

L'association « chemins de bulles – folia » : un indicateur morpho-sédimentaire de spéléogénèse hypogène par dégazage carbonique. Le cas de la grotte de l'Adaouste (Provence, France)

The association between bubble trails and folia: a morphological and sedimentary indicator of hypogenic speleogenesis by degassing, example from Adaouste Cave (Provence, France)

Philippe Audra⁽¹⁾, **Ludovic Mocochain**⁽²⁾, **Jean-Yves Bigot**⁽³⁾ et **Jean-Claude Nobécourt**⁽⁴⁾

(1) Polytech'Nice-Sophia, Université de Nice – Sophia-Antipolis, 1645 route des Lucioles, 06410 Biot ; audra@unice.fr

(2) Aix-Marseille Université, CEREGE, Europôle de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix-en-Provence cedex 4 et Centre de Sédimentologie - Paléontologie « Géologie des systèmes carbonatés », 13331 Marseille, cedex 03 ; ludomocochain@gmail.com

(3) Association française de karstologie (A. F. K.) ; catherine.arnoux@club-internet.fr

(4) Association française de karstologie (A. F. K.) ; jcnobecourt@free.fr

Résumé - Les chemins de bulles sont des formes de corrosion subaquatique creusées par les bulles de gaz carbonique ; les folia sont des dépôts de calcite des nappes saturées ressemblant à des gours inversés. En s'appuyant sur l'étude morphologique de la grotte de l'Adaouste (Provence) et sur les travaux réalisés dans les autres sites mondiaux, nous proposons un modèle de genèse pour les folia, proche de celui de D.J. Green [1991]. L'association chemins de bulles - folia, présente sous les parois surplombantes, est interprétée comme un indicateur de dégazage hypogène agissant juste en-dessous de la surface piézométrique. Cette association résulte de la juxtaposition de processus de corrosion localisés le long des chemins de bulles et d'une précipitation généralisée de calcite dans les bassins sursaturés.

Mots-clés : chemins de bulles, folia, dégazage carbonique, spéléogénèse hypogène, grotte de l'Adaouste.

Abstract- *Bubble trails are subaqueous features in carbonate caves, which are made by the corrosion of ascending carbon dioxide bubbles. Folia are calcite deposits resembling inverted rimstone dams in saturated pools. Based on morphological studies in Adaouste Cave (Provence, France) and on studies elsewhere in the world, we propose a new genetic model for folia, close to the model of D.J. Green [1991]. The association of bubble trails and folia, occurring on overhanging walls, is interpreted to be an indicator of hypogenic degassing occurring just below the water table. The association is the result of juxtaposed processes composed of corrosion along bubble trails and calcite deposition in calcite-saturated pools.*

Key words: bubble trails, folia, carbonic degassing, hypogenic speleogenesis, Adaouste Cave.

Introduction

Les chemins de bulles sont de petites cannelures ascendantes formées en milieu aquatique par corrosion d'eau rendue agressive par les bulles de gaz carbonique. Les folia sont une des formations de calcite les plus rares et les plus curieuses : ce sont des enduits de calcite subaquatiques, à la morphologie très particulière en « gours inversés ». Leur genèse était encore débattue et plusieurs hypothèses ont été avancées, que l'on peut réduire à deux processus : dépôts de surface de nappe d'eau (gours subissant des oscillations de niveau) ou bien concrétions subaquatiques de cavités hydrothermales. Dans la grotte de l'Adaouste (Provence, France), les chemins de bulles et les folia sont en

intime association, paradoxe apparent pour des formes respectivement de corrosion et de précipitation.

Cet article présente une analyse précise de leur morphologie et de leurs répartition spatiale, fournissant une meilleure compréhension de leur genèse et de leur signification.

Nos observations des chemins de bulles et des folia de la grotte de l'Adaouste, confrontées aux données des autres sites, permettent d'orienter leur genèse vers une origine hypogène par dégazage. De plus, l'association chemins de bulles - folia est un indicateur discriminant de la spéléogénèse hypogène par dégazage carbonique, particulièrement utile pour l'interprétation des cavités hypogènes inactives.

I- Théories génétiques antérieures

Les chemins de bulles n'ont été identifiés que récemment [Chiesi et Forti, 1987]. Si la découverte des folia est antérieure [Emerson, 1952], l'explication de leur genèse reste un sujet de débat.

I. A- Les chemins de bulles

Les chemins de bulles sont des chenaux lisses et réguliers imprimés sous les parois surplombantes. La section est approximativement semi-circulaire, d'un diamètre de 0,5 à 10 cm, allant d'une empreinte en creux peu marquée (figure 1.C) jusqu'à une rainure profonde (figure 1.D, 1.B). Leur tracé est globalement rectiligne, avec des

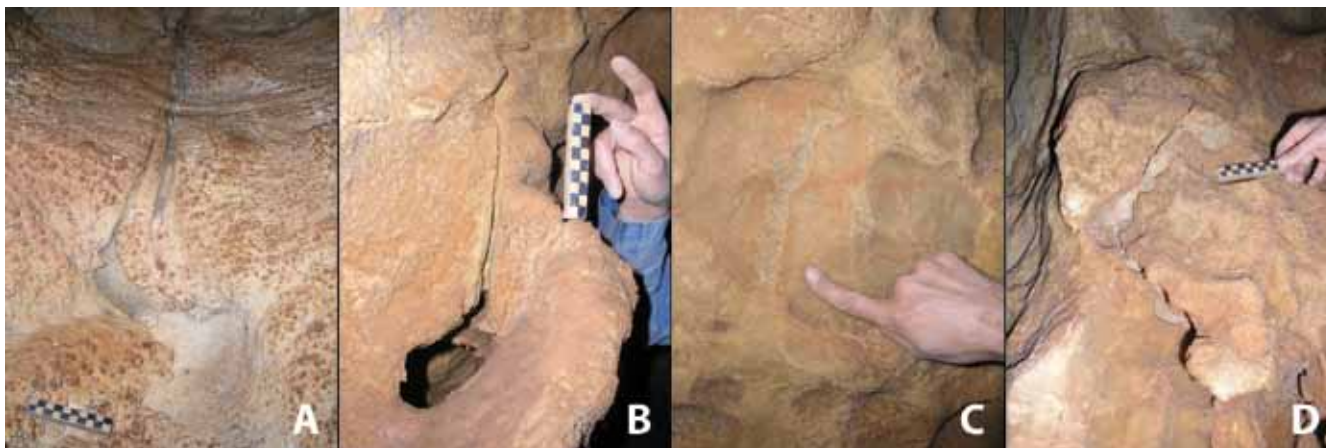


Figure 1 - Chemins de bulles dans la grotte de l'Adaouste. La corrosion est concentrée le long du chenal, alors que le reste de la paroi est couvert d'un enduit de calcite subaquatique. A et D : vues de dessous ; B et C : vues de face (clichés J.-Y. Bigot, <http://catherine.arnoux.perso.neuf.fr/photo/13/adao/adao.htm>)

Bubble trails in Adaouste Cave. Corrosion is limited to the channel, whereas the rest of the wall is covered with a subaqueous calcite coating. A and D: views from below; B and C: front views.

sinuosités qui suivent les lignes de plus grande pente (figure 1.A). Ils ont été identifiés dans les cavités de la contrée minière de l'Iglesiente en Sardaigne [Chiesi et Forti, 1987]. Ils sont aussi mentionnés dans les cavités d'origine sulfurique comme les grotte di Frasassi en Italie [Galdenzi et Sarbu, 2000]. En Hongrie, ils ont d'abord été reconnus dans Ferenc-Hegy barlang, puis dans d'autres cavités des collines de Buda, dans les autres massifs karstiques (Bükk, Pilis), ainsi qu'au bord du lac Balaton dans Tapolca barlang [Szabó, 2005]. Leur développement est lié au dégazage carbonique [Chiesi et Forti, 1987]. À la grotta Santa Barbara 2, ce dégazage est associé à l'oxydation de sulfures métalliques [De Waele et Forti, 2006]. En profondeur, le dioxyde de carbone reste en solution du fait des fortes pressions. Les flux hypogènes ascendants, fortement chargés en gaz carbonique, dégazent suite à la baisse de la pression. Ce dégazage se produit à quelques mètres de profondeur sous le toit de la zone noyée, au maximum 15-30 m [Luiszer, 1997]. Les bulles libérées convergent

vers les points hauts et cheminent selon les lignes de plus grande pente le long des plafonds surplombants. L'eau est rendue agressive au contact des bulles de gaz carbonique. L'action corrosive de la remontée du gaz le long d'un cheminement invariable sculpte le chemin de bulles. Ce modèle de corrosion est probablement beaucoup plus fréquent que dans les quelques cas mentionnés. Il doit théoriquement être présent dans la plupart des cavités hypogènes subissant un dégazage carbonique. *A contrario*, il est pratiquement inexistant dans les autres types de cavités dépourvues de ces caractéristiques. Il ne doit pas être confondu avec les autres types de chenaux de paroi ou de plafond (chenaux paragénétiques, chenaux de convection hydrique [Klimchouk, 2007], chenaux de condensation-corrosion [Audra, 2007], etc.).

I. B- Les folia [Hill et Forti, 1997]

Les folia sont des concrétions ressemblant à des gours inversés. Ils sont disposés en ondulations

rubanées, tels des feuillets, d'où leur nom (figure 2). Leur croissance est orientée vers le bas. Ils se développent exclusivement à partir de parois surplombantes ou de plafonds inclinés qu'ils recouvrent entièrement. La bordure inférieure d'un folia peut être horizontale ou inclinée de plusieurs degrés. Les rubans ont en moyenne 1 cm d'épaisseur, sont distants de moins de 10 cm, et séparent des creux remontant jusqu'à 5 cm à l'intérieur de l'édifice. La manière dont les lamelles de ces rubans ondulés se raccordent évoque les lamelles d'un champignon. Parfois, ils sont influencés par un courant et disposés parallèlement à sa direction [Indian Burial Cave ; Green, 1991]. Du point de vue microscopique, la calcite cristallise initialement selon une fabrique microcristalline dendritique. Par la suite, la texture dendritique poreuse se remplit de cristaux en colonnes pouvant atteindre 10 mm de longueur [Kolesar et Riggs, 2004]. Ces cristaux dendritiques et squelettiques sont caractéristiques d'une croissance rapide et d'un apport limité de matière. Pour les solutions



Figure 2 - Folia dans la grotte de l'Adaouste. À gauche : les folia se développent exclusivement sous les parois et plafonds surplombants ; au centre : vue de face vers le haut montrant les « gours inversés » ; à droite : vue de dessous montrant le développement vers l'extérieur et vers le bas en coupelles inversées (clichés J.-Y. Bigot, <http://catherine.arnoux.perso.neuf.fr/photo/13/adao/adao.htm>).

Folia in Adaouste Cave. Left: folia occur exclusively below overhanging walls; center: front view toward the top showing the "inverted rimstone" morphology; right: view from below showing the outward and downward development as inverted cups.

carbonatées, ils résultent souvent des fluctuations de pression associées au dégazage mécanique, comme aux extrémités des stalactites [Maltsev, 1999]. Les folia se localisent sous la surface piézométrique, jusqu'à quelques mètres ou quelques dizaines de mètres de profondeur. Plus rarement, ils matérialisent une surface piézométrique oscillante, par un dépôt pariétal annulaire horizontal de quelques centimètres à quelques décimètres d'ampleur verticale (Hurricane Crawl Cave, Devil's Hole). Les folia sont fréquemment associés aux concrétions subaquatiques élaborées à partir de dépôt abondant de calcite dans les bassins sursaturés : enduits mamelonnés et *clouds*, calcite flottante, tourelles de calcite, *tower cones* (i.e. cônes constitués de radeaux de calcite flottante). Tous ces dépôts sont généralement, mais pas systématiquement, provoqués par les dégazages hypogènes amenant les bassins à sursaturation.

Les folia furent initialement identifiés dans Indian Burial Cave, Nevada [Emerson, 1952]. Ils sont répertoriés dans une bonne vingtaine de cavités, actives ou non (tableau 1 en fin de texte). Ces sites correspondent fréquemment à des cavités thermales. Néanmoins, le thermalisme ne semble pas être un facteur déterminant : la température de l'eau et les températures de cristallisation déduites des inclusions fluides des calcites s'étendent sur un large spectre (de 20 à 120 °C) ; Hurricane Crawl est par exemple une cavité épigène froide. Deux principaux modes de genèse ont été proposés :

1. Par oscillation d'une surface de bassin saturé [Davis, 1997]. La précipitation à la surface des bassins saturés est favorisée par l'évaporation [Halliday, 1954a ; Davis 1973 ; Jennings, 1982]. La précipitation peut être liée à un puissant dégazage, le gaz piégé oriente la croissance des folia autour des bulles, et les oscillations de surface sont essentielles dans la délimitation des niveaux supérieurs et inférieurs des dépôts de folia [Davis, 1997]. La précipitation s'effectue soit directement par dépôt de particules de calcite, soit par l'intermédiaire de calcite flottante ; C.A. Hill [1987] explique qu'après l'abaissement de la nappe, les bords inclinés se forment à la manière de draperies, sur lesquelles peuvent se développer des choux-fleurs. P.T. Kolesar et A.C. Riggs [2004] associent les folia aux oscillations de la nappe sous l'effet des marées terrestres, ce qui favoriserait le

dépôt de calcite par dégazage et sursaturation du film lors de la descente de la nappe.

2. Par dégazage en zone noyée dans les eaux thermales [Green, 1991, 1997]. Les bulles de CO₂ provenant du dégazage sont piégées sous les irrégularités des parois. La petite poche de gaz concentre le dépôt de calcite à la périphérie de la bulle et oriente la croissance vers le bas. Les « déversements » successifs des bulles vers le haut élaborent ces structures en gours inversés. Les écoulements thermaux ascendants concentrent la précipitation sous les plafonds surplombants.

Devant l'ensemble des théories et observations, C.A. Hill et P. Forti [1997] concluent en l'ignorance des facteurs précis de localisation (bassins perchés, surface piézométrique, ou faible profondeur dans la zone noyée?) et ne tranchent pas quant à leur genèse. Néanmoins, ils admettent une relation étroite avec la surface piézométrique, avec les formations de calcite subaquatique telles que les *clouds* et enduits mamelonnés, ainsi qu'avec les formations de bassins telles que la calcite flottante.

II- Observations dans la grotte de l'Adaouste

La grotte de l'Adaouste s'ouvre sous le sommet de l'anticlinal de Mirabeau. Ce pli est entaillé en cluse par la vallée de la Durance, qui suit une faille décrochante active, jalonnée de sources thermo-minérales [Audra, Bigot et Mocochain, 2002].

II. A- Contexte de la grotte de l'Adaouste

La convergence d'ascendances hypogènes le long du flanc de l'anticlinal de Mirabeau a été favorisée par la position haute de l'aquifère. L'émergence se localisait à l'intersection entre la charnière de l'anticlinal et l'entaille de la vallée, jouant le rôle de niveau de base régional. La grotte de l'Adaouste fut probablement active au Tortonien (11 Ma), lors du début de l'incision de la cluse de la Durance. Au Messinien, la principale phase d'incision de la cluse [Clauzon, 1979] provoqua l'abandon de la cavité perchée et préservée des remaniements ultérieurs notables. Les mesures de température d'homogénéisation (TH) des inclusions fluides de la calcite, bien que non fiables, pourrait suggérer une tendance de températures de cristallisation plus élevées que dans des eaux météoriques [Audra et Häuselmann, 2004]. Des dépôts métalliques de Fe et Mn, ayant conservé des traces microbiennes sous forme de *poolfingers*, sont associés aux vides hypogènes du secteur [Audra et Hofmann, 2004]. La cavité est composée de deux conduits inclinés suivant le pendage du flanc d'anticlinal et remontant de près de 200 m de profondeur (figure 3). Ces conduits inclinés se raccordent aux niveaux supérieurs, constitués de deux étages horizontaux (-18 et -27) qui matérialisent les niveaux successifs du toit de la zone noyée [Audra, Bigot et Mocochain, 2002]. Les étages horizontaux portent les traces d'une condensation-corrosion intense en liaison avec la nappe thermale

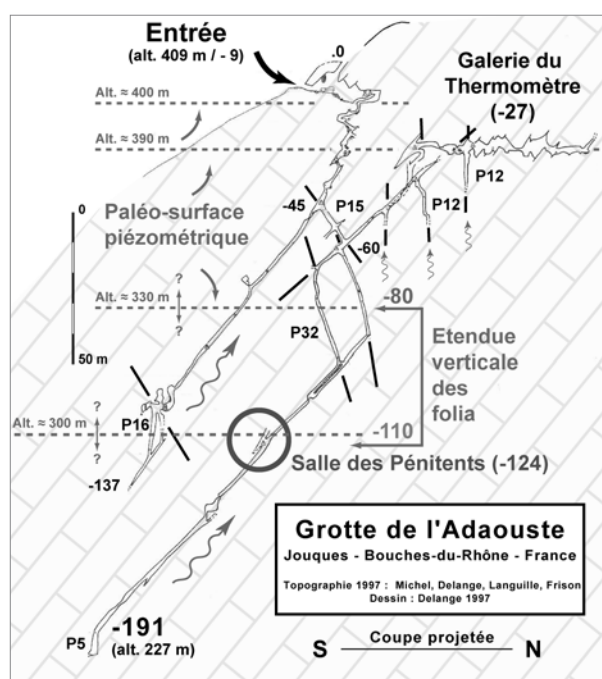


Figure 3 – Coupe de la grotte de l'Adaouste. Les flux hypogènes (flèches ondulées) remontent par les conduits suivant le pendage et par les fractures directrices (traits noirs) ; les étages horizontaux matérialisent les positions successives du toit de la zone noyée.

Adaouste Cave survey. Hypogenic flow (undulated arrows) welled up through conduits along dip and through fissures (black lines); horizontal levels record past water table positions.

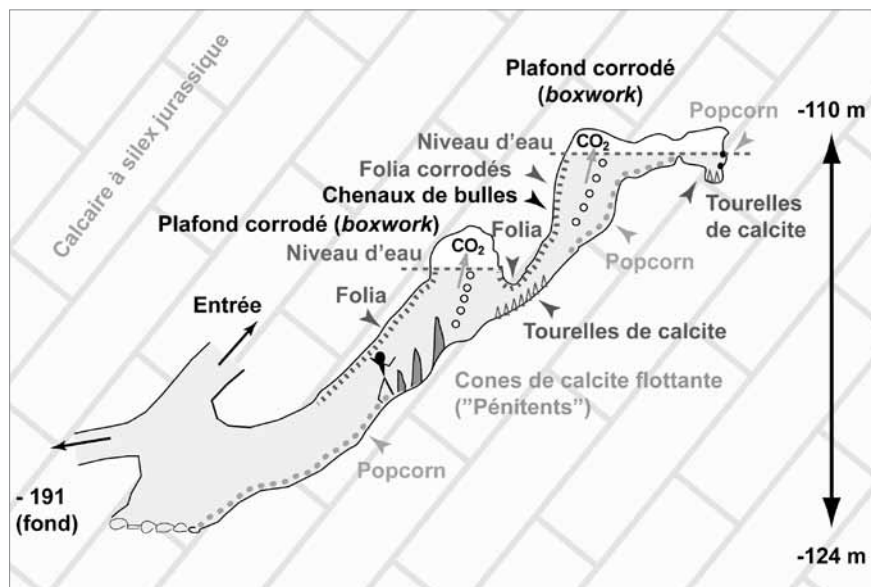


Figure 4 – Salle des Pénitents, anciennes cloches aveugles noyées, dont les parties supérieures piégeaient du CO₂ de dégazage sous le niveau piézométrique. Répartition des modèles de corrosion atmosphérique et des dépôts de calcite subaquatique.

The Penitents Chamber, an ancient blind phreatic conduit where the cupolas were filled with CO₂ from degassing. Distribution of features originating from atmospheric corrosion and subaqueous calcite deposition.

alors proche [Audra, Hobléa et al., 2007]. Sous le toit de la zone noyée, la corrosion est concentrée dans les chemins de bulles. En profondeur, le gaz carbonique était piégé dans des cloches aveugles sous pression, donnant une atmosphère hyper-corrosive où la condensation-corrosion a façonné en plafond du *boxwork* et au sol des trous de stillation (figure 4, 5). Corrélativement, le dégazage provoquait la sursaturation des eaux et le dépôt massif de calcite, en morphologies variées : au-dessus de la nappe, popcorn ; à la surface de la nappe, calcite flottante ; sous la surface de la nappe, *tower cones*, folia, tourelles de calcite [Audra, Bigot et Mocochain, 2002]. Les interfaces eau/gaz sont très nettes, matérialisant bien les transitions entre corrosion atmosphérique et précipitation subaquatique (figure 5).

II. B- Folia et chemins de bulles dans la salle des Pénitents

Les investigations ont été conduites dans la salle des Pénitents (-124 m), ainsi que dans le conduit principal au-dessus de la salle (figure 4). La richesse des modèles de corrosion et des dépôts de calcite subaquatiques dans cette zone nous a permis d'établir une relation plus particulièrement entre chemins de bulles et folia. Les chenaux convergent vers le haut et peuvent atteindre plusieurs mètres de long avant de se raccorder à des cloches fermées (figure 1.A) ou

finissent par disparaître lorsque les parois surplombantes se redressent. Aucun dépôt n'est présent dans le chenal. Lorsqu'une pellicule de calcite couvre les parois environnantes, elle est entaillée à l'emplacement du chenal (figure 1.C). Les folia se développent en continu entre -80 et -120 (figure 3). Dans les parties hautes, ils sont corrodés de manière très uniforme et partiellement recouverts de « chouxfleur » (*popcorn*) aérien. Dans les parties basses, ils ne sont pas corrodés. Un niveau de stagnation de la nappe est visible dans la salle des Pénitents, vers -110 m. La taille des folia s'accroît vers le haut par séquences de plusieurs mètres de dénivellation. De ces observations, on peut déduire que :

- après leur formation, les folia du haut (-80 à -95 m) ont été exondés suite à l'abaissement de la nappe, puis corrodés par condensation-corrosion ;
- les effets de la condensation-corrosion sont intenses dans les étages supérieurs, ils diminuent vers le bas et semblent ne plus agir en-dessous de -95 m ;
- les folia du bas (-95 à -120 m) se sont développés soit en même temps que ceux du haut, donc sur une dénivellation d'une quarantaine de mètres, soit postérieurement, quand la nappe est à nouveau descendue ;
- il ne semble pas que la nappe soit remontée, car les popcorns recouvrant les folia ne sont pas recouverts de calcite subaquatique ;

- l'augmentation de la taille des folia vers le haut exprime bien l'accroissement du volume de gaz, par le dégazage et le cumul des bulles remontantes.

II. C- Les bulles de folia

Nous avons observé plusieurs bulles de calcite dans les creux des folia. Nous dénommons cette formation « bulle de folia ». Elle présente un liseré de calcite qui enveloppe le contact eau/bulle, selon une croissance centripète. Le développement d'une telle forme nécessite la présence d'une solution passant en sursaturation à l'interface eau / bulle. Nous proposons l'hypothèse suivante (figure 6) :

- le flux thermique à travers la roche entretient le gradient thermique entre l'eau thermale et le toit rocheux ; un film de condensation apparaît à la voûte de la bulle, plus fraîche ;
- l'eau de condensation devient hyper-agressive dans l'atmosphère carbonique de la bulle ;
- l'eau corrosive dissout la calcite et ruisselle le long de la paroi. Cette migration entraîne sa saturation progressive ;
- arrivée au bas de la bulle, l'évaporation de l'eau entraîne une sursaturation ;

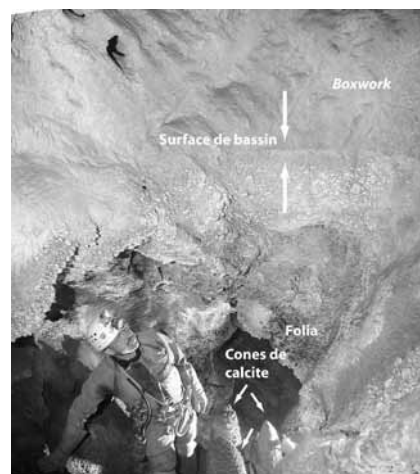


Figure 5 – Interface entre la poche de gaz carbonique aux parois corrodées en *boxwork* (haut) et les dépôts de calcite subaquatique en dessous (folia sur les parois surplombantes, *tower cones* sous le personnage) (cliché J.-Y. Bigot).

*Interface between a carbon dioxide-rich gas pocket with walls corroded as *boxwork* (top) and subaqueous calcite deposits below: folia below overhanging walls, tower cones below the cover.*

- la calcite précipite sur le bord intérieur du folia. Cette précipitation se propage le long de la bulle, au voisinage de l'interface eau-gaz. Comme ce processus impliquant une redistribution de la calcite reste limité, il est possible que l'accrétion de particules de calcite provenant du bassin saturé participe également à l'édification des bulles de folia.

III- Discussion : genèse des folia et association avec les chemins de bulles, enregistrement de la dynamique de la nappe thermique

Après analyse des hypothèses antérieures, un nouveau processus pour expliquer la genèse des folia est proposé.

III. A- Réfutation des hypothèses antérieures

III.A. 1- Oscillation de la surface d'un bassin saturé [Davis, 1997].

Le principal argument supportant cette hypothèse est que la limite supérieure régulière du dépôt de folia enregistre les lentes oscillations du bassin. Durant des oscillations, l'accrétion de particules développe vers le bas les folia. Le piégeage des bulles, suite aux remontées de la surface ou au dégazage, accentuerait ce processus. Cependant, nous identifions plusieurs arguments contredisant cette hypothèse :

- l'oscillation de la nappe d'un bassin saturé ne semble pas être une condition suffisante, car cette condition est présente dans tous les karsts développés sous végétation, alors que les folia sont rarissimes ;
- la présence systématique de folia sous les parois surplombantes exclut un simple mécanisme d'oscillation de surface de bassin, qui aurait des conséquences similaires sur les autres surfaces non surplombantes ;
- hormis leur limite supérieure, les folia ne montrent aucune structure horizontale qui aurait enregistré un niveau d'eau plus bas ;
- l'accrétion de particules et de calcite flottante devrait produire une texture aléatoire ; or, on observe une texture dendritique provenant de l'effet mécanique du dégazage [Maltsev 1999] ;
- leur morphologie si particulière en gours inverses n'est jamais clairement expliquée.

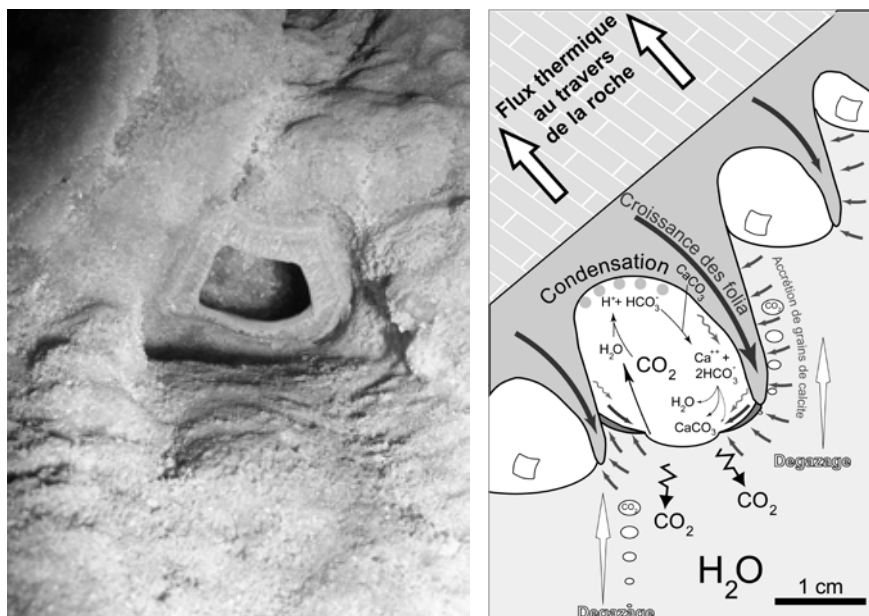


Figure 6 – À gauche : bulle de folia. L'ouverture est large d'environ 4 cm. À droite : section verticale présentant le processus probable de développement des folia et de formation des bulles de folia. Condensation-corrosion au toit de la bulle de gaz carbonique et évaporation-précipitation de calcite à la base de la bulle, à l'interface gaz / eau saturée. La calcite refermant la bulle est représentée en gris sombre. Les flèches blanches représentent le dégazage de CO_2 ; les flèches grises indiquent l'accrétion de calcite subaquatique ; les flèches noires indiquent la direction de croissance des folia (cliché J.-Y. Bigot).

Left: folia bubble. The aperture is about 4 cm wide. Right: folia and folia bubble development by condensation-corrosion at the top of the carbon dioxide bubble and then by calcite deposition through evaporation at the base of the bubble, at the interface between gas and saturated water. The calcite closing the bubble is shown in dark grey. White arrows show CO_2 degassing; grey arrows show subaqueous calcite particle accretion; black arrows show the growing direction of the folia.

III.A. 2- Dégazage en zone noyée dans les eaux thermales [Green, 1991, 1997].

Selon cet auteur, les particules de calcite apparaissent à la suite d'un dégazage provoqué par la soudaine chute de pression du fluide à la sortie d'un diaphragme ; les ascendances thermales remontent les particules et l'accrétion se produit autour des bulles de gaz piégées sous les irrégularités des parois surplombantes. Cette hypothèse est en grande partie validée par nos observations ; toutefois, certaines assertions doivent être réfutées :

- les folia sont certes fréquemment associées au thermalisme, mais pas systématiquement (tableau 1) ;
- la décompression à la sortie de diaphragme provoquant l'apparition de bulles par cavitation requiert des vitesses d'écoulement incompatibles avec tous les sites observés.

III. B- Nouveau processus pour la genèse des folia

Les hypothèses antérieures étant en grande en partie ou partiellement contestables, nous proposons un nouveau processus pour expliquer

la genèse des folia, en partie basé sur l'hypothèse de D.J. Green [1991, 1997] :

- sous le toit de la zone noyée, le dégazage de CO_2 produit des bulles qui remontent vers la surface ;
- les bulles sont piégées sous les irrégularités des parois surplombantes, puis se déversent en remontant de creux en creux ; nous l'avons effectivement observé dans la grotta Giusti en Toscane [Piccini, 2000] ;
- le dégazage entraîne une saturation de l'eau et une précipitation de la calcite hors des creux remplis par les bulles ; les irrégularités saillantes se développent vers le bas et vers l'extérieur ; par réaction positive, la croissance de la bordure inférieure permet l'augmentation de la taille de la bulle et ainsi de suite.

Les bulles de folia attestent indubitablement de phénomènes de cristallisation de calcite à l'interface eau / gaz. De sorte que la genèse des folia en conditions subaquatiques, liées au dégazage profond, se trouve ici vérifiée. Le piégeage des bulles de gaz est admis aussi bien par D.J. Green [1997] et D.G. Davis [1997], respectivement comme une

conséquence du dégazage ou comme un effet secondaire produit par la remontée de la surface du bassin. Nous démontrons que le piégeage des bulles issues d'un puissant dégazage est essentiel pour obtenir la morphologie creuse typique en gours inversés. Leur taille s'accroît vers le haut par cumul des bulles ascendantes. Par conséquent, nous pensons que les folia sont quasi-exclusivement associés à des phénomènes hypogènes avec dégazage. Seuls deux cas rarissimes «mimant» ces conditions hypogènes sont identifiés en contexte non hypogène :

1. Hurricane Crawl Cave où l'eau d'un karst de montagne fortement boisé dégaze dans les bassins sursaturés en entrant dans la grotte ;
2. cuevas de Bellamar - El Jarrito, Cuba [Hall, 2008], où le marnage piège mécaniquement des bulles d'air.

Le thermalisme ne semble pas être une nécessité, même s'il reste fréquent. Les écoulements ascendants hypogènes paraissent plus adéquats pour expliquer tant la morphologie des folia que le dégazage.

Nous démontrons également que les folia se développent par dégazage sous la surface piézométrique, jusqu'à une trentaine de mètres de profondeur [Luiszer, 1997]. Un dégazage brutal, plus profondément dans la zone noyée n'est pas réaliste. La limite supérieure du dégazage est la surface piézométrique, la limite inférieure est celle de l'apparition du dégazage. Ces deux limites déterminent l'amplitude verticale des folia. Dans ces conditions, l'oscillation de la surface d'une nappe (Devil's Hole) n'est plus une condition nécessaire, elle est seulement occasionnellement présente. L'ampleur verticale réduite des folia d'Hurricane Crawl Cave pourrait s'expliquer par un comblement de sédiment aujourd'hui disparu. Sur l'ampleur verticale maximale de la disposition des folia, nous n'avons que peu de données, mais elle serait de 40 m à Lechugilla et à l'Adaouste. Cette hauteur est tout à fait compatible avec l'ampleur verticale du dégazage, auquel peut s'ajouter un abaissement partiel de la nappe, ce qui est attesté à l'Adaouste.

III. C- L'association chemins de bulles – folia

Les chemins de bulles s'amorcent à partir des folia ou des cloches dans lesquelles s'est concentré le gaz carbonique (figure 7). La juxtaposition de ces deux formes, par transition nette et sans recouvrement (au sens stratigraphique), prouve qu'elles sont

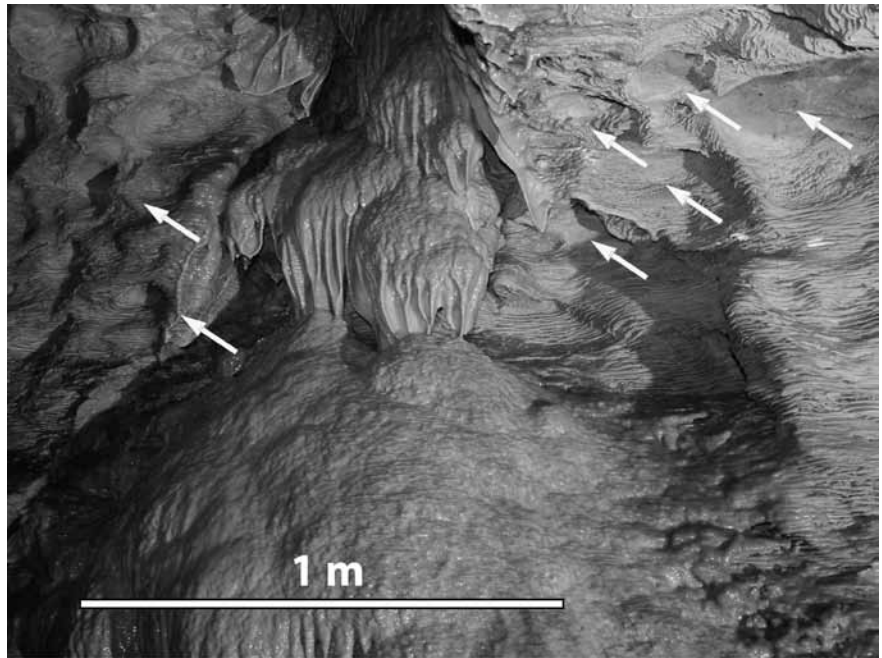


Figure 7 – Folia de Pál-Völgy barlang, Hongrie. Les flèches indiquent les cloches piégeant les bulles de gaz dans lesquelles la corrosion intense laisse voir l'encaissant rocheux. La coulée de calcite centrale est postérieure au dénuyage (cliché A. Kiss, avec autorisation).

Folia in Pál-Völgy barlang, Hungary. Arrows indicate cupolas where gas bubbles are trapped and where intense corrosion showing bare rock is clearly visible, whereas walls are covered with a thick folia coating. The flowstone in the center developed after draining.

contemporaines. Par ailleurs, leur association montre qu'elles participent à un processus commun, le dégazage carbonique. Cette association est régie par la géométrie de paroi : sans paroi surplombante, les bulles remontent verticalement dans l'eau ; ni folia ni chemins de bulles n'apparaissent ; sous paroi surplombante convexe, les bulles se déversent de folia en divergeant ; sous paroi surplombante concave, les bulles convergent vers une trajectoire invariable, un chemin de bulles apparaît progressivement dans le dièdre. Le chemin de bulles peut aboutir dans une cloche, qui se déverse ensuite dans un nouveau chemin de bulles.

III. D- Enregistrement de la position d'une surface piézométrique

Dans la grotte de l'Adaouste, la distribution verticale des folia, leur corrosion dans la partie supérieure, et leur disparition au-dessus de -120 m, permet de restituer la dynamique d'abaissement de la nappe thermale (figure 3). Ces indicateurs attestent :

- d'une présence de la nappe thermale vers -80 m, à l'origine de la corrosion des choux-fleurs sus-jacents et du dépôt des folia sous-jacents ;
- d'une descente de la nappe jusqu'aux environs du sommet de la salle

des Pénitents (environ -110 m) ; cette descente est responsable du rabotage par corrosion-condensation des folia sus-jacents et du dépôt des folia sous-jacents.

Ces indicateurs permettent d'associer la phase des folia à la fin de l'activité thermale dans la grotte de l'Adaouste.

III. E- Dépôts non-carbonatés et restriction de l'usage du terme « folia »

Des formes semblables peuvent être constituées de minéraux autres que la calcite.

1. Dans l'argile : Caves of the Wind et Orient Mine Cave, Colorado [Davis, 1982, 1984, 1997], Vass Imbre barlang [Maucha, 1993] et Matyas-Farras, Hongrie [Takacsné Bolner, 1993]. Cependant elles diffèrent morphologiquement des folia car les bordures ne s'imbriquent pas et elles ne forment pas des coupelles renversées individualisées. Étant trop fragiles pour être mises en place par les battements d'une nappe, ces bordures d'argile seraient déposées par une nappe turbide descendant régulièrement [Green, 1997].
2. Dans l'halite : Liquid Crystal Cave, Israël. Publiée initialement en tant que folia [Frumkin, 1997], il s'agit en fait de bordures de gours sursaturés [Frumkin, comm. perso.].

3. Dans le soufre : grotte de Villa Luz [Hose, Palmer *et al.*, 2000]. Ils sont formés de mondmilch constitué de soufre, présentant une morphologie de coupelles renversées et étagées. Néanmoins, la base est plate et ne présente pas le creux caractéristique des folia de calcite.

Malgré les ressemblances visuelles, ces modelés non carbonatés ne sont pas liées au processus de piégeage des bulles. Les mécanismes de formation ne sont donc pas physico-chimiques, mais mécaniques, manifestement liés à un transport de particules solides (en milieu aquatique, par abaissement d'une nappe « chargée » ou par écoulement d'un film pariétal). Leur forme, en ruban approximativement horizontal dans l'argile, à base plate dans le soufre, ne présente pas de creux pouvant piéger des bulles. Leur processus de formation, s'il reste encore en grande partie inexpliqué, n'a assurément rien à voir avec celui des folia. Pour cette raison, nous suggérons que le terme folia soit un terme descriptif précis, étroitement réservé aux formes de calcite creuses en-dessous, et par extension un terme génétique, puisqu'à la forme est associée un processus. Les formes similaires, mais dont le processus génétique est différent, doivent être désignées différemment, afin d'éviter toute confusion.

Bibliographie

AUDRA P., BIGOT J.-Y. et MOCOCHAIN L. - 2002 - Hypogenic caves in Provence (France). Specific features and sediments. *Acta Carsologica*, vol. 31, n° 3, p. 33-50.

AUDRA P. et HÄUSELMANN P. - 2004 - Hydrothermal origin of two hypogenic karst caves in French Provence: Preliminary results from fluid inclusions. *Actes des Journées européennes de l'A.F.K., le karst de la craie en Normandie, Rouen, Journées 2003*, p. 32-34.

Conclusion

Les folia semblent clairement affiliés aux flux hypogènes. Le thermalisme, quoique fréquent, ne semble pas une nécessité, dès lors qu'un puissant dégazage carbonique peut être invoqué. L'hypothèse hydrothermale ancienne est liée au fait qu'auparavant les cavités hypogènes étaient surtout examinées sous l'angle de l'hydrothermalisme, qui n'est qu'un des aspects de la spéléogénèse hypogène, ni systématique, ni principal [Klimchouk, 2007].

Les folia couvrent de grandes surfaces et ont des morphologies sans équivoque. De fait leur occurrence semble presque exclusivement liée au contexte hypogène, avec un dégazage à quelques mètres sous la surface piézométrique. Les autres formes semblables apparaissant dans des contextes autres qu'hypogène (halite, argile) sont clairement différentes du point de vue morphologique et génétique. Leur assimilation aux folia doit être abandonnée.

L'apparition des folia résulte de la combinaison :

1. d'un puissant dégazage (hypogène) sous la surface piézométrique provoquant l'apparition de bulles et la sursaturation de la nappe ;
2. d'une géométrie avec une paroi surplombante ;

3. d'un piégeage des bulles de gaz carbonique favorisant la précipitation de calcite à sa périphérie, en une croissance descendante. Lorsque la géométrie de la paroi surplombante forme un dièdre, il y a alors association chemins de bulles - folia. Les folia, et a fortiori l'association chemins de bulles - folia, peuvent être considérés comme un indicateur fiable d'un contexte hypogène.

L'hypothèse d'oscillation de bassin saturé doit être abandonnée. D'abord parce les folia formés de cette manière seraient très fréquents, alors qu'ils sont de fait extrêmement rares, et surtout parce que cette hypothèse n'apporte pas d'explication globale à la morphologie spécifique des folia, en gours inversés.

Comme le dégazage apparaît à faible profondeur dans la zone noyée, les folia et les chemins de bulles peuvent également être considérés comme des enregistreurs précis et fiables de positions anciennes de la surface piézométrique, localisée au sommet de la zone des folia.

Remerciements

Pour la documentation : P. Delange, J. Despain, D. Green, W. Halliday, L. Hose, P. Kolesar, A. Osborne et L. Piccini. Pour les discussions sur le terrain : J. De Waele, S. Galdenzi et M. Queen. Pour leur commentaires avisés : B. Lismonde, A. Palmer, C. Self et Y. Dublyansky.

AUDRA P. et HOFMANN B.A. - 2004 - Les cavités hypogènes associées aux dépôts de sulfures métalliques (MVT). *Le Grotte d'Italia* n° 5, p. 35-56.

AUDRA P. - 2007 - Karst et spéléogénèse épigènes, hypogènes, recherches appliquées et valorisation. *Thèse d'Habilitation, Université de Nice Sophia-Antipolis*, 278 p.

AUDRA P., HOBLEA F., BIGOT J.-Y. et NOBECOURT J.-C. - 2007 - The role of condensation-corrosion in thermal speleogenesis. Study of a hypogenic sulfidic cave in Aix-les-Bains, France. *Acta Carsologica*, vol. 37, n° 2, p. 185-194.

CHIESI M. et FORTI P. - 1987 - Studio morfologico di due nuove cavità carsiche dell'Iglesiente (Sardegna Sud occidentale). *Ipoantropo* n° 4, p. 40-45.

CLAUZON G. - 1979 - Le canyon messinien de la Durance (Provence, Fr.) : une preuve paléogéographique du bassin profond de dessiccation. *Palaeogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology*, vol. 29, p. 15-40.

DAVIS D.G. - 1965 - Observations in Bida Cave Grand Canyon National Park. *Unpublished Report in files of Grand Canyon National Park*, 5 p.

- DAVIS D.G. - 1970 - Folia in Carlsbad Cavern. *Unpublished Report in files of Carlsbad Caverns National Park*, 2 p.
- DAVIS D.G. - 1973 - Miniature folia in Groaning Cave, Colorado. *Caving in the Rockies*, vol. 15, n° 1, p. 1.
- DAVIS D.G. - 1982 - Virgin passage found in Cave of the Winds. *Caving in the Rockies*, vol. 24, n° 5, p. 54-55.
- DAVIS D.G. - 1984 - Mysteries in mud: ancient frost-crystal impressions and other curiosities in Cave of the Winds, Colorado. *Rocky Mountains Caving*, vol. 1, n° 3, p. 26-29.
- DAVIS D.G. - 1997 - Folia in Hurricane Crawl Cave and Crystal Sequoia Cave. *San Francisco Bay Chapter*, vol. 40, n° 5, <http://www.caves.org/grotto/sfbc/news/vol40/issue-40-5.html> (consulté déc. 2007).
- DAVIS D. - 2000 - Extraordinary features of Lechuguilla Cave, Guadalupe Mountains, New Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, vol. 62, n° 2, p. 147-157.
- DE WAELE J. and FORTI P. - 2006 - A new hypogean karst form : the oxidation vent. *Zeitschrift für Geomorphologie*, suppl. vol. 147, p. 107-127.
- EMERSON D. - 1952 - Labor day Nevada Cave trip, 1951. *California Caver*, vol. IV, n° 8, p. 3-5.
- FERRER RICO V. - 2004 - *Grandes cuevas y simas del Mediterráneo. De Gibraltar a Catalunya Nord. Guía fotográfica*. In Auteur ed. - *cuevasmediterraneo.com*. 344 p., 1 CD-Rom.
- FORTI P. et UTILI F. - 1984 - Le concrezioni della Grotta Giusti. *Speleo*, vol. 7, n° 7, p. 17-25.
- FRUMKIN A. - 1997 - Liquid Crystal Cave, Israel. In HILL C. et FORTI P. - Cave minerals of the world. Huntsville, *National Speleological Society*, p. 319-322.
- GALDENZI S. et SARBU S.M. - 2000 - Chemiosintesi e speleogenesi in un ecosistema ipogeo: i rami sulfurei delle grotte di Frasassi (Italia centrale). *Le Grotte d'Italia*, n° 1, p. 3-18.
- GREEN D.J. - 1991 - On the origin of the folia and rims. *Salt Lake Grotto Technical Note* n° 88, p. 182-196.
- GREEN D.J. - 1997 - The origin of folia. *Salt Lake Grotto Tech. Note* n° 96, p. 51-60 (abstract in *Journal of Cave and Karst Studies*, vol. 59, n° 1, p. 60).
- HALL L. - 2008 - Cuban Caves Photo Page, El Jarrito - Bellamar Cave system, Matanzas province, Cuba. *The Pittsburg Grotto*, <http://www.karst.org/pgrotto/cubapics.htm> (consulté mai 2008).
- HALLIDAY W.R. - 1954a - Basic geology of Crystal Cave, Utah. *Salt Lake Grotto Technical Note* n° 16, p. 13.
- HALLIDAY W.R. - 1954b - Basic geology of Goshute Cave, Nevada. *Salt Lake Grotto Technical Note* n° 12, p. 1-4.
- HALLIDAY W.R. - 1957 - The Snake Creek Caves, White Pine County, Nevada. *Salt Lake Grotto Technical Note* n° 39, p. 1-4.
- HILL C.A. - 1982 - Mineralogy of Bida Cave, Grand Canyon National Park, Arizona. *Cave Research Foundation, Annual Report*, vol. 15, p. 29-30.
- HILL C.A. - 1987 - Geology of Carlsbad Cavern and other caves in the Guadalupe Mountains. *New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources Memoire*, vol. 117, 150 p.
- HILL C.A. and FORTI P. - 1997 - Folia. In HILL C.A. and FORTI P. - Cave minerals of the world. Huntsville, *National Speleological Society*, p. 73-74.
- HOSE L.D. - 1992 - To Lechuguilla Depths... *Rocky Mountain Caver*, vol. 9, n° 2, p. 15-18.
- HOSE L.D., PALMER A.N., PALMER M.V., NORTHUP D.E., BOSTON P.J. and DUCHENE H.R. - 2000 - Microbiology and geochemistry in a hydrogen-sulphide-rich karst environment. *Chemical Geology*, vol. 169, p. 399-423.
- JENNINGS J.N. - 1982 - Karst of northeastern Queensland reconsidered. Tower Karst. *Chillagoe Caving Club Occasional Paper*, n° 4, p. 13-52.
- KLIMCHOUK A. - 2007 - Hypogene speleogenesis. Hydrogeological and morphogenetic perspective. *NCKRI Special Paper Series*, vol. 1, 77 p.
- KOLESAR P.T. and RIGGS A.C. - 2004 - Influence of depositional environment on Devil's Hole calcite morphology and petrology. In SASOWSKY I.D. et MYLROIE J. Eds. - *Studies of Cave Sediments: Physical and Chemical Records of Paleoclimate*. New York, *Kluwer/Plenum Academic Press*, p. 227-241.
- LUISZER F.G. - 1997 - Genesis of Cave of the Winds, Manitou Springs, Colorado. *PhD Thesis, University of Colorado*, 137 p.
- MALTSEV V.A. - 1997 - Cupp-Countunn Cave, Turkmenistan. In HILL C. et FORTI P. Eds. - Cave minerals of the world. Huntsville, *National Speleological Society*, p. 323-328.
- MALTSEV V.A. - 1999 - Stalactites with «internal» and «external» feeding. *Proceedings of the University of Bristol Speleological Society*, vol. 21, n° 2, p. 149-158.
- MALTSEV V.A. et SELF C.A. - 1993 - Cupp-Coutunn cave system, Turkmenia, Central Asia. *Proceedings of the University of Bristol Speleological Society*, vol. 19, n° 2, p. 117-149.
- MAUCHA L. - 1993 - A Vass Imre-barlang természetvédelmi célú állapotfelmérése. *Unpublished Report to National Authority for Nature Conservation (Hungary)*, 22 p.
- Mc LEAN J.S. - 1965 - Folia found in Agua Caliente. *Arizona Caver*, vol. 2, n° 6, p. 125.
- NUÑEZ JIMENEZ A. - 1975 - Nivelitas nuevas formaciones espeleológicas. *Simp. 35e Aniv. Soc. Espeleol. Cuba, Resúmenes, Isla de Pinos*, p. 96.
- PICCINI L. - 2000 - Il carsismo di origine idrotermale del Colle di Monsummano (Pistoia - Toscana). *Le Grotte d'Italia* n° 1, p. 33-43.
- SZABÓ Z. - 2005 - Morphological and hydrological relationship of the Tapolca lake cave. Genesis and formation of hydrothermal Caves. *International Conference, Budapest 2004, Papers. Hungarian Speleological Society, Budapest*, p. 100-105.
- TAKACS NÉ BOLNER K. - 1993 - Rare types of carbonate speleothems. *Karszt és Barlang* n° 1-2, p. 29-36.
- TAKACS NÉ BOLNER K. - 2005 - Rare speleothems found in Pál-völgy cave. Genesis and formation of hydrothermal Caves. *International Conference, Budapest 2004, Papers. Hungarian Speleological Society, Budapest*, p. 118-124.

Cavité	Localisation	Active / fossile	Hydrothermalisme	Dégazage CO ₂	Tectonique / hydrogéologie	Références
Indian Burial Cave	USA, Nevada	F	86-119 °C (TH of the fluid inclusions)			Emerson, 1952 Green, 1991 Halliday, 1957
Hurricane Crawl Cave	USA, California	A	No (river cave)	From upwelling phreatic water		Davis, 1997
Crystal Sequoia Cave	USA, California					Davis, 1997
Goshute Cave	USA, Nevada	F				Halliday, 1954b
Devil's Hole	USA, Nevada	A	Water table 34 °C	x	Non karstic active extensional fault	Kolesar and Riggs, 2004
Gneiss Cave	USA, Utah	F			Calcite folia coating onto a gneiss wall	Green, 1997
Bida Cave	USA, Arizona					Davis, 1965 Hill, 1982
Groaning Cave	USA, Colorado					Davis, 1973
Agua Caliente Cave	USA, Arizona	A	Cave at 38 °C			McLean, 1965
Carlsbad Cave	USA, New-Mexico	F	Carlsbad 20-25 °C		Basin margin	Davis, 1970
Lechuguilla Cave	USA, New-Mexico	F	Carlsbad 20-25 °C		Basin margin	Davis, 2000 Hose, 1992
Caverna de las Cinco Cuevas	Cuba					Nuñez-Jimenez, 1975
Sima del Pulpo	Spain, Murcia	A	Water table 21 °C			Ferrer Rico, 2004
Sima de Benís	Spain, Murcia	A	Water table 21 °C			Ferrer Rico, 2004
Grotte de l'Ermite	France, Pyrénées	A	Water table 19 °C Thermal sulfidic spring 38 °C		Artesian flow path in deep syncline	Bigot et Nobecourt, inédit
Grotte de l'Adaouste	France, Provence	A	Abandoned at 11 Ma Thermal springs along Durance fault		Durance active transcurrent fault	Audra <i>et al.</i> , 2002
Pál-Völgy - Matyas-Hegy barlang	Hungary, Buda Hills	F	Springs 20-27 °C		Rim of the Danube rift	Takacsné Bolner, 2005
József-hegy barlang	Hungary, Buda Hills	F	Springs 20-27 °C		Rim of the Danube rift	Takacsné Bolner, 2005
Molnar-Janos	Hungary, Buda Hills	A	Water table 20-27 °C	x	Rim of the Danube rift	Takacsné Bolner, 1993
Matyas-Farras	Hungary					Takacsné Bolner, 1993
Grotta Giusti	Italy, Tuscany	A	Thermal spring 34 °C	x		Forti et Utili, 1984, Piccini, 2000
Ryan Imperial Cave	Australia, Queensland					Jennings, 1982
Cupp-Coutunn Cave	Turkmenistan	F	80-170 °C (TH of the fluid inclusions, from fluorite and calcite)		Basin margin	Maltsev, 1997 Maltsev and Self, 1993

Tableau I – Cavités où la présence de folia de calcite est attestée, en tout près de 25 sites.

Folia occurrences, about 25 sites worldwide.