



HAL
open science

Des concrétions fuligineuses en contextes archéologiques : quel potentiel informatif ?

Ségolène Vandavelde, Dominique Genty, Jacques Élie Brochier, Christophe Petit, Ludovic Slimak

► To cite this version:

Ségolène Vandavelde, Dominique Genty, Jacques Élie Brochier, Christophe Petit, Ludovic Slimak. Des concrétions fuligineuses en contextes archéologiques : quel potentiel informatif?. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2020, numéro spécial "géomorphologie et environnements karstiques", 26 (4), pp.241-254. 10.4000/geomorphologie.14981 . hal-03093051

HAL Id: hal-03093051

<https://hal.science/hal-03093051>

Submitted on 4 Jan 2022

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.

Des concrétions fuligineuses en contextes archéologiques : quel potentiel informatif ? *Sooty concretions in archaeological contexts: what informative potential?*

Ségolène Vandeveldel^{a*}, Dominique Genty^b, Jacques É. Brochier^c, Christophe Petit^a, Ludovic Slimak^d

^aUniversité Paris 1 – Panthéon-Sorbonne, UMR7041 ArScAn, Equipe Archéologies Environnementales, MSH Mondes, 21, allée de l'Université, 92023 Nanterre Cedex, France

^bEnvironnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC), Université de Bordeaux, Site de Talence – Bat B18N, Allée Geoffroy Saint-Hilaire, CS 50023, 33615 Pessac Cedex, France

^cAix-Marseille Université, CNRS, Minist Culture, LAMPEA UMR 7269, MMSH, 5, rue du Château de l'horloge, BP 647,13094 Aix-en-Provence, France

^dUMR 5608 CNRS, TRACES, Université Toulouse Jean-Jaurès, Maison de la Recherche, 5, allée Antonio Machado, 31058 Toulouse Cedex 9, France

RÉSUMÉ

Les spéléothèmes (concrétions carbonatées de grottes) sont des archives naturelles qui se caractérisent par leur capacité à enregistrer les environnements passés ainsi que par leur haute résolution temporelle, en particulier lorsqu'ils sont laminés annuellement. Leur potentiel d'étude ne se limite pas qu'aux recherches sur les reconstitutions paléo-climatiques. Les concrétions peuvent par exemple piéger des particules anthropiques comme de la suie, et ces concrétions fuligineuses ont un fort potentiel informatif en archéologie. Dans cet article, nous présenterons les potentiels d'application archéologique de l'analyse fuliginochronologique à travers plusieurs cas, dans des contextes temporels différents. Les cas les plus récents (en Belgique, en France et en Slovénie), pour lesquels nous disposons parfois d'informations historiques et textuelles autorisant un contrôle des faits archéologiques enregistrés, permettront de valider le potentiel d'archive micro-chronologique des spéléothèmes dans le cadre d'une étude fuliginochronologique. Ensuite, nous étendrons l'utilisation de cette méthode à un site paléolithique français afin de mettre en lumière le potentiel informatif de cette approche en préhistoire.

Mots-clés : spéléothèmes, karst, archéologie, suie, préhistoire, périodes historiques.

ABSTRACT

Speleothems (carbonated cave deposits) are natural archives that are characterized by their ability to record past environments as well as by their high temporal resolution, especially when laminated annually. Their potential for study is not limited to research on palaeo-climatic reconstructions. For example, speleothems can trap anthropogenic particles such as soot, and these fuliginous speleothems have a high informative potential in archaeology. In this paper, we will present the potential archaeological applications of fuliginochronological analysis in several cases, in different temporal contexts. The most recent cases (Belgium, France and Slovenia), for which we sometimes have historical and textual information allowing us to check the recorded archaeological facts, will make it possible to validate the micro-chronological archival potential of speleothems in the context of a fuliginochronological study. Then, we will extend the use of this method to a French Palaeolithic site in order to highlight the informative potential of this approach in Prehistory.

Keywords: speleothems, karst, archaeology, prehistory, historical times.

INFORMATION SUR L'ARTICLE

Reçu le 04 juin 2020

Reçu sous sa forme révisée le 08 octobre 2020

Définitivement accepté le 09 novembre 2020

*Auteur correspondant.

Courriel : segolene.vandeveldel@univ-paris1.fr
(S. Vandeveldel)

1. Introduction

Les spéléothèmes, qui se développent en contexte karstique, sont des archives présentant potentiellement de longs enregistrements chronologiques ; lorsque ces concrétions sont laminées, l'enregistrement se fait avec une très haute résolution temporelle, parfois annuelle. Leur potentiel d'étude ne se limite pas aux reconstitutions paléo-environnementales ; les concrétions peuvent également être considérées comme des objets d'étude de l'archéologie lorsqu'elles piègent des particules anthropiques, comme des pigments utilisés dans la réalisation d'art pariétal, des particules charbonneuses, ou de la suie (Genty et al., 1997b ; Perrette et al., 1997, 2008 ; Bonneau

et al., 2011 ; Vandeveldel et al., 2017, 2018b ; Vandeveldel, 2019).

La fuliginochronologie, du latin *fuligo*, *fuliginosus* : suie, fuligineux-se, est une méthode qui consiste à étudier la succession des dépôts de suie piégés dans une matrice (Vandeveldel et al., 2018b) ; ici des dépôts carbonatés. Ses potentiels d'étude sont variés et dépendent directement des contextes archéologiques dans lesquels les concrétions fuligineuses sont découvertes. Dans le cas particulier d'un site archéologique comme un abri-sous-roche ou une grotte, les spéléothèmes fuligineux sont des archives micro-chronologiques (résolution sub-annuelle à décennale) qui ont enregistré des activités et/ou des occupations humaines passées ; ces dernières peuvent alors être décomptées et leur rythme de succession peut être étudié.

Dans cet article, nous illustrerons les potentiels d'application

archéologique de la méthode à travers plusieurs cas, dans différents contextes chronologiques. Les cas les plus récents (en Belgique, en France et en Slovénie), pour lesquels nous disposons parfois d'informations historiques autorisant un contrôle des faits archéologiques enregistrés, permettront de valider le potentiel d'archive micro-chronologique des spéléothèmes dans le cadre d'une étude fuliginochronologique. Ensuite, nous étendrons l'utilisation de cette méthode à un site paléolithique français afin de mettre en lumière le potentiel informatif de cette approche en préhistoire.

2. Les spéléothèmes : des archives micro-chronologiques aux potentiels d'études variés

La mise en évidence de doublets saisonniers dans les spéléothèmes permet d'établir des micro-chronologies fines. Ces lamines, généralement annuelles, ont été étudiées dès les années vingt (Allison, 1926). Elles font des spéléothèmes et des autres concrétions carbonatées laminées des outils micro-chronologiques performants, particulièrement prisés pour les reconstitutions paléo-environnementales grâce à leur précision temporelle très fine de l'ordre de la saison (Genty et al., 1997a). Les études liées aux paléoclimats, aux analyses isotopiques et aux datations U / Th ont ainsi fleuri dans les années 1970 (Fairchild et Baker, 2012, et références incluses) et les concrétions endokarstiques révèlent toute leur puissance d'enregistrement des climats passés depuis maintenant une cinquantaine d'années ; elles constituent par ailleurs l'un des meilleurs matériaux continentaux datables par méthodes absolues (Hellstrom, 2006 ; Woodhead et al., 2010 ; Pons-Branchu et al., 2014a). Elles peuvent être le support d'une variété d'analyses, indépendantes ou combinées, permettant d'explorer de nombreuses questions scientifiques. Par exemple, les possibilités de la datation U/Th des spéléothèmes et leurs implications sont détaillées par Quinif, (1996), Gradziński et al. (2001), Pons-Branchu (2001), Mallick et Frank (2002), Couchoud et al. (2005, 2009), Vaks et al. (2007), Gopher et al. (2010), Pons-Branchu et al. (2014a, 2014b), Hoffmann et al. (2018), etc. Il est par ailleurs possible d'étendre ces datations au-delà des 500 ka, grâce aux datations uranium-plomb (U-Pb) des spéléothèmes (Woodhead et Pickering, 2012). Les méthodes de datations radiocarbone sont également applicables et largement employées, que ce soit sur les éléments pris au piège dans les concrétions calcaires ; à ce sujet voir par exemple Benington et al. (1962) ; Watson et Yarnell (1966) ; Clottes et al. (1995) ; Gradziński et al. (2007) ; Bonneau et al. (2011, 2017), ou que ce soit par datation directe de la calcite ; à ce sujet voir par exemple Genty et al. (1998), Watchman et al. (2000), Mazel et Watchman (2003), et Pentecost (2005). Notons que la mesure du champ magnétique terrestre, qui autorise des calages chronologiques, peut également être réalisée sur les spéléothèmes (Latham et al., 1987). Dans une perspective de reconstitution paléo-environnementale, des dosages des isotopes stables, et notamment de l'oxygène (O) et du carbone (C), sont possibles (Frumkin et al., 1999 ; Bar-Matthews et al., 1999, 2010 ; McDermott, 2004 ; Wong et Breecker, 2015). Les analyses d'éléments traces sont généralement réalisées sur les spéléothèmes dans cette même optique (Gascoyne, 1983, 1992 ; Goede et Vogel, 1991 ; Fairchild et al., 2000 ; Hellstrom et McCulloch, 2000 ; Vansteenberghe et al., 2020) ; toutefois, elles peuvent également permettre d'explorer d'autres problématiques de recherches, comme la recherche des

traces d'activités volcaniques (West et al., 2009 ; Badertscher et al., 2014). D'autres analyses, comme l'étude des enregistrements de pollens dans les spéléothèmes (Bastin, 1978 ; Renault-Miskovsky et Texier, 1980 ; McGarry et Caseldine, 2004) sont moins courantes. Plus récemment, c'est l'ADN ancien enregistré et préservé dans les spéléothèmes qui fait l'objet de recherches (Stahlschmidt et al., 2019).

Cette variété d'études montre que les spéléothèmes sont d'excellentes archives paléo-environnementales mais qu'ils ne se limitent pas à cette seule qualité. Leur capacité d'enregistrement de traces de pollutions (Pons-Branchu et al., 2014b) ou de particules anthropiques est d'ailleurs d'un grand intérêt pour l'archéologie, notamment dans le cas d'enregistrement de dépôts de suie (Brochier, 1997, 1999, 2002, 2008 ; Genty et al., 1997b ; Perrette et al., 1997, 2008 ; Gradziński et al., 2003, 2007 ; Delannoy et al., 2009 ; Martínez-Pillado et al., 2014 ; Ghéco et al., 2017, 2019a, 2019b ; Vandeveldé et al., 2017, 2018b ; Petit et al., 2018 ; Vandeveldé, 2019). Ainsi les concrétions fuligineuses peuvent-elles se révéler être des outils micro-chronologiques performants pour étudier, sans limite géographique ou temporelle (Vandeveldé et al., 2018b), les activités ou les occupations humaines qui sont à l'origine des dépôts de suie enregistrés dans les concrétions.

3. La fuliginochronologie des carbonates

L'étude fuliginochronologique s'attache à analyser les traces de suie prisonnières d'une matrice. Dans le cas de sites archéologiques en grottes ou en abris, ces traces de suie peuvent résulter d'activités ou d'occupations humaines, puisqu'un foyer ou un système d'éclairage avec des torches peuvent laisser des traces de suie sur les parois et sur des concrétions en formation. Ces traces de suie sont documentées à partir de sections polies ou de lames minces dont la coupe est réalisée dans l'axe de croissance des concrétions, perpendiculairement aux lamines. La succession de ces dépôts fuligineux, témoins d'activités ou d'occupations humaines, peut être illustrée sous la forme de diagrammes en codes-barres, où les traits correspondant aux films de suie sont présentés selon leur ordre chronologique (du bas – ancien – vers le haut – récent) (Vandeveldé et al., 2017, 2018b). La résolution temporelle de ces chroniques dépend, quant à elle, de la matrice ; quand il s'agit de dépôts carbonatés, cette résolution peut être sub-annuelle dans les meilleurs cas et la chronique peut alors être indexée sur le calendrier annuel de précipitation des carbonates.

3.1. Retracer l'enregistrement de diverses activités anthropiques historiques

Des dépôts de suie récente piégés dans des spéléothèmes ont été l'objet de recherches ; dans certains cas, une datation à l'année près a pu être avancée grâce au comptage des lamines de croissance des spéléothèmes et à l'identification d'horizons repères constitués par des événements historiques (Baker et al., 2008). C'est par exemple le cas d'un spéléothème de la grotte de Postojna, située en Slovénie, qui nous ramène dans les années quarante. En effet, d'après le décompte des lamines de croissance de la stalagmite Post-stm4 (fig. 1), l'unique film de suie observé peut être daté de l'année 1944. Les archives textuelles permettent de préciser cette date : cette marque

résulterait d'un acte de sabotage par les partisans qui firent exploser le dépôt de carburant des nazis situé dans la grotte. La stalagmite, en piégeant les particules de suie, a enregistré cette explosion et le feu qui s'en est suivi (Genty et al., 1998). Le film de suie, enregistré dans la concrétion, témoigne ainsi aujourd'hui de cet acte de sabotage

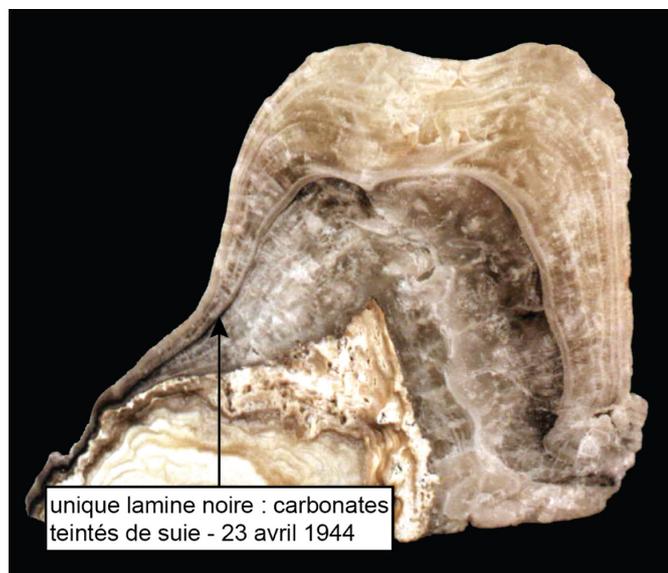


Fig. 1 - Spéléothème de la grotte de Postojna (Slovénie) avec un unique dépôt noir.

Hauteur de la stalagmite Post-stm4 : 5 cm.

Fig. 1 - Speleothem of the Postojna cave (Slovenia) with a single black deposit.

Height of the stalagmite Post-stm4: 5 cm.

des Partisans, datant du 23 avril 1944 (Office of the President of the Republic of Slovenia, 2016) (fig. 1).

S'il n'est pas toujours possible de donner une date à l'année près, ou au jour près grâce au croisement des données géologiques avec les données textuelles comme dans l'étude de Genty et al. (1998) sur la Grotte de Postojna, ce sont parfois les durées de périodes de fréquentation qui peuvent être estimées à l'année près : par exemple, dans la grotte de Han-sur-Lesse, en Belgique, la suie se trouve toujours à la même place dans les lamines de croissance des carbonates (Genty et al., 1997b) qui ont pu être décomptées pour plusieurs stalagmites du site (Genty et al., 1997b ; Verheyden et al., 2006). Dans certains spéléothèmes des fragments de charbon et de paille carbonisée ont également été enregistrés en sus de la suie. Ceux-ci témoignent de l'utilisation de torches d'éclairage lors des visites touristiques pendant la période moderne, dès le XVIII^e siècle et jusqu'à l'an 2000 (Timperman, 1989 ; Verheyden et al., 2006) (fig. 2). Le décompte des doublets annuels de calcite et la position des films de suie dans ces derniers, à la base des DCL (*Dark Compact Laminae*, lamine sparitiques se formant lors des périodes d'excès hydrique) et dans les WPL (*White Porous Laminae*, lamines micritiques se formant lors des périodes plus sèches), permettent de conclure à une fréquentation touristique régulière et saisonnière (probablement l'été) de la grotte de Han-sur-Lesse, avec l'emploi d'un éclairage à la torche, pendant une durée de 73 ans avec deux courtes lacunes (de 4 et 6 ans) (Genty et al., 1997b). Nous pouvons également observer des lamines brunes sur les stalagmites Han-stm2 et Han-stm3 (fig. 2) qui sont les témoins d'inondations dues aux crues de la Lesse. Par ailleurs, des traces de cassures y précèdent les films de suie et semblent indiquer que quelques aménagements

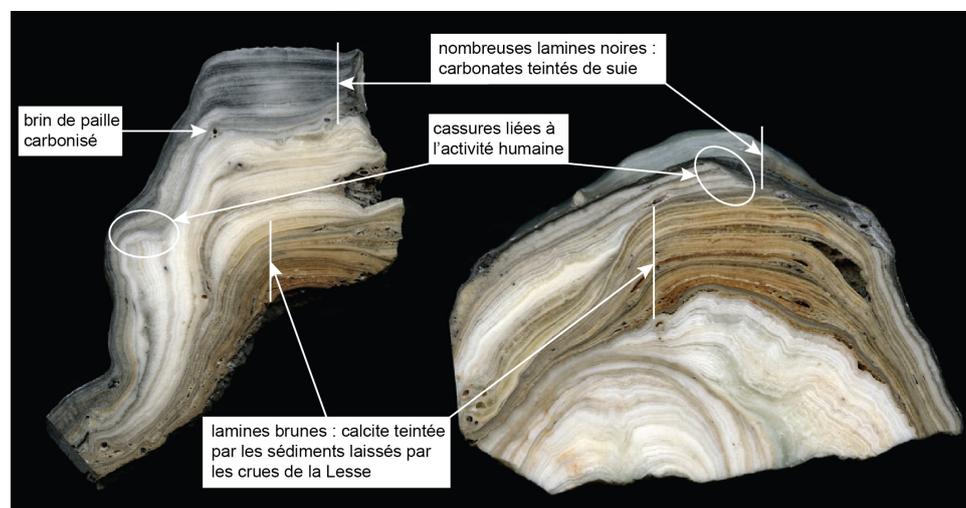


Fig. 2 - Spéléothèmes de Han sur Lesse (Belgique) qui incluent des lamines sombres.

Hauteur de la stalagmite Han-stm3 (à gauche) : 6 cm et de la stalagmite Han-stm2 (à droite) : 7 cm.

Fig. 2 - Han sur Lesse's speleothems (Belgium) which include dark laminae.

Height of the Han-stm3 stalagmite (left): 6 cm and of the Han-stm2 stalagmite (right): 7 cm.

auraient été faits à cet endroit de la grotte, sans doute au XIX^e siècle comme semble l'indiquer le dénombrement des lamines de croissance. Entre crues et exploitation touristique, les spéléothèmes de Han-sur-Lesse constituent à la fois des archives d'événements hydrologiques et d'activités anthropiques.

Dans la Grande Grotte d'Arcy-sur-Cure, en France, les études n'ont pas encore porté sur une datation à l'année près, mais nous avons pu identifier au moins deux phases d'occupations récentes grâce à la mise en évidence de deux générations de films de suie dans des stalagmites prélevées dans la « Fontaine Sainte Marguerite » située

environ à mi-chemin entre l'entrée et le fond de la grotte. D'après le décompte des lamines de croissance, les dépôts les plus récents datent probablement des années 40, et témoignent peut-être de la fréquentation du site par les soldats allemands lors de la Seconde Guerre mondiale (à des fins touristiques et non militaires comme dans le cas de Postojna). Leur présence est notamment attestée par les tags qu'ils ont laissés dans la « Salle de la cascade » tout au bout de la grotte (Baffier et Girard, 1998). La « Fontaine Sainte Marguerite » étant située à proximité de la « Salle de la Danse », les dépôts les plus anciens (antérieurs au XIX^e) observés dans les

stalagmites prélevées pourraient témoigner de l'éclairage nécessaire aux fêtes villageoises que cette salle abritait au XVIII^e siècle (Parat, 1906 ; Baffier et Girard, 1998) (fig. 3). Nous avons également pu mettre en évidence des traces de bris, certainement volontaires, des stalagmites au début de la phase d'occupation. Il peut s'agir des témoins d'un aménagement de l'espace ou bien de l'exploitation des spéléothèmes (autorisée par les propriétaires de la Grande Grotte dès 1786) à des fins de construction de grottes artificielles, très en vogue fin XVIII^e (Fauchereau, 1952 ; Baffier et Girard, 1998). La chronologie des événements enregistrés dans ces spéléothèmes sera précisée à l'avenir dans le cadre de travaux que nous menons sur l'évolution des systèmes d'éclairage utilisés dans la Grande Grotte d'Arcy, de la Préhistoire à l'installation de l'électricité en 1928 (Baffier et Girard, 1998).

À la Grotte de Villars (France), des micro-charbons ont été observés dans une grande stalagmite (Genty, 2008). Suite à une déforestation par le feu au-dessus de la grotte (Labuhn et al., 2015) ceux-ci semblent avoir percolé avant d'être incorporés, avec un petit délai, dans la stalagmite Vil-stm1 située à environ 8 mètres sous la surface (fig. 4). En effet, cette grande stalagmite de plus d'un

mètre de haut montre une réponse très claire à la suite d'incendies en surface, que l'on peut percevoir par le changement dans la composition isotopique de l'échantillon (Genty et Blamart, inédit ; Labuhn et al., 2015), par le changement de fabrique cristalline de la stalagmite et par la présence de micro-charbons. Les rectangles gris sur la figure 4 correspondent aux périodes où les isotopes (surtout le $\delta^{13}\text{C}$) sont les plus forts. Ici, la déforestation et l'utilisation du feu en surface (vers 700 CE) auraient induit une modification du paysage et indirectement de la composition isotopique du CO_2 dissout dans l'eau infiltrée (Labuhn et al., 2015), moins de végétation entraînant moins de production de CO_2 biogénique et donc une augmentation du $\delta^{13}\text{C}$. L'augmentation un peu moins marquée du $\delta^{18}\text{O}$ pourrait être due à une plus grande évaporation de l'eau au niveau du sol. Les micro-charbons (indiqués par des losanges noirs sur la figure 4) se trouvent d'ailleurs dans la première période d'augmentation du $\delta^{13}\text{C}$. Les modifications hydrologiques induites auraient entraîné une modification de la structure du spéléothème, expliquant le changement brutal de la fabrique cristalline entre la partie inférieure du spéléothème, majoritairement composée de calcite compacte translucide (DCC – Dark Compact Calcite) sans structure visible

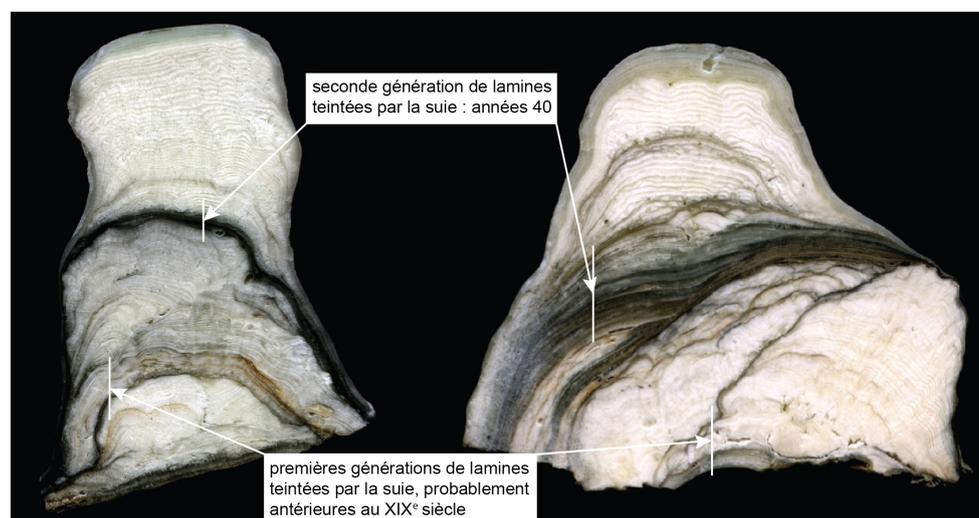


Fig. 3 – Spéléothèmes d'Arcy-sur-Cure (France) avec deux générations de dépôts de suie.

Hauteur de la stalagmite Arcy-stm2 (à gauche) : 6,5 cm et de la stalagmite Arcy-stm3 (à droite) : 9 cm.

Fig. 3 – Speleothems of Arcy-sur-Cure (France) with two generations of soot deposits.

Height of the Arcy-stm2 stalagmite (left): 6.5 cm and of the Arcy-stm3 stalagmite (right): 9 cm.

évidente, et la partie supérieure du spéléothème, majoritairement composée de calcite blanche et poreuse (WPC – White Porous Calcite) laminée. Les particules de charbon (indiquées par des flèches blanches sur les photographies de la figure 4) arrivent par les eaux de percolation avec un léger retard dans le spéléothème et sont visibles juste après le changement de fabrique cristalline. L'action des humains sur leur environnement et l'utilisation du feu dans le processus de déforestation sont ici consignées dans le spéléothème. Ce dernier cas n'est pas sans rappeler celui du karst de Coufin-Chevaline (grottes de Choranche, Vercors, France) au fond duquel ont été remarquées des particules charbonneuses, restes de l'activité de charbonniers qui produisaient du charbon de bois au XIX^e siècle au-dessus de la cavité sur le plateau des Coulmes (Perrette et al., 1997, 2008). L'action de l'humain sur son environnement, de l'occupation des cavités à l'utilisation du feu dans le processus de déforestation, en passant par des activités charbonnières, peut donc être efficacement enregistrée dans le monde souterrain, dans les archives à haute résolution temporelle que sont les spéléothèmes.

3.2. Retracer des chroniques d'occupations humaines préhistoriques

Les spéléothèmes peuvent donc être considérées comme des archives historiques, dont la fiabilité a ici pu être contrôlée sur certains cas bien connus, comme celui de la Grotte de Postojna. Et puisque l'étude d'encroûtements carbonatés récents a pu montrer que des événements historiquement connus pouvaient être enregistrés dans des concrétions calcaires, il est logique de supposer que l'étude d'encroûtements carbonatés anciens peut informer les archéologues sur des événements passés pour lesquels nous ne disposons d'aucune autre trace.

C'est effectivement le cas des encroûtements carbonatés du site paléolithique de la Grotte Mandrin (Drôme, France), qui ont enregistré les nombreuses traces de multiples occupations humaines. Le remplissage de cet abri-sous-roche est constitué de dix unités stratigraphiques (e.g., J à A, de bas en haut) divisibles en treize niveaux archéologiques dont douze pléistocènes, datés du Paléolithique moyen au début Paléolithique supérieur (niveaux

J à B1, d'environ 120 ka à 42 ka cal. BP) (Higham et al., 2014 ; Vandavelde, 2019 ; Frouin et al., sous presse). L'unité C compte deux niveaux archéologiques distincts (e.g., C2 et C1), et l'unité B compte trois niveaux archéologiques distincts (e.g., B3, B2, et B1, de bas en haut) (tab. 1). Des milliers de fragments clastiques issus du délitement des parois sont présents dans tous les niveaux archéologiques de l'abri et des encroûtements enregistrant des dépôts de suie sont parfois présents sur certaines de leurs surfaces. Contrairement aux spéléothèmes plus classiques étudiés à Postojna, Han-sur-Lesse, Arcy-sur-Cure et Villars, ces encroûtements carbonatés pariétaux de la Grotte Mandrin sont millimétriques, et, la paroi se délitant progressivement, il est nécessaire de corréler plusieurs échantillons afin de reconstituer la séquence complète

des films de suie. Ce processus de corrélation par appariement est détaillé dans Vandavelde et al. (2018b).

Les expérimentations réalisées à la Grotte Mandrin ont montré que, dans le cas de cet abri, seules les occupations longues et/ou pendant lesquelles de la graisse a été brûlée ont laissé des traces de suie pérennes sur les parois. Ce sont donc très certainement des occupations que l'on peut aussi qualifier d'installations qui ont été enregistrées dans les encroûtements carbonatés pariétaux de la Grotte Mandrin (Vandavelde et al., 2018a ; Vandavelde, 2019). Ces derniers ont donc enregistré les traces des occupations humaines préhistoriques selon le principe suivant : les humains viennent dans la cavité, ils font du feu, de la suie se dépose sur les parois et est fossilisée par des revêtements carbonatés. Dans le cas de ce site

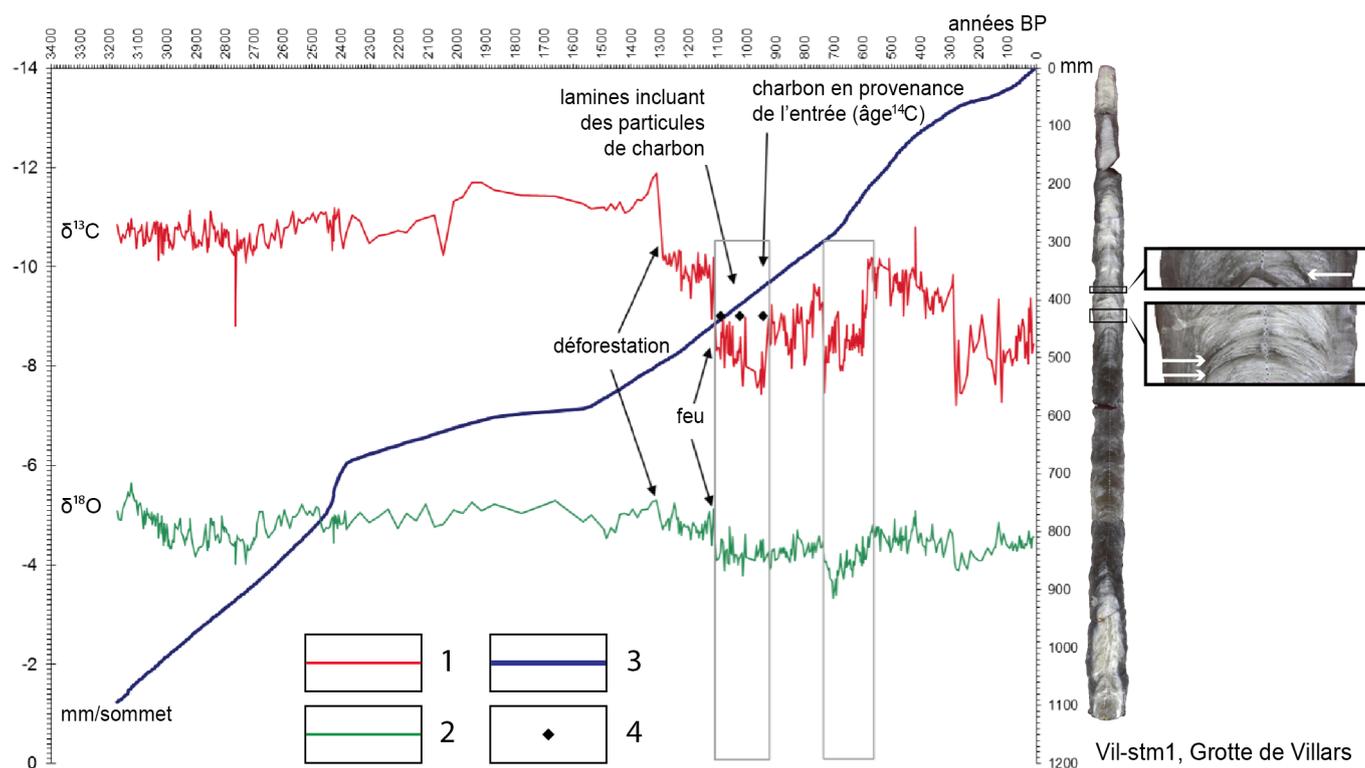


Fig. 4 – Analyse chimique ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$) du spéléothème de la grotte de Villars.

Hauteur de la stalagmite Vil-stm1 : 109,5 cm. 1. Ligne rouge : $\delta^{18}\text{O}$ PDB ; 2. Ligne verte : $\delta^{13}\text{C}$ PDB ; 3. Ligne bleue : mm/sommet ; 4. Losanges noirs : particules de charbon. Les datations ont été publiées par Genty et al. (1999) et complétées par Labuhn et al. (2015).

Fig. 4 – Chemical analysis ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$) of the Villars cave's speleothem.

Height of the Vil-stm1: 109,5 cm. 1. Red line: $\delta^{18}\text{O}$ PDB; 2. Green line: $\delta^{13}\text{C}$ PDB; 3. Blue line: mm/top; 4. Black diamonds: charcoal particles. Datings have been published by Genty et al. (1999) and completed by Labuhn et al. (2015).

particulier, l'analyse fuliginochronologique des encroûtements permet donc de reconstituer des chroniques d'occupations humaines ; ainsi, l'étude de cet objet géoarchéologique peut-elle fournir de nombreuses informations d'ordre anthropologique, notamment lorsque l'on s'intéresse aux dynamiques d'occupation d'un site et/ou à la mobilité des groupes nomades passés.

L'observation microscopique de lames minces et/ou de sections polies réalisées dans l'axe de croissance des concrétions fuligineuses (voir Vandavelde (2019) pour les détails sur le protocole de préparation et d'observation des échantillons), a montré que ce qui pouvait apparaître comme un unique dépôt noir de l'ordre de 0,15 mm à l'œil nu ou à faible grossissement se révèle être composée

d'une multitude de films de suie fins de quelques micromètres d'épaisseur (fig. 5). Ces séries de films de suie sont documentées graphiquement, à partir de photographies, sous forme de schémas en « code-barres », sur lesquels les traits noirs représentent les films de suie et l'espace qui les sépare correspond aux carbonates qui ont cristallisé en l'absence de fréquentation humaine (fig. 6). La collecte des données brutes se fait à partir d'un transect où la position de chaque film de suie est enregistrée. L'origine de l'encroûtement carbonaté est marquée d'un point rouge, qui correspond à la base de la barre verticale grise sur le diagramme. Une fois l'ensemble de la séquence documentée, cette barre représente l'épaisseur totale de l'encroûtement carbonaté fuligineux.

Tab. 1 – Nombre Minimum d’Occupations (NMO) documenté pour chaque niveau archéologique de la Grotte Mandrin.

Tab. 1 – Minimum Number of Occupations (MNO) documented for each archaeological level of the Mandrin Cave.

Couche	Niveau	Période	NMO	
A	chronique 1	Néolithique --> Antique	28 (43)	P. sup. initial P. sup. moyen P. sup. initial P. sup. moyen
	chronique 2		40 (47)	
B	B1	Protoaurignacien	6 (6)	
	B2	Moustérien (Post-Néronien II)	18 (23)	
	B3	Moustérien (Post-Néronien II)	40 (47)	
C	C1	Moustérien (Post-Néronien II)	46 (53)	
	C2	Moustérien (Post-Néronien II)	64 (76)	
D		Moustérien (Post-Néronien I)	60 (77)	
E		Néronien	40 (49)	
F		Moustérien (de type Quina rhodanien)	29 (36)	
G		Moustérien	30 (37)	
H		Moustérien	8 (14)	
I		Moustérien	82 (92)	
J		Moustérien	19 (20)	
total	A à J		446 (544)	

Comme le délitement des parois de l’abri ne se produit pas partout au même rythme, chaque échantillon porte un code-barres qui lui est propre. En faisant correspondre ces différents « codes-barres » graphiquement ou statistiquement (Vandeveldt et al., 2018b) il est possible d’établir une séquence de combinaison (fig. 7) complète et continue intégrant les différentes séquences individuelles. La présente combinaison, présentée à titre d’exemple dans la figure 7, est construite à partir de la synchronisation des séquences individuelles (codes-barres) collectées sur les échantillons analysés (ici en sections polies) pour le niveau archéologique B2 de la Grotte Mandrin. Sur ce site, il est généralement impossible de synchroniser les codes-barres d’échantillons provenant de deux unités sédimentaires différentes (à l’exception des marges des combinaisons reconstituées pour des unités adjacentes - fig. 8.). Il est cependant possible de le faire avec des échantillons provenant de la même unité. Cela démontre que les parois de l’abri se désintègrent suffisamment rapidement sur ce site pour que les fragments de parois encroûtés soient contemporains de l’unité sédimentaire dans laquelle ils tombent. Ce délitement progressif permet donc faire le lien entre les séquences de combinaison et les unités identifiées lors de la fouille (Vandeveldt et al., 2017). Lorsque des séquences de combinaisons se synchronisent, et donc se chevauchent partiellement à leur marge, cela montre une continuité des occupations de même qu’une succession rapide de ces dernières entre deux unités adjacentes. Dans ce cas, le délitement progressif des parois permet également de réattribuer chaque film de suie à son niveau archéologique et de reconstituer ainsi la chronologie des occupations de chaque niveau archéologique (fig. 8). En effet, si un fragment de paroi encroûté retrouvé dans le niveau C a théoriquement pu enregistrer des films de suie datant

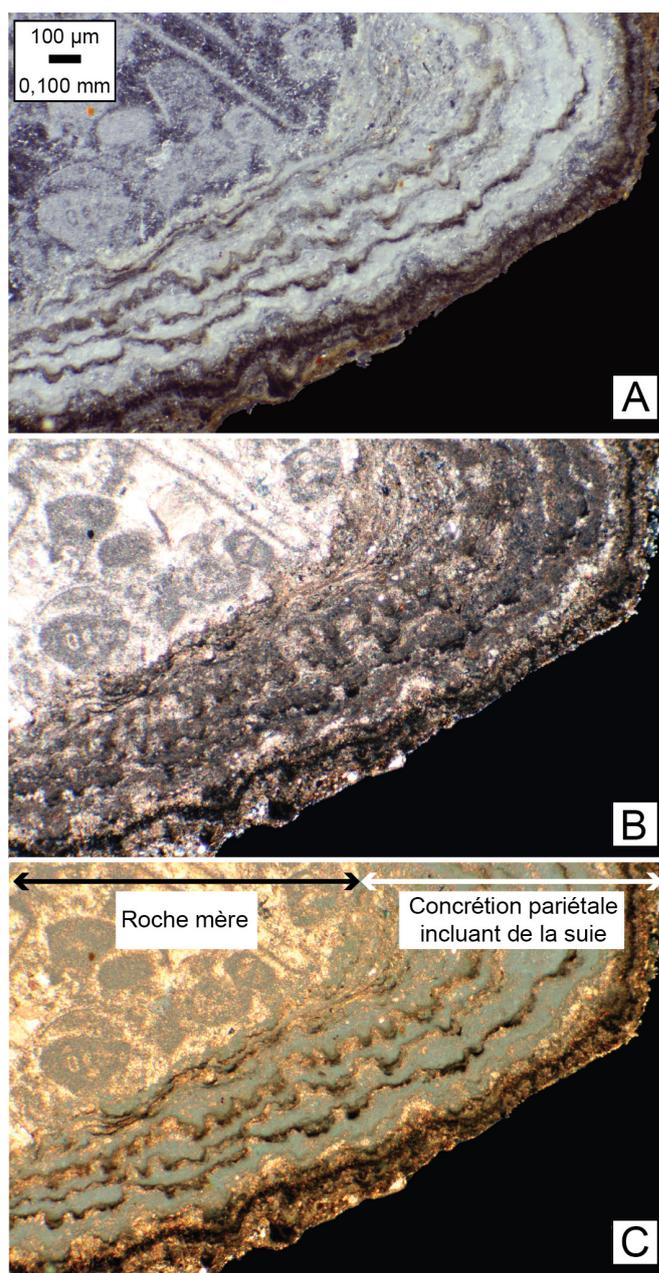


Fig. 5 – Encroûtement carbonaté pariétal incluant de la suie, Grotte Mandrin (Drôme, France), niveau C (Post-Néronien II), échantillon C-MAN34.

Un seul dépôt noir visible à l’œil nu ou à faible grossissement. Il se résout en général en une multitude de films lors d’une observation microscopique en lumière réfléchie « LR » (A), ou en lumière polarisée analysée « LPA » (B) ; C : la combinaison des deux éclairages (LR et LPA) fait ressortir à la fois les films de suie et la fabrique cristalline de l’encroûtement pariétal.

Fig. 5 – Parietal carbonated crust including soot, Grotte Mandrin (Drôme, France), level C (Post-Neronian II), sample MAN-C34.

A single black deposit is visible to the naked eye or at low magnification. It generally resolves into a multitude of films during microscopic observation in reflected light “RL” (A), or in cross polarized light “XPL” (B); C: combination of the two lightings (LR and XPL) brings out both the soot films and the crystal fabric of the parietal crust.

de C et de D avant sa chute sur le sol, il n’a pas pu enregistrer des films de suie attribuables à B, puisqu’il était déjà tombé au sol avant les occupations de l’unité B. C’est à partir de ces chroniques des occupations que le Nombre Minimum d’Occupations (NMO) peut être établi pour chaque niveau archéologique. Dans le cas présenté

à titre d'exemple en figure 8, les combinaisons sont construites à partir des séquences individuelles collectées sur les échantillons préparés en sections polies et auxquelles ont été intégrées les données issues de l'étude des lames minces, qui présentent généralement une meilleure résolution. L'étude stratigraphique permet ici de réattribuer chaque film de suie à son niveau archéologique (puisque si un claste retrouvé dans le niveau B2 a pu enregistrer des films de suie datant du niveau B3 et du niveau B2 avant sa chute sur le sol – dans le niveau B2 –, il n'a pas pu enregistrer des films de suie attribuables au niveau B1, puisqu'il est déjà tombé au sol avant les occupations du niveau B1) et de reconstituer ainsi la chronique des occupations pour chaque niveau archéologique (C, B3, B2 et B1).

Sur ce site, les encroûtements carbonatés fuligineux sont constitués de doublets de calcite annuels. L'alternance micritique/sparite est un signal saisonnier lié aux conditions hydriques (Baker et al., 1993). Ces doublets WPL/DCL sont généralement annuels, mais ce n'est

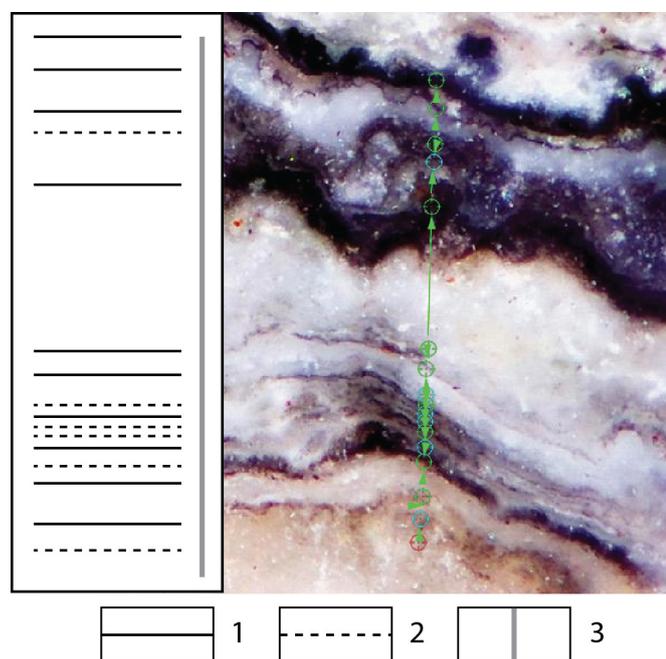


Fig. 6 – Séquence de films de suie documentée sous la forme de « code-barres », acquisition en cours grâce au module LnSeq de la plateforme DataWald (G.L. Conception, 2015).

1. Film de suie ; 2. Film de suie incertain ; 3. Épaisseur de l'encroûtement carbonaté.

Fig. 6 – Soot film sequence documented in the form of a «barcode», acquisition in progress through DataWald platform's LnSeq module (G.L. Conception, 2015).

1. Soot Film; 2. Uncertain soot film; 3. Thickness of the carbonated deposit.

pas toujours le cas (Baker et al., 2008). Afin de démontrer que cette alternance de fabrique cristalline se produit à une échelle annuelle, elle doit être synchronisée avec un autre signal saisonnier qui ne dépend pas uniquement des conditions hydriques, comme la variation de la concentration de certains éléments mineurs ou traces. Selon diverses études (Roberts et al., 1998 ; Desmarchelier, 1999 ; Fairchild et al., 2001 ; Huang et al., 2001 ; Treble et al., 2003 ; Johnson et al., 2006 ; Stoll et al., 2012 ; Nagra et al., 2017), l'analyse des variations à haute résolution du strontium (Sr) peut être un moyen de mettre en évidence les cycles annuels. L'étude des fluctuations de la concentration en

strontium dans les encroûtements carbonatés par μ LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*) et la comparaison des fluctuations du strontium avec les alternances de fabrique cristalline (micrite vs micro-sparite) nous ont ainsi permis d'établir le caractère annuel des doublets WPL/DCL sur ce site, les deux signaux étant synchronisés (Vandeveld, 2019 ; Vandeveld et al., accepté). L'étude conjointe des films de suie et des doublets de calcite permet donc de situer les chroniques sur une échelle de temps micro-chronologique avec une résolution annuelle. Cette chronique, indexée sur le calendrier annuel de précipitations des carbonates, constitue alors une sorte de calendrier des occupations humaines, porte d'accès pour les études de mobilité humaine (fig. 9). La figure 9 présente ainsi sur le premier schéma la séquence individuelle non indexée sur le calendrier annuel de précipitation des carbonates de l'échantillon MAN-D-37, provenant du niveau D de la Grotte Mandrin et observé en lame mince. Les écarts entre les traits (films de suie) représentent ici l'épaisseur de la calcite. Sur le second schéma, la séquence individuelle de l'échantillon MAN-D-37 est indexée. Chaque doublet de calcite y est représenté de la même taille afin de représenter le temps séparant chaque film de suie (un doublet de calcite DCL+WPL = un an). On remarque sur cet exemple que les films de suie sont toujours situés à la fin des lamines micritiques (WPL). Cela indique que l'abri est ici occupé plusieurs années consécutives, toujours à la fin de la saison sèche, avec un court arrêt de fréquentation lors d'une période de quelques années au milieu de cette séquence individuelle.

Ainsi, l'étude fuliginochronologique conduite sur les encroûtements carbonatés de la Grotte Mandrin a permis de reconstituer les chroniques des occupations pour chaque niveau archéologique. À partir de ces dernières, un Nombre Minimum d'Occupations a pu être déterminé pour chacun d'entre eux (tab. 1). De plus, l'analyse des chroniques des occupations indexées sur le calendrier annuel de précipitation des carbonates permet de mettre en évidence différentes dynamiques d'occupation du site au cours du temps entre les différentes unités archéologiques mais aussi parfois pour un même groupe chrono-culturel. Prenons l'exemple du niveau D, daté vers \sim [51,4 ; 49,8] ka cal. BP (Maximum *a posteriori* (MAP) du début et de la fin de l'unité D que nous avons calculés à partir de la modélisation des datations radiocarbone et OSL réalisées par Higham et al. (2014) et Frouin et al. (sous presse). La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel ChronoModel (Lanos et Dufresne, 2019) en utilisant la courbe de calibration Intcal20 (Reimer et al., 2020). HPD95% : \sim [56,3 ; 47,8] ; [53,7 ; 46,7] ka cal. BP). Il est attribué au Post-Néronien I, un groupe aisément reconnaissable dans cette séquence archéologique de par ses traditions techniques singulières. En effet, si ces artisanats de production d'outils en silex s'insèrent dans la grande sphère moustérienne, les systèmes techniques du Post-Néronien I sont largement organisés autour de la production de petites pointes à dos abattu, une catégorie d'outillage rare en contexte moustérien et dont la production, en dehors du Post-Néronien I, ne devient systématique qu'avec le Paléolithique supérieur. La systématisation de tels développements techniques n'émergent ainsi pas avant certaines industries dites de transition d'Europe occidentale, comme dans l'Uluzzien de la péninsule italique, \sim 5 millénaires après le Post-Néronien I (Slimak, sous presse). Dans ce niveau, 98 % des films de suie sont associés aux lamines micritiques ; c'est à dire que toutes les occupations sont enregistrées à la saison sèche (sauf un film de suie incertain, représentant les 2 % restant enregistré au sommet d'une

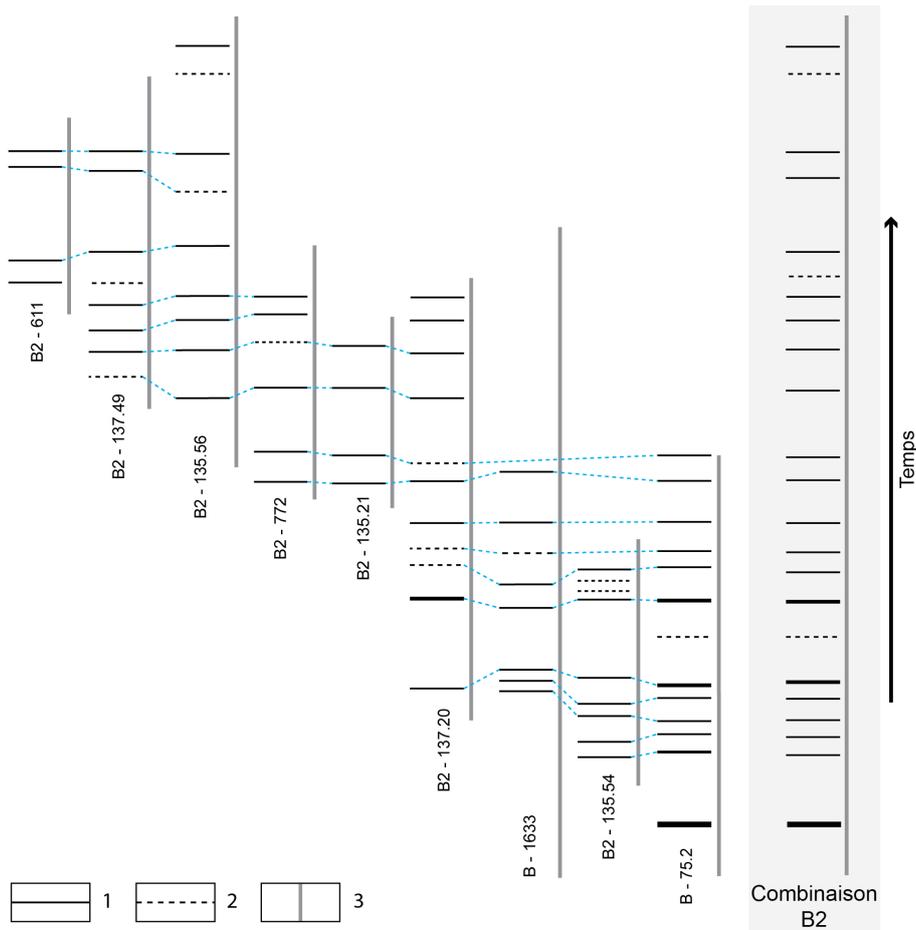


Fig. 7 - Corrélation de séquences individuelles de films de suie en une séquence de combinaison.

1. Film de suie ; 2. Film de suie incertain ; 3. Épaisseur de l'encroûtement carbonaté

Fig. 7 - Correlation of individual sequences of soot films leading to a combination sequence.

1. Soot Film; 2. Uncertain soot film; 3. Thickness of the carbonated deposit.

lamine micro-sparitique). Dans cette unité, les humains occupent l'abri tous les ans, à la saison sèche ; et l'abri est occupé de cette manière pendant plusieurs années consécutives, montrant l'intégration du site dans le cycle annuel de nomadisme du groupe. Une première phase d'occupations, qui dure dix-neuf ans, est séparée de la suivante, qui dure vingt-cinq ans, par quatre à six années pendant lesquelles aucune installation n'est enregistrée dans les encroûtements carbonatés de la Grotte Mandrin. La troisième phase d'occupations est également séparée des deux premières par une période de trois années pendant laquelle aucune installation n'est enregistrée. Le rythme d'occupation de l'abri change alors radicalement : les installations se font toujours une fois par an à la saison sèche, mais plus sur de longues périodes. Au contraire, les périodes de deux ou trois ans pendant lesquelles l'abri est inoccupé sont nombreuses et alternent avec des périodes d'un, deux, ou trois ans d'occupations, pendant au moins dix-sept ans (nous ne disposons malheureusement pas de données relatives à la position des films dans les doublets de calcite à la fin de la séquence). Pour le niveau D, trois grandes phases d'occupation ont ainsi pu être identifiées : les deux premières générations comptent en moyenne un nombre minimum d'une occupation par an, et la troisième génération, au rythme d'occupation plus irrégulier, compte en moyenne un NMO par an de 0,82. En tenant compte de l'ensemble de la chronique, en incluant les deux périodes sans installation entre les trois générations d'occupations enregistrées dans les encroûtements carbonatés, le NMO par an peut-être estimé à 0,76 en moyenne pour cette unité (Vandeveldt, 2019). Nous noterons que, même si ce n'est pas le cas pour ce niveau archéologique D, les occupations peuvent être multiples au

cours de l'année et se faire aussi bien en saison sèche qu'humide ; c'est par exemple le cas de l'unité C, où 29 % des occupations se font à la saison humide et 71 % à la saison sèche. L'étude de la chronique des occupations du niveau C révèle en effet qu'il y a souvent deux films de suie par doublets de calcite, l'un associé à la lamine micritique (71 % des cas) et l'autre associé à la lamine micro-sparitique (29 % des cas).

De ces exemples, il ressort que plusieurs critères quantitatifs issus de l'étude fuliginochronologique permettent de mettre en évidence différentes dynamiques d'occupation, comme la fréquence d'occupation (nombre minimum d'occupations moyen par an) et la saisonnalité des occupations (proportion d'occupations à la saison sèche *vs* saison humide). Sur certains échantillons, on peut pousser le degré de résolution temporelle très loin, et ainsi étudier précisément les rythmes d'occupation dans la cavité sur une période donnée (au maximum celle couverte par la chronique des occupations), avec l'identification de schémas d'occupation particuliers (critère qualitatif) s'inscrivant par exemple dans des cycles annuels de nomadisme. Cette méthode, qui offre un accès à de nouvelles données fondamentales pour l'archéologue, ouvre ainsi de nouvelles possibilités pour percevoir l'organisation sociale de groupes humains à travers le temps.

4. Conclusions

La résolution chronologique obtenue sur le site préhistorique de la Grotte Mandrin est ici comparable à celle obtenue sur le site plus récent de Han-sur-Lesse, où le décompte des lamines a fourni des informations temporelles à l'année près en terme de durée de

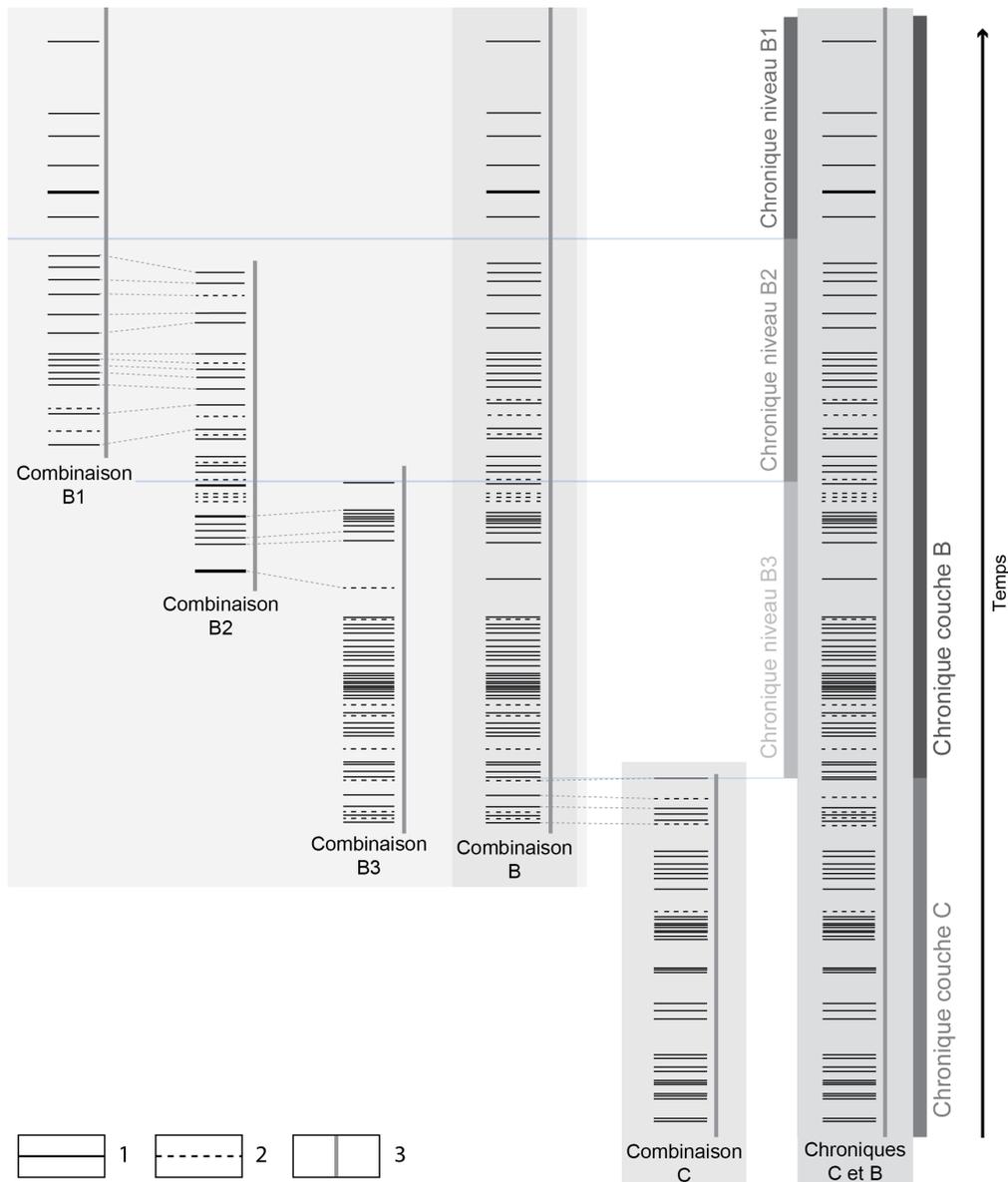


Fig. 8 - Synchronisation des combinaisons des niveaux C à B1 afin de reconstituer la chronique des occupations pour chaque niveau archéologique (C, B3, B2 et B1).

1. Film de suie ; 2. Film de suie incertain ; 3. Épaisseur de l'encroûtement carbonaté.

Fig. 8 - Synchronization of the combinations of levels C to B1 in order to reconstruct the occupations' chronicles for each archaeological level (C, B3, B2 and B1).

1. Soot Film; 2. Uncertain soot film; 3. Thickness of the carbonated deposit.

fréquentation du site au XIX^e siècle et où une saisonnalité pu être identifiée. Et comme à Postojna, Han-sur-Lesse, et Arcy-sur-Cure, la présence humaine sur le site a bien été enregistrée dans des spéléothèmes sous la forme de films de suie.

Les cas historiques présentés dans cet article permettent de valider cette méthode qu'est la fuliginochronologie, en démontrant l'enregistrement d'événements parfois historiquement connus, et surtout en montrant sa pertinence et sa fiabilité dans des contextes récents, avec des concrétions plus faciles à étudier que celles de la Grotte Mandrin, qui sont millimétriques (voire infmillimétriques), souvent bourgeonnantes en raison de leur nature biochimique, et avec des conditions de formation climatiques variables entre les différents niveaux archéologiques.

La présentation conjointe de ces cas historiques et préhistorique, datant de l'Holocène et du Pléistocène supérieur, permet par ailleurs de conclure plusieurs choses. En effet, que les concrétions se soient formées au 120^e ou au 50^e millénaire avant le présent, lors du XIX^e siècle ou pendant les années 1940, la capacité d'enregistrement et de conservation de la suie dans les spéléothèmes, de même que la

résolution chronologique des spéléothèmes, sont potentiellement les mêmes. Les dépôts de suie piégés dans des concrétions sont des témoins d'activités ou d'occupations humaines dans les cavités, ou au-dessus de la cavité pour le cas de la Grotte de Villars ; et l'analyse des concrétions fuligineuses nous donne potentiellement accès à l'étude de ces activités ou de ces occupations à travers une archéologie à haute résolution temporelle. La possibilité d'étendre ce type d'études pionnières aux cavités de tous âges et de toutes régions, du paléolithique inférieur avec les premières traces de feu, jusqu'aux temps médiévaux et même contemporains, est réelle. Seules varient les problématiques de recherches et les implications des résultats, qui différeront selon les contextes.

Remerciements

Nous remercions le Service Régional de l'Archéologie Auvergne-Rhône-Alpes et la ville de Malataverne (Drôme) qui financent les recherches à la Grotte Mandrin, de même que L. Marie (CEREGE Aix-Marseille Université, Technopole Environnement Arbois

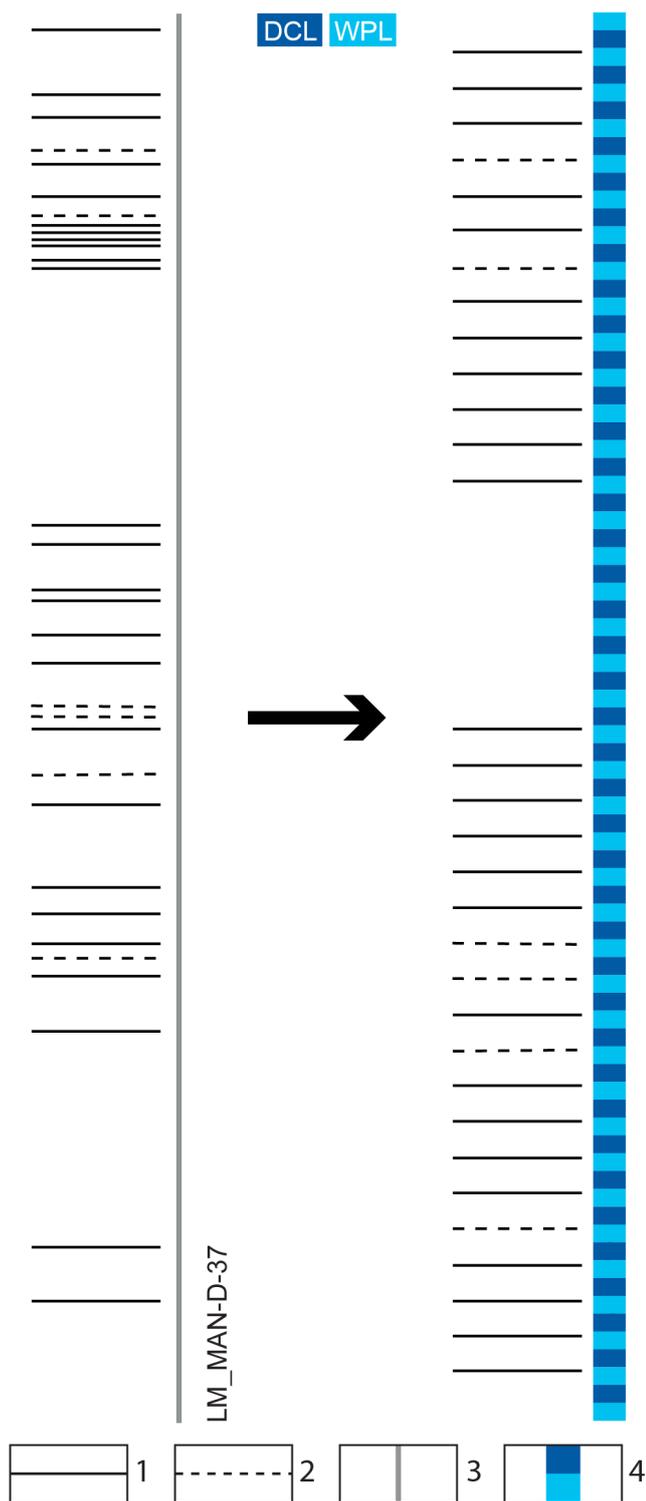


Fig. 9 – Exemple d'indexation de la séquence individuelle portée par l'échantillon MAN-D-37 (niveau D de la Grotte Mandrin) sur le calendrier annuel de précipitation des carbonates.

1. Film de suie ; 2. Film de suie incertain ; 3. Épaisseur de l'encroûtement carbonaté ; 4. Un doublet annuel de calcite formé de deux lamines (WPL et DCL).

Fig. 9 – Example of indexing the individual sequence carried by sample MAN-D-37 (Grotte Mandrin, D level) on the annual calendar of carbonates' precipitation.

1. Soot Film; 2. Uncertain soot film; 3. Thickness of the carbonated deposit; 4. An annual calcite doublet consisting of two laminae (WPL and DCL).

Méditerranée) pour la réalisation des lames minces des échantillons de la Grotte Mandrin dont les analyses et micro-photographies ont été réalisées au sein de la Plateforme ArchéoScopie de la MSH Mondes (USR 3225 CNRS, Nanterre). Merci à F. De la Varenne, propriétaire à Arcy, pour l'accès au site et pour son intérêt, et à D. Baffier et M. Girard pour leur collaboration sur la connaissance du site. Merci à la famille Versaveaud pour l'accès à la grotte de Villars et pour leur soutien depuis plus de 25 années. Merci à Y. Quinif et G. Deflandre qui ont été nos guides pour l'étude de la grotte de Han-sur-Lesse.

Références

- Allison V.C. (1926) – The antiquity of the deposits in Jacob's cavern. *Anthropological papers of the AMNH*, 19, 288–338.
- Badertscher S., Borsato A., Frisia S., Cheng H., Edwards R.L., Tüysüz O., Fleitmann D. (2014) – Speleothems as sensitive recorders of volcanic eruptions – the Bronze Age Minoan eruption recorded in a stalagmite from Turkey. *Earth and Planetary Science Letters*, 392, 58–66.
DOI: [10.1016/j.epsl.2014.01.041](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.01.041)
- Baffier D., Girard M. (1998) – Les cavernes d'Arcy-sur-Cure. La maison des roches, 120 p.
- Baker A., Smart P.L., Edwards R.L., Richards D.A. (1993) – Annual growth banding in a cave stalagmite. *Nature*, 364, 518–520.
DOI: [10.1038/364518a0](https://doi.org/10.1038/364518a0)
- Baker A., Smith C.L., Jex C., Fairchild I.J., Genty D., Fuller L. (2008) – Annually laminated speleothems: a review. *International Journal of Speleology*, 37, 193–206.
- Bar-Matthews M., Ayalon A., Kaufman A., Wasserburg G.J. (1999) – The Eastern Mediterranean paleoclimate as a reflection of regional events: Soreq cave, Israel. *Earth and Planetary Science Letters*, 166 (1-2), 85–95.
DOI: [10.1016/S0012-821X\(98\)00275-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00275-1)
- Bar-Matthews M., Marean C.W., Jacobs Z., Karkanas P., Fisher E.C., Herries A.I.R., Brown K., Williams H.M., Bernatchez J., Ayalon A., Nilssen P.J. (2010) – A high resolution and continuous isotopic speleothem record of paleoclimate and paleoenvironment from 90 to 53 ka from Pinnacle Point on the south coast of South Africa. *Quaternary Science Reviews*, 29 (17-18), 2131–2145.
DOI: [10.1016/j.quascirev.2010.05.009](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.05.009)
- Bastin B. (1978) – L'analyse pollinique des stalagmites : une nouvelle possibilité d'approche des fluctuations climatiques du Quaternaire. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 101, 13–19.
- Benington F., Melton C., Watson P.J. (1962) – Carbon Dating Prehistoric Soot from Salts Cave, Kentucky. *American Antiquity*, 28 (2), 238–241.
DOI: [10.2307/278384](https://doi.org/10.2307/278384)
- Bonneau A., Brock F., Higham T., Pearce D.G., Pollard A.M. (2011) – An Improved Pretreatment Protocol for Radiocarbon Dating Black Pigments in San Rock Art. *Radiocarbon*, 53 (3), 419–428.
- Bonneau A., Pearce D., Mitchell P., Staff R., Arthur C., Mallen L., Brock F., Higham T. (2017) – The earliest directly dated rock paintings from southern Africa: new AMS radiocarbon dates. *Antiquity*, 91 (356), 322–333.
DOI: [10.15184/aqy.2016.271](https://doi.org/10.15184/aqy.2016.271)
- Brochier J.É. (1997) – Couches archéologiques ou “sols d'habitat” ? Quelques observations micro-chronologiques dans un abri-sous-

- roche pyrénéen. In International Workshop on Archaeological Soil Micromorphology, 23-24 août 1997, Basel.
<https://www.researchgate.net/publication/301346236>
- Brochier J.É. (1999)** – Couche archéologique, sol archéologique et distributions spatiales : quelques réflexions (géo)archéologiques sur un vieux problème. *Geoarqueologia i Quaternari litoral*, vol. Memorial Maria Pilar Fumanal, 91–95.
- Brochier J.É. (2002)** – Les sédiments anthropiques : Méthodes d'étude et perspectives. In Miskovsky J.-C. (Eds.) : *Géologie de La Préhistoire : Méthodes, Techniques, Applications*. Presses Universitaires de Perpignan, 453–477.
- Brochier J.É. (2008)** – Estudi geoarqueològic dels dipòsits tardiglacials de la Balma de la Margineda (Capes de la 6 a la 11). In Guilaine, J., Martzluft, M. (Eds.): *Les Excavacions a La Balma de La Margineda (1979-1991)*. Minister d'Afers socials i Cultura, Andorra, 52–60.
- Clottes J., Chauvet J.-M., Brunel-Deschamps E., Hillaire C., Dugas J.-P., Arnold M., Cachier H., Evin J., Fortin P., Oberlin C. (1995)** – Les peintures paléolithiques de la Grotte Chauvet-Pont d'Arc, à Vallon-Pont-d'Arc (Ardèche, France): datations directes et indirectes par la méthode du radiocarbone. *Comptes rendus de l'Académie des sciences, Série 2, Sciences de la terre et des planètes*, 320 (11), 1133–1140.
- Couchoud I., Genty D., Ghaleb B., Gilmour M., Blamart D., Texier J.-P. (2005)** – Study of speleothems in archaeological context: case studies from Southwestern France. In European Geosciences Union General Assembly. *Geophysical Research Abstracts*, 7, 01344.
- Couchoud I., Genty D., Hoffmann D., Drysdale R., Blamart D. (2009)** – Millennial-scale climate variability during the Last Interglacial recorded in a speleothem from south-western France. *Quaternary Science Reviews*, 28 (27-28), 3263–3274.
[DOI : 10.1016/j.quascirev.2009.08.014](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.08.014)
- Delannoy J.-J., Gauchon C., Hobléa F., Jaillet S., Maire R., Perrette Y., Perroux A.-S., Ployon E., Vanara N. (2009)** – Karst: from palaeogeographic archives to environmental indicators. *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 15 (2), 83–94.
[DOI : 10.4000/geomorphologie.7520](https://doi.org/10.4000/geomorphologie.7520)
- Desmarchelier J.M. (1999)** – High-resolution Palaeoenvironmental Information from Southeast Australian Speleothems. Thèse de Doctorat, University of Tasmania, 195 p.
- Fairchild I.J., Baker A. (2012)** – *Speleothem Science - From Process to Past Environments*. Wiley-Blackwell, Oxford, 455 p.
- Fairchild I.J., Baker A., Borsato A., Frisia S., Hinton R.W., McDermott F., Tooth A.F. (2001)** – Annual to sub-annual resolution of multiple trace-element trends in speleothems. *Journal of the Geological Society*, 158 (5), 831–841.
[DOI : 10.1144/jgs.158.5.831](https://doi.org/10.1144/jgs.158.5.831)
- Fairchild I.J., Borsato A., Tooth A.F., Frisia S., Hawkesworth C.J., Huang Y., McDermott F., Spiro B. (2000)** – Controls on trace element (Sr–Mg) compositions of carbonate cave waters: implications for speleothem climatic records. *Chemical Geology*, 166 (3-4), 255–269.
[DOI : 10.1016/S0009-2541\(99\)00216-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00216-8)
- Fauchereau R. (1952)** – Les “congélations” des grottes d'Arcy-sur-Cure, ou un échange de lettres entre CHARTRAIN DE MONTIGNY châtelain de Bières (Côte-d'Or) et la Famille d'ASSAY propriétaire des grottes d'Arcy-sur-Cure. *Bulletin de la Société des Sciences Historiques et Naturelles de l'Yonne, Années 1947 à 1952* (95), 4-13.
- Frouin M., Schwenninger J.-L., Mercier N., Higham T. (sous presse)** – Chronologie. In Slimak, L., Giraud, Y., Metz, L., Yvorra, P. (Eds.) : *Des Derniers Néandertaliens Aux Premiers Hommes Modernes En France Méditerranéenne. Les Données de La Grotte Mandrin à Malataverne*. Artisanats & Territoires 3, MMSH Aix-en-Provence.
- Frumkin A., Carmi I., Gopher A., Ford D.C., Schwarcz H.P., Tsuk T. (1999)** – A Holocene millennial-scale climatic cycle from a speleothem in Nahal Qanah Cave, Israel. *The Holocene*, 9 (6), 677–682.
[DOI : 10.1191/095968399669422210](https://doi.org/10.1191/095968399669422210)
- Gascoyne M. (1983)** – Trace-element partition coefficients in the calcite-water system and their paleoclimatic significance in cave studies. *Journal of Hydrology*, 61 (1), 213–222.
[DOI : 10.1016/0022-1694\(83\)90249-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90249-4)
- Gascoyne M. (1992)** – Palaeoclimate determination from cave calcite deposits. *Quaternary Science Reviews*, 11 (6), 609–632.
[DOI : 10.1016/0277-3791\(92\)90074-1](https://doi.org/10.1016/0277-3791(92)90074-1)
- Genty D. (2008)** – Palaeoclimate Research in Villars Cave (Dordogne, SW-France). *International Journal of Speleology*, 37 (3), 173-191.
[DOI : 10.5038/1827-806X.37.3.3](https://doi.org/10.5038/1827-806X.37.3.3)
- Genty D., Baker A., Barnes W. (1997a)** – Comparaison entre les lamines luminescentes et les lamines visibles annuelles de stalagmites. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Sciences de la terre et des planètes*, 325, 193–200.
- Genty D., Dauphin Y., Deflandre G., Quinif Y. (1997b)** – Exemples de particules d'origine anthropique piégées dans les lamines de croissance de stalagmites - Intérêt pour la reconstitution des environnements humains anciens [Examples of anthropogenic particles trapped into stalagmite growth laminae - Interest for the study of prehistoric human activity.]. *Quaternaire*, 8 (2), 149–157.
[DOI : 10.3406/quate.1997.1569](https://doi.org/10.3406/quate.1997.1569)
- Genty D., Massault M., Gilmour M., Baker A., Verheyden S., Kepens E. (1999)** – Calculation of Past Dead Carbon Proportion and Variability by the Comparison of AMS 14C and Tims U/TH Ages on Two Holocene Stalagmites. *Radiocarbon*, 41 (3), 251–270.
[DOI : 10.1017/S003382220005712X](https://doi.org/10.1017/S003382220005712X)
- Genty D., Vokal B., Obelic B., Massault M. (1998)** – Bomb 14C time history recorded in two modern stalagmites — importance for soil organic matter dynamics and bomb 14C distribution over continents. *Earth and Planetary Science Letters*, 160 (3-4), 795–809.
[DOI : 10.1016/S0012-821X\(98\)00128-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00128-9)
- Gheco L., Gastaldi M., Marte F., Quesada M., Tascon M., Mastrangelo N. (2017)** – About fires and paintings: Three stratigraphic insights on the history of a cave with prehispanic rock art. *Journal of Archaeological Science, Reports*, 15, 48–58.
[DOI : 10.1016/j.jasrep.2017.07.009](https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.07.009)
- Gheco L., Gastaldi M., Mastrangelo N., Quesada M., Marte F., Tascón M. (2019a)** – Entre humos, fuegos y pinturas: Una metodología para conectar historias en el arte rupestre (Smokes, fires and paintings: a methodology for linking histories in rock art). *Boletín del museo chileno de arte precolombino*, 24, 131–152.
- Gheco L., Tascon M., Gastaldi M., Etcheberry E.A., Pereda S., Mastrangelo N., Quesada M., Marte F. (2019b)** – Hidden paintings, forgotten histories: a micro-stratigraphic approach to study coated rock art. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 11 (9), 5037–5052.
[DOI : 10.1007/s12520-019-00854-z](https://doi.org/10.1007/s12520-019-00854-z)

- G.L. Conception (2015) – DataWald - Module LnSeq. <http://glconception.com/>
- Goede A., Vogel J.C. (1991) – Trace element variations and dating of a Late Pleistocene Tasmanian speleothem. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 88 (1-2), 121–131.
DOI: [10.1016/0031-0182\(91\)90018-M](https://doi.org/10.1016/0031-0182(91)90018-M)
- Gopher A., Ayalon A., Bar-Matthews M., Barkai R., Frumkin A., Karkanas P., Shahack-Gross R. (2010) – The chronology of the late Lower Paleolithic in the Levant based on U–Th ages of speleothems from Qesem Cave, Israel. *Quaternary Geochronology*, 5 (6), 644–656.
DOI: [10.1016/j.quageo.2010.03.003](https://doi.org/10.1016/j.quageo.2010.03.003)
- Gradziński M., Górny A., Pazdur A., Pazdur M.F. (2003) – Origin of black coloured laminae in speleothems from the Kraków– Wieluń Upland, Poland. *Boreas*, 32 (3), 532–542.
DOI: [10.1080/03009480310003414](https://doi.org/10.1080/03009480310003414)
- Gradziński M., Hercman H., Nowak M., Bella P. (2007) – Age of Black Coloured Laminae Within Speleothems from Domica Cave and Its Significance for Dating of Prehistoric Human Settlement. *Geochronometria*, 28 (1), 39–45.
DOI: [10.2478/v10003-007-0029-7](https://doi.org/10.2478/v10003-007-0029-7)
- Gradziński M., Hercman H., Nowicki T., Bella P. (2001) – Dark Coloured Laminae Within Speleothems as an Indicator of the Prehistoric Man Activity: Case Study from Domica Cave (Slovakia), Preliminary Results. In *International Congress of Speleology, 4th Speleological Congress of Latin América and Caribbean, 26th Brazilian Congress of Speleology, Brasília DF, 15-22 juillet 2001*, 263–267.
- Hellstrom J. (2006) – U–Th dating of speleothems with high initial ^{230}Th using stratigraphical constraint. *Quaternary Geochronology*, 1 (4), 289–295.
DOI: [10.1016/j.quageo.2007.01.004](https://doi.org/10.1016/j.quageo.2007.01.004)
- Hellstrom J.C., McCulloch M.T. (2000) – Multi-proxy constraints on the climatic significance of trace element records from a New Zealand speleothem. *Earth and Planetary Science Letters* 179 (2), 287–297.
DOI: [10.1016/S0012-821X\(00\)00115-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00115-1)
- Higham T., Douka K., Wood R., Ramsey C.B., Brock F., Basell L., Camps M., Arrizabalaga A., Baena J., Barroso-Ruiz C., Bergman C., Boitard C., Boscato P., Caparros M., Conard N.J., Draily C., Froment A., Galvan B., Gambassini P., Garcia-Moreno A., Grimaldi S., Haesaerts P., Holt B., Iriarte-Chiapusso M.-J., Jelinek A., Jorda Pardo J.F., Maillo-Fernandez J.-M., Marom A., Maroto J., Menendez M., Metz L., Morin E., Moroni A., Negrino F., Panagopoulou E., Peresani M., Pirson S., de la Rasilla M., Riel-Salvatore J., Ronchitelli A., Santamaria D., Semal P., Slimak L., Soler J., Soler N., Villaluenga A., Pinhasi R., Jacobi R. (2014) – The timing and spatiotemporal patterning of Neanderthal disappearance. *Nature*, 512 (7514), 306–309.
DOI: [10.1038/nature13621](https://doi.org/10.1038/nature13621)
- Hoffmann D.L., Standish C.D., García-Díez M., Pettitt P.B., Milton J.A., Zilhão J., Alcolea-González J.J., Cantalejo-Duarte P., Collado H., de Balbín R., Lorblanchet M., Ramos-Muñoz J., Weniger G.-Ch., Pike A.W.G. (2018) – U–Th dating of carbonate crusts reveals Neandertal origin of Iberian cave art. *Science*, 359 (6378), 912–915.
DOI: [10.1126/science.aap7778](https://doi.org/10.1126/science.aap7778)
- Huang Y., Fairchild I.J., Borsato A., Frisia S., Cassidy N.J., McDermott F., Hawkesworth C.J. (2001) – Seasonal variations in Sr, Mg and P in modern speleothems (Grotta di Ernesto, Italy). *Chemical Geology*, 175, 429–448.
DOI: [10.1016/S0009-2541\(00\)00337-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00337-5)
- Johnson K., Hu C., Belshaw N., Henderson G. (2006) – Seasonal trace-element and stable-isotope variations in a Chinese speleothem: The potential for high-resolution paleomonsoon reconstruction. *Earth and Planetary Science Letters*, 244, 394–407.
DOI: [10.1016/j.epsl.2006.01.064](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.01.064)
- Labuhn I., Genty D., Vonhof H., Bourdin C., Blamart D., Douville E., Ruan J., Cheng H., Edwards R.L., Pons-Branchu E., Pierre M. (2015) – A high-resolution fluid inclusion delta O-80 record from a stalagmite in SW France: modern calibration and comparison with multiple proxies, *Quaternary Science Review*, 110, 152–165.
DOI: [10.1016/j.quascirev.2014.12.021](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.12.021)
- Lanos P., Dufresne P. (2019) – ChronoModel version 2.0: Software for Chronological Modelling of Archaeological Data using Bayesian Statistics. www.chronomodel.fr
- Latham A.G., Schwarcz H.P., Ford D.C. (1987) – Secular variation of the Earth's magnetic field from 18.5 to 15.0 ka BP, as recorded in a Vancouver Island stalagmite. *Revue canadienne des sciences de la Terre*, 24 (6), 1235–1241.
DOI: [10.1139/e87-117](https://doi.org/10.1139/e87-117)
- Mallick R., Frank N. (2002) – A new technique for precise uranium-series dating of travertine micro-samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66, 4261–4272.
DOI: [10.1016/S0016-7037\(02\)00999-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)00999-7)
- Martínez-Pillado V., Aranburu A., Arsuaga J., Ruiz-Zapata B., Gil-García M., Stoll H., Yusta I., Iriarte E., Carretero J., Edwards R., Cheng H. (2014) – Upper Pleistocene and Holocene palaeoenvironmental records in Cueva Mayor karst (Atapuerca, Spain) from different proxies: speleothem crystal fabrics, palynology, and archaeology. *International Journal of Speleology*, 43, 1–14.
DOI: [10.5038/1827-806x.43.1.1](https://doi.org/10.5038/1827-806x.43.1.1)
- Mazel A.D., Watchman A.L. (2003) – Dating rock paintings in the uKhahlamba-Drakensberg and the Biggarsberg, KwaZulu-Natal, South Africa. *Southern African Humanities*, 15(1), 59–73.
<https://hdl.handle.net/10520/EJC84739>
- McDermott F. (2004) – Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. *Quaternary Science Reviews*, 23, 901–918.
DOI: [10.1016/j.quascirev.2003.06.021](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.06.021)
- McGarry S.F., Caseldine C. (2004) – Speleothem Palynology: an undervalued tool in Quaternary studies. *Quaternary Science Reviews*, 23, 2389–2404.
DOI: [10.1016/j.quascirev.2004.06.007](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.06.007)
- Nagra G., Treble P.C., Andersen M.S., Bajo P., Hellstrom J., Baker A. (2017) – Dating stalagmites in mediterranean climates using annual trace element cycles. *Nature Scientific Reports*, 7 (1), 1–12.
DOI: [10.1038/s41598-017-00474-4](https://doi.org/10.1038/s41598-017-00474-4)
- Office of the President of the Republic of Slovenia (2016) – Slovenian President Borut Pahor and Polish President Andrzej Duda appeal to commemorate the Slovenian-Polish friendship. Press Release, Speech, President of the Republic of Slovenia, 09-05-2016.
<http://www.up-rs.si/up-rs/uprs-eng.nsf/pages/D33EAB9567F9EEDDC1257FE10028ABB4?OpenDocument>
- Parat A. (1906) – Les grottes de la Cure. La Grande Grotte d'Arcy. La

- Botanique aux grottes d'Arcy il y a un siècle. Bulletin de la Société des Sciences Historiques et Naturelles de l'Yonne, 1er semestre 1905, 9–34.
- Pentecost A. (2005)** – Travertine Dating. In Pentecost, A. (Eds.): Travertine. Springer Netherlands, 243–251.
[DOI: 10.1007/1-4020-3606-X](https://doi.org/10.1007/1-4020-3606-X)
- Perrette Y., Delannoy J.-J., Genty D., Destombes J.-L., Quinif Y. (1997)** – Enregistrement de l'activité charbonnière dans les spéléothèmes de Choranche (Vercors, France). Proceedings of the 12th Congress of Speleology, Switzerland, 1, 61–64.
- Perrette Y., Poulenard J., Saber A.-I., Fanget B., Guittonneau S., Ghaleb B., Garaudee S. (2008)** – Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in stalagmites: Occurrence and use for analyzing past environments. *Chemical Geology*, 251, 67–76.
[DOI: 10.1016/j.chemgeo.2008.02.013](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.02.013)
- Petit C., Brochier J.É., Curie J., Desachy B., Fontana L., Slimak L., Vandavelde S. (2018)** – À la recherche du temps court : l'approche micro-chronologique en archéologie. In Andrieu, C., Houdart, S. (Eds.) : La Composition Du Temps. Prédications, Événements, Narrations Historiques, Colloques de La Maison Archéologie et Ethnologie, René-Ginouvès. Paris, 15, 19–38.
- Pons-Branchu E. (2001)** – Datation haute résolution de spéléothèmes (230 Th/234 U et 226 Ra/238 U) : application aux reconstitutions environnementales autour des sites du Gard et du Meuse/Haute Marne. Thèse de Doctorat, Aix-Marseille 3, 216 p.
- Pons-Branchu E., Bourrillon R., Conkey M.W., Fontugne M., Fritz C., Gárate D., Quiles A., Rivero O., Sauvet G., Tosello G., Valladas H., White R. (2014a)** – Uranium-series dating of carbonate formations overlying Paleolithic art: interest and limitations. *Bulletin de la société préhistorique française*, 111 (2), 211–224.
- Pons-Branchu E., Douville E., Roy-Barman M., Dumont E., Branchu P., Thil F., Frank N., Bordier L., Borst W. (2014b)** – A geochemical perspective on Parisian urban history based on U–Th dating, laminae counting and yttrium and REE concentrations of recent carbonates in underground aqueducts. *Quaternary Geochronology*, 24, 44–53.
[DOI: 10.1016/j.quageo.2014.08.001](https://doi.org/10.1016/j.quageo.2014.08.001)
- Quinif Y. (1996)** – Enregistrement et datation des effets sismo-tectoniques par l'étude des spéléothèmes. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 119, 1–13.
- Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Butzin M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kromer B., Manning S.W., Muscheler R., Palmer J.G., Pearson C., van der Plicht J., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Turney C.S.M., Wacker L., Adolphi F., Büntgen U., Capano M., Fahrni S.M., Fogtmann-Schulz A., Friedrich R., Köhler P., Kudsk S., Miyake F., Olsen J., Reinig F., Sakamoto M., Sookdeo A., Talamo S. (2020)** – The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62 (4), 725–757.
[DOI: 10.1017/RDC.2020.41](https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41)
- Renault-Miskovsky J., Texier J.-P. (1980)** – Intérêt de l'analyse pollinique détaillée dans les concrétions de grotte. Application à l'Abri Pié-Lombard (Tourettes-sur-Loup, Alpes maritimes). *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, 17 (3), 129–134.
- Roberts M.S., Smart P.L., Baker A. (1998)** – Annual trace element variations in a Holocene speleothem. *Earth and Planetary Science Letters*, 154 (1-4), 237–246.
[DOI: 10.1016/S0012-821X\(97\)00116-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00116-7)
- Slimak L. (sous presse)** – Industries lithiques des niveaux I à B. Introductions à la sociodiversité des dernières sociétés du Paléolithique moyen de l'espace méditerranéen français. In Slimak L., Giraud Y., Metz L., Yvorra P. (Eds.), *Des Derniers Néandertaliens Aux Premiers Hommes Modernes En France Méditerranéenne. Les Données de La Grotte Mandrin à Malataverne, Artisanats & Territoires 3*, Aix-en-Provence.
- Stahlschmidt M.C., Collin T.C., Fernandes D.M., Bar-Oz G., Belfer-Cohen A., Gao Z., Jakeli N., Matskevich Z., Meshveliani T., Pritchard J.K., McDermott F., Pinhasi R. (2019)** – Ancient Mammalian and Plant DNA from Late Quaternary Stalagmite Layers at Solkota Cave, Georgia. *Scientific Reports*, 9 (1), 6628.
[DOI: 10.1038/s41598-019-43147-0](https://doi.org/10.1038/s41598-019-43147-0)
- Stoll H.M., Müller W., Prieto M. (2012)** – I-STAL, a model for interpretation of Mg/Ca, Sr/Ca and Ba/Ca variations in speleothems and its forward and inverse application on seasonal to millennial scales. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13 (1), 1–27.
[DOI: 10.1029/2012GC004183](https://doi.org/10.1029/2012GC004183)
- Timperman M. (1989)** – La grotte de Han : au fil des siècles..., Lavaux-Sainte-Anne : Timperman, Michel, Imprimerie Duculot, édit. Gembloux, Belgique, 66 p.
- Treble P., Shelley J.M.G., Chappell J. (2003)** – Comparison of high resolution sub-annual records of trace elements in a modern (1911–1992) speleothem with instrumental climate data from southwest Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 216 (1-2), 141–153.
[DOI: 10.1016/S0012-821X\(03\)00504-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00504-1)
- Vaks A., Bar-Matthews M., Ayalon A., Matthews A., Halicz L., Frumkin A. (2007)** – Desert speleothems reveal climatic window for African exodus of early modern humans. *Geology*, 35 (9), 831–834.
[DOI: 10.1130/g23794a.1](https://doi.org/10.1130/g23794a.1)
- Vandavelde S. (2019)** – Y'a pas de suie sans feu ! Étude micro-chronologique des concrétions fuligineuses. Étude de cas : le site paléolithique de la Grotte Mandrin (France). Thèse de Doctorat, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 660 p.
- Vandavelde S., Bonneau A., Brochier J., Genty D., Lacour J.-L., Petit C., Quéré C., Slimak L. (2018a)** – Fuliginochronology: a new way of studying fire events chronicles, examples of speleothem deposits as archives. In UISPP 2018, session IV-4. Fire as an artifact: Advances in the study of Paleolithic combustion features, Paris.
- Vandavelde S., Brochier J.É., Desachy B., Petit C., Slimak L., (2018b)** – Sooted concretions: A new Micro-chronological Tool for High Temporal Resolution Archaeology. *Quaternary International*, 474 (B), 103–118.
[DOI: 10.1016/j.quaint.2017.10.031](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.10.031)
- Vandavelde S., Brochier J.É., Petit C., Slimak L. (2017)** – Establishment of occupation chronicles in Grotte Mandrin using sooted concretions: rethinking the Middle to Upper Paleolithic transition. *Journal of Human Evolution*, 112, 70–78.
[DOI: 10.1016/j.jhevol.2017.07.016](https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2017.07.016)
- Vandavelde S., Lacour J.-L., Quéré C., Petit C., Slimak L. (accepté)** – L'identification du rythme annuel de précipitation des carbonates pariétaux pour un calage micro-chronologique des occupations archéologiques pyrogéniques: le cas de la Grotte Mandrin (Malataverne, Drome, France). *Bulletin de la Société Géologique de*

France.

Vansteenberghe S., de Winter N.J., Sinnesael M., Xueqin Z., Verheyden S., Claeys P. (2020) – Benchtop μ XRF as a tool for speleothem trace elemental analysis: Validation, limitations and application on an Eemian to early Weichselian (125–97 ka) stalagmite from Belgium. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 538, 109460.

[DOI: 10.1016/j.palaeo.2019.109460](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.109460)

Verheyden S., Baele J.-M., Keppens E., Genty D., Cattani O., Cheng H., Lawrence E., Zhang H., Van Strijdonck M., Quinif Y. (2006) – The Proserpine Stalagmite (Han-sur-Lesse Cave, Belgium): Preliminary Environmental Interpretation of the Last 1000 Years as Recorded in a Layered Speleothem. *Geologica Belgica*, 9 (3-4), 245–256.

Watchman A.L., David B., McNiven I.J., Flood J.M. (2000) – Micro-archaeology of Engraved and Painted Rock Surface Crusts at Yiwarrlarlay (the Lightning Brothers site), Northern Territory, Australia. *Journal of Archaeological Science*, 27 (4), 315–325.

[DOI: 10.1006/jasc.1999.0479](https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0479)

Watson P.J., Yarnell R.A. (1966) – Archaeological and Paleoethnobotanical Investigations in Salts Cave, Mammoth Cave National Park, Kentucky. *American Antiquity*, 31 (6), 842–849.

[DOI: 10.2307/2694457](https://doi.org/10.2307/2694457)

West M., Ellis A.T., Potts P.J., Strelci C., Vanhoof C., Wegrzynek D., Wobruschek P. (2009) – Atomic spectrometry update. X-Ray fluorescence spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 24 (10), 1289–1326.

Wong C.I., Breecker D.O. (2015) – Advancements in the use of speleothems as climate archives. *Quaternary Science Reviews*, Novel approaches to and new insights from speleothem-based climate reconstructions, 127, 1–18.

[DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.07.019](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.07.019)

Woodhead, J., Pickering, R., (2012) – Beyond 500 ka: Progress and prospects in the UPb chronology of speleothems, and their application to studies in palaeoclimate, human evolution, biodiversity and tectonics. *Chemical Geology*, 322–323, 290–299.

[DOI: 10.1016/j.chemgeo.2012.06.017](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.06.017)

Woodhead J., Reisz R., Fox D., Drysdale R., Hellstrom J., Maas R., Cheng H., Edwards R.L. (2010) – Speleothem climate records from deep time? Exploring the potential with an example from the Permian. *Geology*, 38 (5), 455–458.

[DOI: 10.1130/G30354.1](https://doi.org/10.1130/G30354.1)

Abridged English version

Speleothems (carbonated cave deposits) are natural archives that are characterized by their ability to record past environments as well as by their high temporal resolution, especially when laminated annually. Their potential for study is not limited to research on palaeo-climatic reconstructions. For example, speleothems can trap anthropogenic particles such as soot, and these fuliginous speleothems have a high informative potential in archaeology. In this paper, we will present the potential archaeological applications of fuliginochronological analysis in several cases, in different temporal contexts.

The most recent cases (in Slovenia, Belgium, and France), for which we sometimes have historical and textual information allowing us to check the recorded archaeological facts, will make it possible to validate the

micro-chronological archival potential of speleothems in the context of a fuliginochronological study. For example in Postojna cave, Slovenia (fig. 1), a dating precise to the year could be advanced thanks to the counting of the growth laminae of the speleothems and the identification of marker horizons caused by historical events. While it is not always possible to give a date precise to the year, or to the day thanks to the cross-referencing of geological data with textual data like in the case of Postojna, it is sometimes the duration of frequentation periods that can be estimated to the year. For example, in Han-sur-Lesse cave in Belgium (fig. 2), soot has always been found in the same place in the speleothem's growth laminae, showing seasonal occupation of the site during 73 years. In the Arcy-sur-Cure Great Cave, in France (fig. 3), studies have not yet focused on dating to an exact year, but we have been able to identify at least two phases of recent occupations based on the identification of two generations of soot films in stalagmites. We also show evidence of deliberate breakage, probable witnesses of the exploitation of speleothems for the construction of artificial caves at the end of the 18th century. At the Villars Cave, also in France (fig. 4), micro-charcoals were observed in a large stalagmite. These, resulting from deforestation by fire above the cave, have percolated within seepage waters and have been incorporated into the speleothem. This last case shows that the action of humans on their environment, from the occupation of caves to the use of fire in the process of deforestation, can be effectively recorded in the underground world, in the high temporal resolution archives that are the speleothems.

The speleothems can therefore be considered as historical archives, whose reliability could be checked here on some well-known cases, such as that of the Postojna Cave. And since the study of recent carbonated crusts could show that historically known events could be recorded in carbonated deposits, it is logical to suppose that the study of ancient carbonated crusts can inform archaeologists about past events for which we have no other trace. We therefore extend the use of this method to a French Palaeolithic site in order to highlight the informative potential of this approach in Prehistory. Indeed, in Mandrin Cave in France (fig. 5-9, tab. 1), we were able to retrace chronicles of prehistoric human occupations thanks to the fuliginochronological study of speleothems. The chronological resolution obtained at this prehistoric site is here comparable to that obtained at the more recent site of Han-sur-Lesse. And as at Postojna, Han-sur-Lesse, and Arcy-sur-Cure, human presence at the site was indeed recorded in soot film speleothems.

The historical cases presented in this article allow us to validate this method of fuliginochronology by demonstrating the recording of sometimes historically known events and especially by showing its relevance and reliability in recent contexts with concretions that are easier to study than those of the Mandrin Cave. The possibility of extending this type of pioneering studies to caves and rock shelters of all ages and regions, from the Lower Paleolithic with the first traces of fire to medieval and even contemporary times, is real. Only the research issues and the implications of the results will differ according to the contexts.