting indicate that speleothems are remarkable recorders of the human induced environmental changes. They are now used to study the PAH pollutions in the upper part of the karst and the resilience time of the environment exposed to ancient anthropic activities [Perrette *et al.*, 2008]. This type of retro-observations are precious to estimate the future effects of the present-day pollutions of the karst resources.

Conclusions

Through these 7 examples chosen among the French mountainous (Alps and Pyrenees) karsts, we have tried to show the diversity of the recordings provided by speleomorphology and karstic sediments. These examples have been sorted according to 4 entries/criteria: perched paleo-drainages, cave levels, glacial recordings, and recent human activities. The studies were allowed by the exceptional preservation of natural archives inside caves. Indeed, sheltered from the external processes, morphologies and sediments are well preserved while external markers have sometimes disappeared. These studies were also made possible by decades of speleological explorations and hundreds of kilometers of karstic networks documented [Maire, 1994]. That proves the importance of the speleological knowledge which feeds the karstological one. Combining length, verticality, low temperature and sometimes narrow

(ensemble A), puis une intense activité charbonnière (ensemble B) et enfin le retour à un environnement forestier (ensemble C). Les observations et analyses associées à des datations (U/Th et comptage des lamines) indiquent que les spéléothèmes sont de remarquables enregistreurs des changements environnementaux induits par les activités humaines. Ils sont aujourd'hui également utilisés pour mettre en évidence les pollutions par les HAP dans la zone superficielle du karst et les temps de résilience de l'environnement face aux anciens usages anthropiques [Perrette *et al.*, 2008]. Ce travail de rétro-observation est précieux pour mesurer les effets des pollutions actuelles sur les ressources karstiques à venir.

Conclusion

À travers sept exemples choisis dans les karsts des montagnes françaises (Alpes et Pyrénées), nous avons voulu souligner la diversité des enregistrements inscrits dans les formes et les dépôts souterrains. Quatre entrées thématiques ont été mobilisées : les paléo-circulations perchées, l'étagement des drains, les héritages glaciaires et l'enregistrement des activités humaines récentes. Ce qui a permis la lecture de ces enregistrements souterrains, c'est d'abord la qualité exceptionnelle de la conservation des archives naturelles en grotte. En effet, déconnectés des influences externes, les formes et les dépôts sont conservés alors qu'à l'extérieur les témoins ont parfois disparu. Mais ce qui a permis ces recherches, c'est aussi le fruit des explorations spéléologiques qui au cours des décennies ont permis la découverte et le recensement de centaines de kilomètres de réseaux souterrains [Maire, 1994]. C'est bien la connaissance spéléologique qui prévaut et nourrit ici une connaissance karstologique.

Associant longueur, verticalité, température basse et conduits parfois étroits, l'exploration âpre des réseaux souterrains de montagne n'a été possible que par la pratique d'une spéléologie toujours plus collective. Les deux

Photo 5 : Speleological exploration constantly renews the knowledge of mountain karsts. Here the fluvial deposits of the paleocollector of the Spéléonautes in the Chuats network (42 km), discovered and explored in the last 10 years, bring new insights on the paleo-drainages and the disappearance of the heads of the watersheds of the Southern Vercors. Photo Jeff Wade.

L'exploration spéléologique est une activité qui sans cesse renouvelle la connaissance des karsts de montagne. Ici les dépôts fluviaux du paléo-collecteur des Spéléonautes dans le réseau des Chuats (42 km) découvert et exploré dans la dernière décennie, permettent de rediscuter les paléo-circulations et la disparition des têtes de bassins versants du Vercors méridional. Photo Jeff Wade



passages, the harsh exploration of mountainous karstic network has been possible thanks to a speleology always more joint and shared. During the last two decades a positive evolution has led to more shared exploration, better documented, and published. The recent explorations of the Chuats network (southern Vercors) with more than 42 km discovered in a decade by numerous cavers have illustrated how efficient the open caving approach can be and can produce new datasets (photo 5). This exploration caving, true citizen science of cave karstology, brought and continue to bring invaluable datasets whose study has just begun. Lets hope that the next decades will provide as many explorations and discoveries and as much exciting scientific studies.

dernières décennies ont montré une évolution positive dans ces explorations toujours mieux partagées, toujours mieux documentées et toujours mieux publiées. Les explorations récentes du réseau des Chuats (Vercors méridional) avec plus de 42 km explorés en une décennie par des dizaines de spéléologues différents ont montré l'efficacité de cette spéléologie ouverte, efficace et à l'origine de nouvelles données de terrain (photo 5). Cette spéléologie d'exploration, véritable science participative de la karstologie en grotte, a fourni et fournit encore un corpus de données inégalées dont l'étude n'est finalement qu'amorcée. Gageons que les décennies à venir produiront encore de telles explorations, de telles découvertes et autant de recherches scientifiques passionnantes.

Bibliography / Bibliographie

- AUDRA P., BINI A., GABROVŠEK F., HÄUSELMANN P., HOBLÉA F., JEANNIN P.-Y., KUNAUER J., MONBARON M., ŠUŠTERŠIČ F., TOGNINI P., TRIMMEL H. and WILDBERGER A., 2006** - Cave genesis in the Alps between the Miocene and today: a review. *Zeitschrift für Geomorphologie*, t. 50, n° 2, 153-176.
- AUDRA P. and PALMER A.N., 2011** - The pattern of caves: controls of epigenic speleogenesis. *Geomorphologie : relief, processus, environnement*, vol n°17, Nouveaux paradigmes de la karstologie, mise en perspective, n°4, 359-378.
- AUDRA P. and PALMER A.N., 2013** - The vertical dimension of karst - controls of vertical cave pattern. In: Shroder Jr. and J., Frumkin, A. (Eds.), *Treatise on Geomorphology*, vol. 6. Academic Press, San Diego, CA, 186-206.
- CALVET M., GUNNELL Y., BRAUCHER R., HEZ G., BOURLÈS D., GUILLOU V., DELMAS M. and ASTER TEAM, 2015** - Cave levels as proxies for measuring post-orogenic uplift: evidence from cosmogenic dating of alluvium-filled-cave in the French Pyrenees. *Geomorphology* 246, 617-633.
- CALVET M., GUNNELL Y. and LAUMONIER B., 2021** - Denudation history and palaeogeography of the Pyrenees and their peripheral basins: an 84-million-year geomorphological perspective. *Earth-Science Reviews*, vol. 215, 71 p.
- CLÉMENT S. et VENNARECCI P., 2003** - Réseau Félix Trombe – Henne Morte. Massif d'Arbas – Pyrénées Centrales. Synthèse Topo Explo du Karst d'Arbas, CDS 31, 352 p.
- 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. Thèse, Université de Savoie, Chambéry, 468 p.
- DELANNOY J.-J., 1997** - Recherches géomorphologiques sur les massifs karstiques du Vercors et de la transversale de Ronda (Andalousie) : les apports morphogéniques du karst. Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 678 p.
- DELANNOY J.-J. et CAILLAULT S., 1998** - Les apports de l'endokarst dans la reconstitution morphogénique d'un karst. Exemple de l'Antre de Vénus (Vercors, France). *Karstologia* n°31, 27-41.
- 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. *Geomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 15 n°2, 83-94.
- DELMAS M., CALVET M., GUNNELL Y., VOINCHET P., MANEL C., BRAUCHER R., TISSOUX H., BAHAIN J.J., PERRENOUD C., SAOS T. and ASTER TEAM, 2018** - Terrestrial ¹⁰Be and Electron Spin Resonance dating of fluvial terraces quantifies Quaternary tectonic uplift gradients in the eastern Pyrenees. *Quat. Sci. Rev.*, 193, 188-211.
- GABROVŠEK F., HÄUSELMANN P. and AUDRA P., 2014** - Looping caves 'versus' water table caves': The role of base-level changes and recharge variations in cave development. *Geomorphology* n°204, 683-691.
- GENTI M., 2015** - Impact des processus de surface sur la déformation actuelle des Pyrénées et des Alpes. Thèse de doctorat en Géosciences, Univ. Montpellier, 255 p.
- GRANGER D.E., KIRCHNER J.X. and FINKEL R.C., 1997** - Quaternary downcutting rate of the New River, Virginia, measured from differential decay of cosmogenic ²⁶Al and ¹⁰Be in cave-deposited alluvium. *Geology* 25, 107-110.
- GRANGER D.E., FABEL D. and PALMER A.N., 2001** - Pliocene-Pleistocene incision of the Green River, Kentucky, determined from radioactive decay of cosmogenic ²⁶Al and ¹⁰Be in Mammoth Cave sediments. *GSA Bulletin* 113-7, 825-836.
- HANUS P., 2005** - L'appel des Coulmes, *Le Monde alpin et rhodanien*, vol. 33, n°1-4.
- HARMAND D., ADAMSON K. 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.
- HÄUSELMANN P. and GRANGER D.E., 2005** - Dating of caves by cosmogenic nuclides: Method, possibilities, and the Siebenhengste example (Switzerland). *Acta Carsologica* 34-1, 43-50.
- 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 (2), 143-146.
- HÄUSELMANN P., PLAN L., POINTNER P. and FIEBIG M., 2020** - Cosmogenic nuclide dating of cave sediments in the Eastern Alps and implications for erosion rates. *International Journal of Speleology*, 49 (2), 107-118.
- HEZ G., JAILLET S., CALVET M. et DELANNOY J.-J., 2015** - Un enregistreur exceptionnel de l'incision de la vallée de la Têt : le karst de Villefranche, Pyrénées-orientales. France. *Karstologia* 65, 9-32.
- HOBLÉA F., 2001** - Genesis of the karstic network of the Mount Granier (Chartreuse, Northwest prealps, France). In Häuselmann P., Monbaron M. (Eds.) *Cave Genesis in the Alpine Belt*. UKPIK 10, Institut de Géographie de l'Université de Fribourg (Suisse), Fribourg, 29-40.
- HOBLÉA F., HÄUSELMANN P. and KUBIK P., 2011** - Cosmogenic nuclide dating of cave deposits of Mount Granier (Hauts de Chartreuse Nature Reserve, France): morphogenic and palaeogeographical implications. *Geomorphologie : relief, processus, environnement*, 2011, n° 4. 57-68.
- JAILLET S., PONS-BRANCHU E., HOBLÉA F., BERTHET J., DELINE P., DUVILLARD P.A. et GÉNUITE K., 2018** - La dépression glacio-karstique du Mariet (Bauges occidentales, France) : un marqueur de l'englacement würmien des Alpes françaises du Nord. *Geomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. n° 24, 2, 107-120.
- LAURITZEN S.E. and SKOGLUND R.Ø., 2013** - Glacier ice-contact speleogenesis in marble stripe karst. In: Shroeder, J. (Editor in Chief), Frumkin, A. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, CA, vol. 6, Karst Geomorphology, 363-396.
- MAIRE R., 1994** - Point de vue sur l'évolution récente de la spéléologie. Conséquences sur l'exploration et la recherche scientifique. *Karstologia* n°24, 1-12
- MUGNIER C., 1965** - Les karstifications antépliocènes et plioquaternaires dans les Bauges, la Chartreuse septentrionale et les chaînons jurassiens voisins (Savoie, Haute-Savoie, Isère). *Annales de Spéléologie*, t. XX, fasc. 1- 2, FFS, Paris, 74 p.
- PERRETTE Y., POULENARD J., SABER A.-I., FANGET B., GUITTONNEAU S., GHALEB B. and GARAUDEE S., 2008** - Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in stalagmites: Occurrence and use for analyzing past environments, *Chemical Geology*, vol. 251, n°1-4, p. 67-76.
- QUINIF Y. and MAIRE R., 1998** - Pleistocene Deposits in Pierre Saint-Martin Cave, French Pyrenees. *Quaternary Research* 49, 37-50.
- SARTÉGOU A., BOURLÈS D.L., BLARD P.H., BRAUCHER R., TIBARI B., ZIMMERMANN L., LEANNI L., AUMAÎTRE G. and KEDDADOUCHE K., 2018** - Deciphering landscape evolution with karstic networks: a Pyrenean case study. *Quat. Geochron.* 43, 12-29.
- SORRIAUX P., DELMAS M., CALVET M., GUNNELL Y., DURAND N. et PONS-BRANCHU E., 2016** - Relations entre karst et glaciers depuis 450 ka dans les grottes de Niaux-Lombrives-Sabart (Pyrénées ariégeoises). Nouvelles datations U/Th dans la grotte de Niaux. *Karstologia* 67 Karst 2018, 3-16.