

Cloche aveugle ornée de « boxwork » à -120 m dans la salle des Pénitents de la grotte de l'Adaouste (Jouques, Bouches-du-Rhône). On distingue très bien l'interface eau / gaz à environ un mètre au-dessus du personnage (cliché J.-Y. Bigot).



En haut à gauche, les folia et en bas à droite, les tourelles de calcite (cliché J.-Y. Bigot).

Jean-Claude d'ANTONI-NOBÉCOURT¹, Philippe AUDRA²,
Jean-Yves BIGOT³ & Ludovic MOCOCHAIN⁴

INDICES DE SPÉLÉOGENÈSE NON CONVENTIONNELLE DANS LA GROTTÉ DE L'ADAOUSTE (JOUQUES, BOUCHES-DU-RHÔNE)

La grotte de l'Adaouste, connue depuis fort longtemps, fit il y a quelques années l'objet de recherches attentives de préhistoriens en raison d'indices explicites de pratiques anthropophagiques datant du Néolithique qui y furent découvertes ; cette originalité archéologique n'est pas le seul particularisme de cette cavité, dont la spéléogénèse se révèle également relativement atypique.

I. Contexte

La Durance, dont la vallée suit une faille décrochante active jalonnée de sources thermo-minérales [AUDRA et al. 2002], traverse en cluse l'anticlinal de Mirabeau. Ce contexte a favorisé la convergence de nombreuses circulations hypogènes, qui remontaient le long du flanc de l'anticlinal et émergeaient à proximité de son sommet avant l'abaissement du niveau de base. Des dépôts métalliques de Fe et Mn, ayant conservé des traces microbiennes sous forme de *poolfingers* (concrétion sur filament bactérien), sont souvent associés à ces vides hypogènes [AUDRA & HOFMANN 2004]. La grotte de l'Adaouste s'ouvre sous le sommet du flanc de l'anticlinal, en rive gauche de la Durance. Les inclusions fluides de la calcite indiquent systématiquement des températures de cristallisation en milieu thermal [AUDRA & HÄUSELMANN 2004].

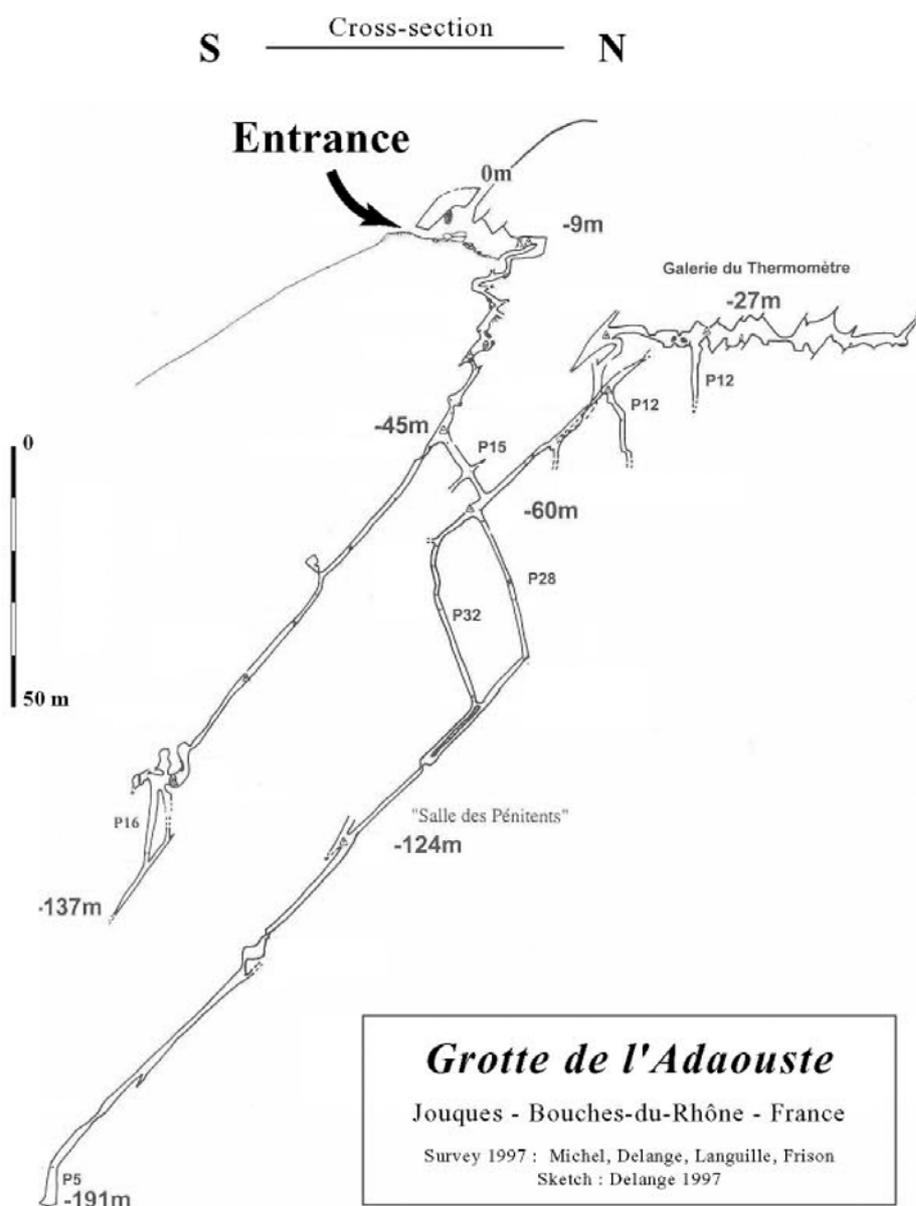


Figure n° 1 : Coupe de la grotte de l'Adaouste (topographie P. Delange).

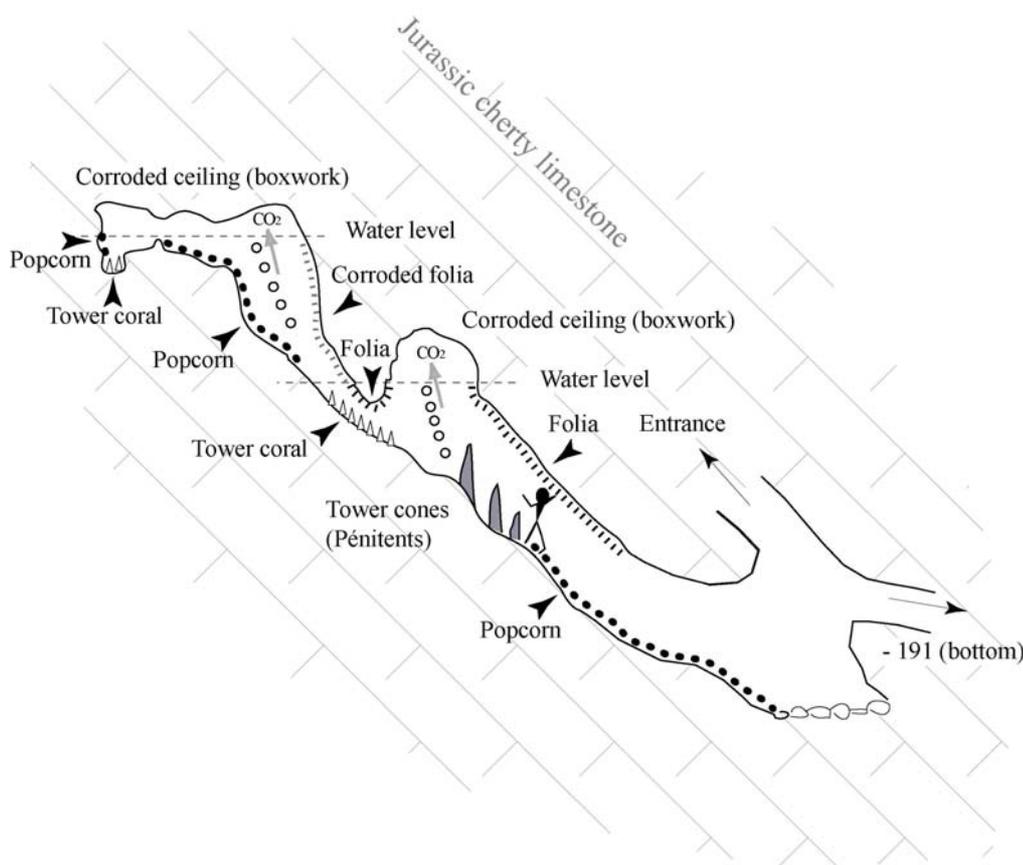
¹ Association Française de Karstologie (jcnobecourt@free.fr)

² Ecole Polytechnique de l'Université de Nice, 06410 Sophia Antipolis, France (audra@unice.fr)

³ Association Française de Karstologie (catherine.arnoux@club-internet.fr)

⁴ CEREGE (UMR 6635-CNRS) Université Aix-Marseille I (ludomochain@gmail.com)

La grotte de l'Adaouste fut active au Tortonien (11 Ma), lors du début de l'incision de la cluse de la Durance ; le surcreusement messinien de la vallée a fossilisé la cavité désormais perchée et a permis sa conservation sans remaniements ultérieurs.



Elle est composée de deux réseaux descendant à près de 200 m de profondeur suivant le pendage redressé du flanc d'anticlinal, et de deux niveaux horizontaux (entrée et -30) matérialisant les positions successives du niveau de base [AUDRA et al. 2002]. L'essentiel de la cavité s'est donc développé dans la zone noyée du fait des remontées d'eaux thermales particulièrement riches en CO₂, et éventuellement par le mélange avec les eaux météoriques.

Figure n° 2 : Répartition des modèles de corrosion et des dépôts de calcite subaquatique dans la salle des Pénitents, cloche aveugle noyée à -124 m (schéma P. Audra).

Les vastes conduits horizontaux des niveaux supérieurs, creusés à la surface piézométrique, furent en grande partie élargis par la condensation-corrosion favorisée par le gradient thermique entre les eaux profondes ascendantes et les voûtes plus fraîches.

Les modelés et les dépôts caractéristiques de cette genèse sont respectivement pour la zone noyée : des cloches aveugles avec *boxwork*, chenaux hydrothermaux, *bubble trails*, *rafts*, *cone towers*, *folia*, tourelles de calcite (*coral towers*), *popcorns*, et pour la surface piézométrique : des rifts d'alimentation, salles en dôme et cloches sculptées dans l'encaissant rocheux et dans les concrétions, *boxwork*.

Les observations ont été conduites principalement dans la salle des Pénitents, et dans la section du conduit principal où elle se raccorde. La salle des Pénitents est un diverticule déviant vers -120 m du conduit principal, dans lequel les formes sont abondantes, pratiquement intactes, avec presque un aspect de fraîcheur (fig. 2). Lors de la phase active, le diverticule était à au moins 50 m de profondeur sous le niveau piézométrique, et, la salle étant borgne, les gaz s'y sont trouvés piégés. Des cloches remplies probablement de gaz carbonique soumis à une forte pression se sont développées. Les interfaces eau/gaz sont bien marquées et matérialisées par les transitions très nettes entre les phénomènes de corrosion en milieu exondé et les phénomènes de dépôt en milieu noyé.

Par ailleurs, dans ce volume confiné et isolé du conduit hypogène principal, il n'y avait pas de circulations, l'hydrodynamique étant limitée aux courants de convection : ces conditions ont permis la formation d'agrégats de calcite flottante, et d'édifices cristallins dérivés tels que les « pénitents » ou *cone towers* (fausses stalagmites formées par l'accumulation de radeaux de calcite coulés, fig. 3) et les tourelles de calcite ou *coral towers* (plus petites et plus irrégulières, mais de genèse identique, fig. 4). C'est aussi parce que ce volume clos n'a pas connu de circulations que les conditions de conservation y furent manifestement plus favorables que dans le conduit principal, apportant au site une valeur démonstrative toute particulière.

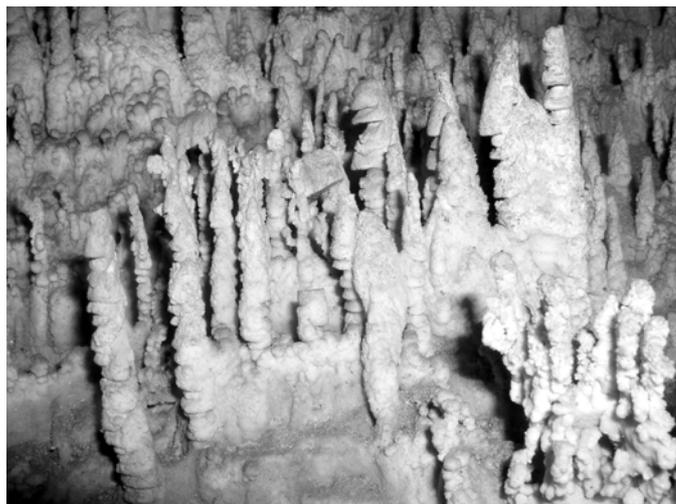
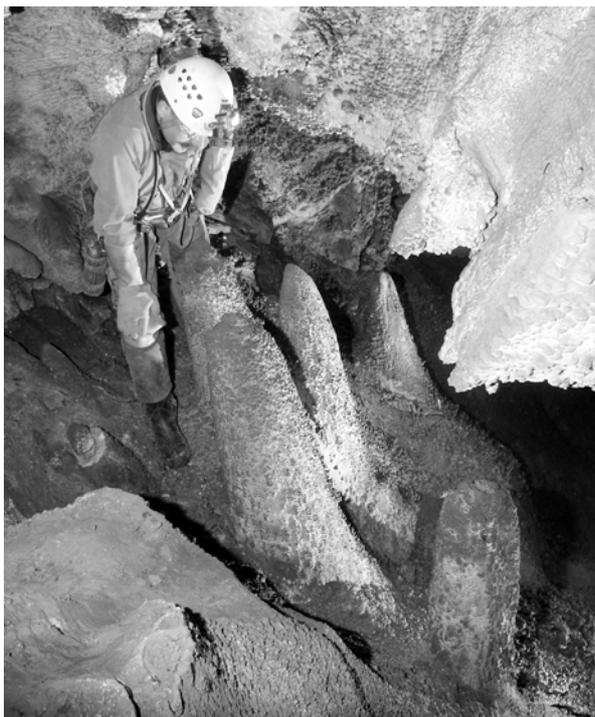


Figure n° 4 : Les tourelles de calcite de la salle des Pénitents (cliché J.-Y. Bigot).

Figure n° 3 : Les Pénitents ou « tower cones » (cliché J.-Y. Bigot).

II. Chemins de bulles (*Bubble trails* ou *bubble-flow canal*)

Les chemins de bulles sont des chenaux lisses et réguliers de section semi-circulaire d'un diamètre de 0,5 à 2-3 cm, encastrés sous les parois surplombantes (fig. 5). Les sinuosités du tracé suivent les lignes de plus grande pente. Les *bubble trails* se développent à quelques mètres de profondeur sous la surface piézométrique.

Leur développement est lié au dégazage carbonique [CHIESI & FORTI 1987] : les flux hypogènes, fortement chargés en gaz carbonique, dégazent en raison de la baisse de la pression à proximité de la surface. Les bulles convergent vers les points hauts et cheminent selon les lignes de plus grande pente le long des plafonds surplombants où elles sont canalisées dans des chemins de bulles. L'eau est rendue agressive au contact des bulles de gaz carbonique. Leur remontée le long de cheminements invariables sculpte un chenal.

Les chemins de bulles ont été identifiés dans les cavités du district métallique de l'Iglesiente en Sardaigne [CHIESI & FORTI 1987], certains provenant du dégazage carbonique par oxydation de sulfures métalliques, comme à la grotta Santa Barbara 2 [DE WAELE & FORTI 2006]. Ils sont mentionnés dans les cavités sulfuriques comme les grotte di Frasassi en Italie [GALDENZI & SARBU 2000], le gouffre Chevalley en France [AUDRA et al. 2007].

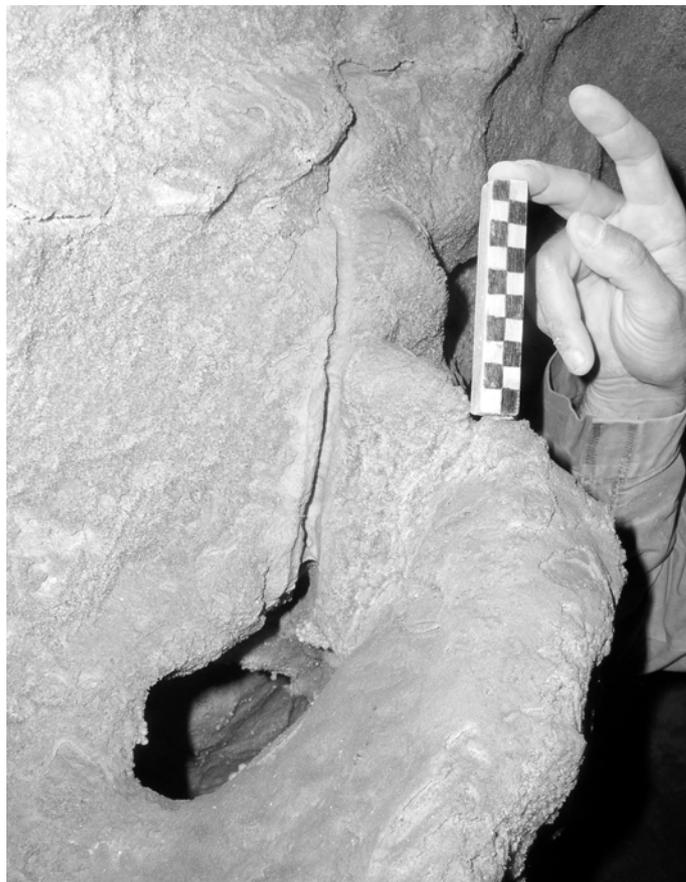


Figure n° 5 : Chemin de bulles, *bubble trail*, dans la salle des Pénitents (cliché J.-Y. Bigot).

En Hongrie, ils ont d'abord été reconnus dans Ferenc-hegy barlang, puis dans les autres cavités des collines Buda, dans les autres massifs (Bükk, Pilis), ainsi qu'au bord du lac Balaton dans Tapolca barlang [SZABO 2004].

Ce modelé est probablement beaucoup plus fréquent que dans ces seules mentions. Il doit théoriquement être présent dans la plupart des cavités hypogées subissant un dégazage carbonique. *A contrario*, ils n'existent pas dans les autres types de cavités, et ne doivent pas être confondus avec les différents types de chenaux de plafond (chenaux paragénétiques, chenaux de convection hydrique [KLIMCHOUK 2007], chenaux de condensation, etc.).

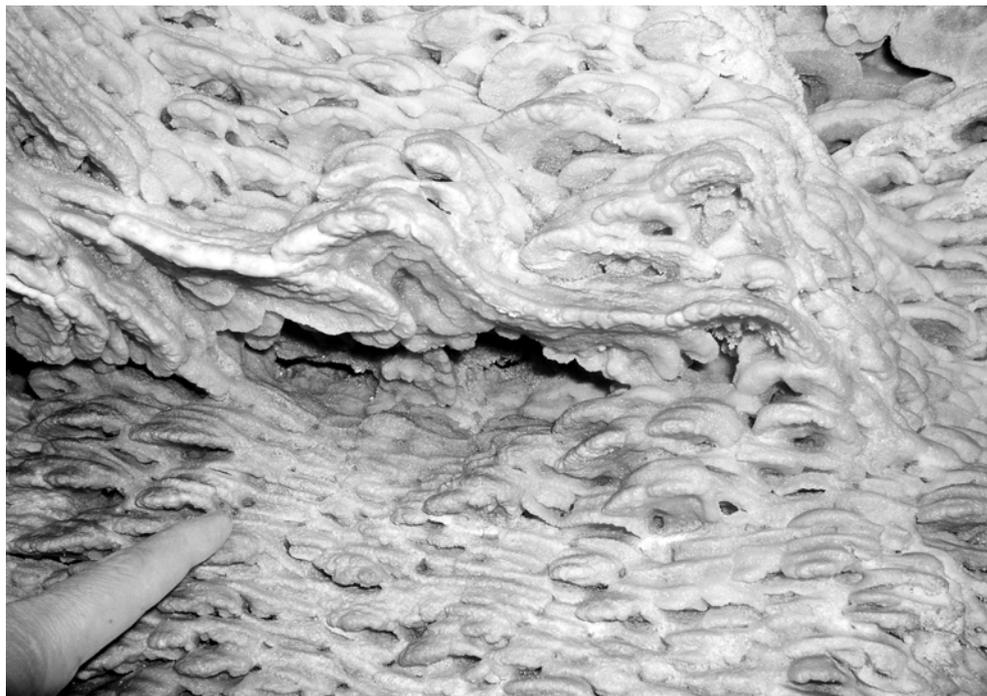
Dans la grotte de l'Adaouste, ils semblent se développer de manière continue sur environ 50 m de dénivellation, sensiblement de -75 à -125 m ; ils naissent sur les parois en micro-chenaux dont le diamètre s'agrandit progressivement du bas vers le haut. Aucun dépôt n'est présent dans le chenal. Lorsqu'une pellicule de calcite couvre les parois environnantes, elle est entaillée à l'emplacement du chenal.

Les chemins de bulles convergent vers le haut, s'agrandissent par l'apport des bulles et des *bubble trails* affluents en chenaux anastomosés de plusieurs décimètres de largeur et de profondeur, isolant dans les parties supérieures du réseau des pendants en « pied d'éléphant ».

Ils se raccordent à des cloches fermées ou disparaissent lorsque les surplombs se redressent en parois verticales. Lorsqu'ils se raccordent à des cloches aveugles, le gaz piégé constitue une atmosphère extrêmement corrosive, façonnant le plafond de la cloche en *boxwork*.

III. Folia [HILL & FORTI 1997]

Les folia sont des concrétions ressemblant à des gours inversés, disposés en ondulations rubanées, telles des feuilles plissées de livre, d'où leur nom (fig. 6). Ils se développent vers le bas à partir de parois surplombantes ou de plafonds qu'ils recouvrent entièrement (fig. 7).



La bordure inférieure d'un folium 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 dans l'édifice. La manière dont les lamelles de ces rubans ondulés se raccordent rappelle la surface inférieure d'un champignon. Parfois, ils sont influencés par un courant et disposés parallèlement à sa direction : Burial Cave, Nevada [Green 1991].

Figure n° 6 : Folia dans la salle des Pénitents, vue de face (cliché J.-Y. Bigot).

Ils sont constitués du point de vue pétrographique de micro-cristaux allongés de taille équivalente disposés en structure radiale ou dendritique, bourgeonnant à partir d'irrégularités qui s'accroissent progressivement en rubans.

Les folia se localisent sous la surface piézométrique, jusqu'à quelques mètres ou quelques dizaines de mètres de profondeur. Ils sont fréquemment associés aux concrétions élaborées à partir de dépôt massif de calcite dans les bassins sursaturés : *clouds*, *mammillary*, *rafts*, *tower cones* ; toutes étant généralement, mais pas systématiquement, provoquées par la désaturation de flux hypogées.

INDICES DE SPÉLÉOGENÈSE NON CONVENTIONNELLE DANS LA GROTTE DE L'ADAOUSTE (JOUQUES, BOUCHES-DU-RHÔNE)

Deux principaux modes de genèse ont été avancés :

- à la surface des nappes dont le niveau oscille ou s'abaisse, soit directement par dépôt de calcite, soit par l'intermédiaire de *rafts* de calcite flottante ; la précipitation est favorisée par l'évaporation [HALLIDAY 1954a ; DAVIS 1973 ; JENNINGS 1982]. L'objection principale à cette théorie de relation avec un niveau d'eau est que ni les folia, ni les édifices d'associations ne présentent de marque horizontale. HILL [1987], reprenant cette théorie, explique les bordures inclinées par les suintements de parois postérieurs à l'abaissement de la nappe sous chaque folium, agissant à la manière de draperies, sur lesquelles peuvent se développer des choux-fleurs.
- à faible profondeur sous la surface piézométrique : les bulles de CO₂ provenant du dégazage sont piégées sous les irrégularités, favorisant la corrosion en partie haute de la bulle, et le dépôt à la base [GREEN 1991, 1996]. Les « déversements » successifs des bulles vers le haut élaborent ces structures en gours inversés

Les folia sont mentionnés dans une vingtaine de cavités dans le monde, en majorité actives. Les sites répertoriés correspondent fréquemment à des cavités thermales. Néanmoins, la température de l'eau, déduite des inclusions fluides pour les cavités inactives, s'étend sur un large spectre (de 20 à 120°C) et ne semble pas être un facteur déterminant. Par ailleurs, il existe des folia constitués d'argile [Davis 1982 ; Maucha 1993] dont la genèse exclut la théorie subaquatique par dégazage et s'accorde difficilement avec un dépôt en surface de nappe.



Figure n° 7 : Folia dans la salle des Pénitents, vue de dessous (cliché J.-Y. Bigot).

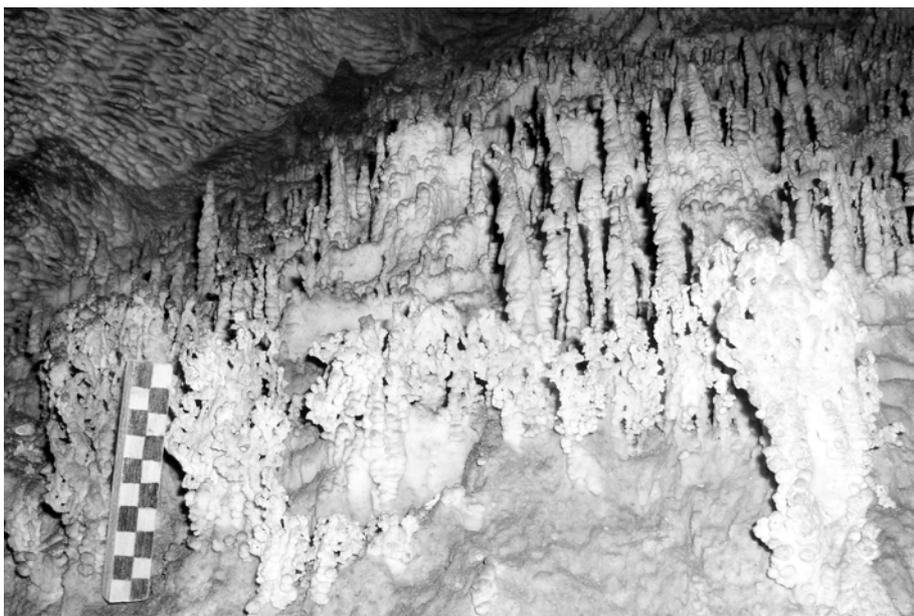


Figure n° 8 : Proximité des folia et des touvelles de calcite (cliché J.-Y. Bigot).

HILL & FORTI [1997] confrontant l'ensemble des théories et observations, concluent en l'ignorance des facteurs précis de localisation (bassins, surface piézométrique, ou zone noyée profonde ?) et ne tranchent pas quant à leur genèse, tout en admettant la relation étroite avec la surface piézométrique ainsi qu'avec les formations de calcite subaquatique telles que les *clouds* et *mammalies*, mais également avec les formations de bassins tels que les radeaux de calcite flottante.

Dans la grotte de l'Adaouste, les folia apparaissent dans le conduit principal vers -80 m, tout d'abord très érodés et rabotés, puis de mieux en mieux conservés au fur et à mesure de la descente vers la salle des Pénitents.



Les dispositions relatives des différentes formes de dépôt renseignent sur les conditions de leur genèse : on observe ainsi clairement que les parois environnant les accumulations de radeaux de calcite (tourelles de calcite et « pénitents ») sont couvertes de folia (fig. 8) ; par ailleurs, l'observation dans certains surplombs de « bulles moulées », sortes de coupoles à opercule, atteste indubitablement de phénomènes de cristallisation de calcite à l'interface eau/gaz et au contact de la paroi (fig. 9). De sorte que la formation des folia en conditions subaquatiques, attestée sur quelques sites actifs dans le monde, se trouve ici vérifiée.

Figure n° 9 : Bulle calcifiée dans la salle des Pénitents (cliché J.-Y. Bigot).

IV. Bulles calcifiées

Certains creux de folia ayant emprisonné des bulles de gaz carbonique présentent un liseré de calcite de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur, qui tend à clore la bulle. La partie supérieure du creux occupée par la bulle montre des traces de corrosion. Le mécanisme est probablement le suivant (fig. 10) : plusieurs facteurs concourants provoquent l'apparition d'un film de condensation sur la voûte de la bulle (gradient thermique entre l'eau thermale et le toit rocheux, capillarité) ; l'eau de condensation rendue agressive en raison du confinement avec l'atmosphère carbonique est progressivement saturée et ruisselle le long de la paroi ; elle précipite en bordure du folium, le long de la bulle, où le gradient de concentration en dioxyde de carbone entre la bulle et l'eau du bassin est élevé. Ce dépôt de calcite subaquatique illustre la juxtaposition de la corrosion et du dépôt, phénomène habituel dans les bassins soumis au dégazage, présent ici à une échelle réduite.

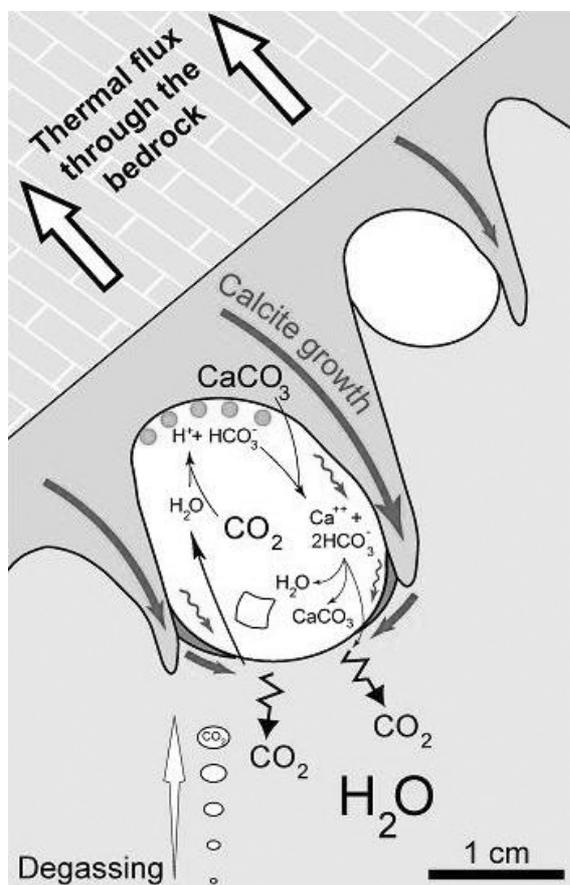


Figure n° 10 : Processus de formation des folia (schéma P. Audra).

V. L'association chemins de bulles – folia

Les chemins de bulles et les folia sont déterminés par un processus commun, le dégazage du CO₂ contenu dans les fluides hypogènes ; cependant, les formes sont différentes, et même, s'opposent : dans un cas, le concrétionnement l'emporte sur la corrosion, dans l'autre la corrosion supplante la précipitation, et ce sur des surfaces très proches les unes des autres, parfois même en juxtaposition ou en superposition.

Les facteurs déterminant le résultat du dégazage semblent être son intensité et l'inclinaison de la paroi, la régularité de sa surface jouant vraisemblablement un rôle important en second plan.

En effet, lorsqu'une paroi est convexe et relativement peu éloignée de l'horizontale, sa rugosité « accroche » les bulles de gaz carbonique qui vont chacune susciter la formation d'un folium ; en revanche, là où la paroi convexe se verticalise ou bien lorsque la production de gaz carbonique s'intensifie, ces deux facteurs étant concourants, la poussée d'Archimède sera supérieure à la capacité de rétention mécanique de la paroi, et la bulle sera libérée.

Si la production de gaz est faible, ces remontées de bulles auront un effet négligeable au regard des processus dépositionnels, et les bulles se déverseront d'un folium à l'autre ; mais dès lors que la production est importante, les bulles empruntant préférentiellement les reliefs de paroi qui se prêtent le mieux à l'ascension, une logique de trajectoire se met en place, les écoulements gazeux remontants se concentrent et se hiérarchisent, ce qui conduit à une corrosion organisée en *bubble trails* et/ou en coupoles de concentration (ces deux formes pouvant se succéder dans un sens ou dans l'autre), puis en chenaux.

Les parois concaves sont un cas particulier : une concavité accusée y joue le rôle de concentrateur à l'origine même de la production du gaz, et la hiérarchisation est immédiate. C'est souvent dans de tels dispositifs qu'on observe les *bubble trails*.

Il apparaît donc que la genèse des folia nécessite un milieu subaquatique peu dynamique -les conduits relativement vastes de la grotte de l'Adaoste au regard des faibles débits hypogènes- caractérisé par des dégazages effectifs mais modérés ; les dégazages intenses favoriseraient *a contrario* les mécanismes de mobilisation des bulles et de hiérarchisation en *bubble trails* et chenaux, limitant de fait les opportunités de formation de folia.

Remerciements

- P. Delange pour la topographie de l'Adaoste
- P. Kolesar, W. Halliday, et L. Piccini pour la transmission de documentation
- J. de Waele et S. Galdenzi pour les discussions à la grotte de l'Adaoste

Références :

- AUDRA P. & HÄUSELMANN PH. 2004 – Hydrothermal origin of two hypogenic karst caves in French Provence: Preliminary results from fluid inclusions. *Actes des Journées européennes de l' AFK, Le karst de la craie en Normandie, Rouen 2003*, p. 32-34.
- AUDRA P. & 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., BIGOT J.-Y. & MOCOCHAIN L. 2002 - Hypogenic caves in Provence (France). Specific features and sediments. *Acta Carsologica*, vol. 31, n° 3, p. 33-50.
- AUDRA P., HOBLÉA F., BIGOT J.-Y. & NOBÉCOURT J.-CL. 2007 - The role of condensation-corrosion in thermal speleogenesis : study of a hypogenic sulfidic cave in Aix-les-Bains, France. *Acta carsologica*, vol. 36, n° 2, p. 185-194.
- CHIESI M. & FORTI P. 1987 - Studio morfologico di due nuove cavità carsiche dell'Iglesiente (Sardegna Sud occidentale). *Ipoantropo*, n° 4, p. 40-45.
- DAVIS D. G. 1965 - Observations in Bida Cave Grand Canyon National Park. *Unpub. Rept. in files of Grand Canyon Natl. Park*, 5 p.
- DAVIS D. G. 1970 - Folia in Carlsbad Cavern. *Unpub. Rept. in files of Carlsbad Caverns Natl. Park*, 2p.
- 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

- FERRER RICO V. 2004** - *Grandes cuevas y simas del Mediterráneo. De Gibraltar a Catalunya Nord. Guía fotográfica.* 344 p. + CD-Rom. Chez l'auteur <<http://web.mac.com/victorferrer>>
- FORTI P. & UTILI F. 1984** - Le concrezioni della Grotta Giusti. *Speleo*, vol. 7, n° 7, p. 17-25.
- GALDENZI S. & SARBU S. M. 2000** - Chemiosintesi e speleogenesi in un ecosistema ipogeo: i rami sufurei delle grotte di Frasassi (Italia centrale). *Le grotte d'Italia*, n° 1, p. 3-18. Genga.
- GREEN D. J. 1991** - On the origin of the folia and rims. *Salt Lake Grotto Tech. Note*, n° 88, p. 182-196.
- GREEN D. J. 1996** - The origin of the folia (abstract). *Natl. Speleol. Soc., Conv. Prog. with Abs.*, Salida, Co., Aug. 5-9, p. 41.
- HALLIDAY W. R. 1954a** - Basic geology of Crystal Cave, Utah. *Salt Lake Grotto Techn. Note*, n° 16, p. 13.
- HALLIDAY W. R. 1954b** - Basic geology of Goshute Cave, Nevada. *Salt Lake Grotto Tech. Note*, n° 12, p. 1-4.
- HALLIDAY W. R. 1957** - The Snake Creek Caves, White Pine County, Nevada. *Salt Lake Grotto Tech. Note*, n° 39, p. 1-4.
- HILL C. A. 1982** - Mineralogy of Bida Cave, Grand Canyon National Park, Arizona. *Cave Res. Fnd., Ann. Rept.*, n° 15, p. 29-30.
- HILL C. A. 1987** - Geology of Carlsbad Cavern and other caves in the Guadalupe Mountains. *New Mexico bur. Mines Mineral Res. Mem.*, n° 117, 150 p.
- HILL C. & FORTI P. 1997** - Folia. *Cave mineral of the world*. p. 73-74. National Speleological Society, Huntsville.
- HOSE L. D. 1992** - To Lechugilla Depths... *Rocky Mountain Caver*, vol. 9, n° 2, p. 15-18.
- JENNINGS J. N. 1982** - Karst of northeastern Queensland reconsidered. *Occas. Paper*, n° 4, p. 13-52.
- KLIMCHOUK A. 2007** - Hypogene speleogenesis. Hydrogeological and morphogenetic perspective. *NCKRI Special Paper Series*, n° 1, 77 p. National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad.
- KOLESAR P.T. & RIGGS A.C. 1999** - Form and formation : speleothems in Devil's Hole, a tectonic cave in Southern Nevada. *GSA Annual Meeting, Abstract n° 50085*. Denver, Colorado (rock.geosociety.org/docs/abindex/annual/1999/50082.htm)
- LUISZER F. G. 1997** - *Genesis of Cave of the Winds, Manitou Springs, Colorado*, 137 p. PhD Thesis, University of Colorado.
- MAUCHA L. 1993** - A Vass Imre-barlang természetvédelmi célu állapotfelmérés. *Unpubl. Rept. to Natl. Authority for Nature Conservation (Hungary)*, 22 p.
- MCLEAN 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. 35^e 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. Società Speleologica Italiana.
- 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.
- TAKÁCSNÉ BOLNER K. 1993** - Rare types of carbonate speleothems. *Karszt és Barlang*
- TAKÁCSNÉ 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.