

RIVIERA

2007

SCIENTIFIQUE



ASSOCIATION DES NATURALISTES DE NICE ET DES ALPES-MARITIMES

SIÈGE SOCIAL : Muséum d'Histoire Naturelle - 60 bis, bd Rizzo - 06300 NICE

BIBLIOTHÈQUE : 12, avenue de la République - 06300 NICE

LA SPÉLÉOGÉNÈSE PAR CORROSION SULFURIQUE, L'EXEMPLE DE LA GROTTÉ DU CHAT (Daluis, Alpes-Maritimes)

Jean-Claude d'ANTONI-NOBECOURT⁽¹⁾

Philippe AUDRA⁽²⁾

Jean-Yves BIGOT⁽³⁾

⁽¹⁾ Comité Départemental de Spéléologie 06

⁽²⁾ Université de Nice Sophia Antipolis – UMR 6012 « Espace »

⁽³⁾ Association Française de Karstologie

Le Nord-Ouest des Alpes-Maritimes, adossé sur l'échine cristalline de l'Argentera-Mercantour, n'est guère prisé des spéléologues : la couverture calcaire y est chiche, et souvent de mauvaise qualité aux yeux du spéléophile. Pour autant, dans cette zone négligée par les prospecteurs, la karstification n'est pas absente, et le contexte géologique assez marginal par rapport aux grands massifs karstiques classiques y implique même des caractéristiques spéléogénétiques très originales.

Ainsi, la grotte du Chat, modeste caverne dont les particularismes n'ont été mis en évidence que très récemment, se révèle être objet géologique remarquable qui compte peu d'équivalents au plan national.

HISTORIQUE

La grotte du Chat est connue depuis la nuit des temps par les populations locales, mais l'origine de son nom est obscure et fait l'objet d'explications plus ou moins assurées, certaines sources prétendant qu'autrefois l'entrée aurait eu la forme d'une tête de chat... Il nous semble que la véritable origine serait à rechercher dans une appellation dialectale issue du provençal « traoucat » (troué), qui aurait muté en « daou cat », « du chat ».

C'est à la fin du XIX^{ème} siècle que Jules Gavet, un des premiers spéléologues français, explore la grotte, la décrit et en dresse le premier plan, qui, complété en 1948 par la section de Nice du Club Alpin Français, constituera longtemps l'unique topographie de ce réseau peu étendu mais complexe ; c'est probablement à l'occasion de la mise à jour de 1948 qu'une des galeries principales de la grotte est baptisée « Victor de Cessole », en l'honneur du naturaliste et alpiniste niçois décédé en 1941, président du C.A.F. de Nice entre 1900 et 1932.

Une seconde topographie est publiée en 1967 par Yves Créac'h dans son inventaire des cavités des Alpes Maritimes ; puis une troisième, beaucoup plus précise, est levée par le Centre Méditerranéen de Spéléologie et publiée dans un topoguide de loisirs sportifs (« L'aventure verticale dans les Alpes d'azur », Oddou, Sounier et Sounier 1992) ; il faut dire qu'à la faveur du développement des moyens de communication, cette cavité facile et accessible était devenue une des classiques de la spéléologie d'initiation dans

les Alpes-Maritimes. Il y a une vingtaine d'années, a priori en raison de dégradations liées à sa sur-fréquentation incontrôlée, l'accès en fut interdit, par une grille cadencée d'une part, et par un arrêté d'autre part. La municipalité accueille cependant avec bienveillance les demandes d'accès motivées par des objectifs scientifiques.

Aujourd'hui, sans doute par la magie de l'inaccessible, quelques sites Internet de randonnée en moyenne montagne ou à caractère touristique font mention de la grotte du Chat en termes dithyrambiques, évoquant « une des plus belles rivières souterraines de la région », « des beautés à couper le souffle » et autres superlatifs. Précisons qu'il n'y a pas l'ombre d'une rivière dans la grotte du Chat et que ces qualificatifs sont très exagérés...

DESCRIPTION

La grotte du Chat (coordonnées Lambert III 956,537 / 3201,859 / 940) est pointée sur les cartes I.G.N. top 25. On y accède par une route qui, du village de Daluis, se dirige vers le hameau de Saint-Martin. Après quelques kilomètres, une première puis une seconde bifurcation dont les fléchages indiquent en clair « grotte du Chat » se proposent : il est préférable de garer son véhicule dès que le chemin vicinal tourne franchement à la piste, car elle devient rapidement impraticable aux voitures ordinaires. C'est donc à pied que l'on remontera en corniche la vallée d'un torrent, « le Riou » ou « Rioul », et que l'on rejoindra en quelques minutes une barre de calcaire bien visible dans le paysage (Fig. 1) et dans laquelle, deux mètres en contre-haut du sentier, l'entrée de la grotte est évidente malgré sa petite taille.

Une fois la grille franchie, on pénètre dans une salle d'entrée, spacieuse et relativement chaotique, s'achevant sur un ressaut de deux mètres. Le ressaut dégringole dans un tronçon de galerie au sol plan, qui débouche dans un vaste volume assez complexe, compartimenté par d'amples ondulations de la voûte, baptisé « salle des Santons » en référence à trois stalagmites alignées rappelant avec beaucoup d'imagination la procession des rois mages.

A main droite se développe un labyrinthe de conduits réticulés de calibres variés, « le dédale », qui a vu plus d'un visiteur tourner « un certain temps » avant de retrouver son chemin. Avec de l'habitude, de la chance ou de l'obstination, on débouche dans la galerie Victor de Cessole, couloir d'une centaine de mètres, de taille humaine et presque rectiligne, qui se termine sur un pincement du conduit.

Dans les plafonds des deux dernières dizaines de mètres, des étroitures verticales facilement escaladées permettent d'accéder à une salle, de laquelle une autre étroiture entre blocs permet de redescendre dans un second réseau grossièrement parallèle à la galerie de Cessole.

Ce réseau, assez joliment concrétionné, revient vers le Sud et boucle au Nord de la salle principale. Avant la jonction, au sol et à main droite, une boîte aux lettres donne dans un diverticule chaotique sans continuation qui revient également vers le Sud.

Si on additionne tous les petits segments de boyaux de cette grotte labyrinthique, on totalise près d'un kilomètre de développement, mais en réalité on ne se trouve jamais à plus de 200 mètres de l'entrée...

CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le village de Daluis se situe en marge du dôme de Barrot, vaste bombement de pélites rouges dans lesquelles le Var et ses affluents se sont taillés de spectaculaires canyons qui ont valu jadis à cette région l'appellation de « Colorado niçois ».

Sur ces pélites permienes continentales, la grande transgression secondaire a déposé une série sédimentaire marine débutant par les quartzites du Werfénien, puis des argiles et des évaporites du Keuper, surmontés de tous les termes échelonnés du Trias au Crétacé supérieur ; cette série stratigraphique a été fort bouleversée par le charriage de la couverture lors de l'orogénèse alpine, de quoi il résulte un paysage plutôt tourmenté où marnes, argiles, gypse et calcaires se mêlent de façon assez désordonnée.

Le village de Daluis lui-même est bâti sur un diapir de gypse (tG sur la carte géologique), déposé au Trias dans des lagunes marines sursaturées ; dans ce contexte d'évaporation intense, du sel s'est naturellement déposé avec le gypse, ce que révèle la toponymie sur la commune de Daluis même, au lieu-dit « la Salette ».

La grotte du Chat, relativement éloignée du village, se développe dans un lambeau de calcaire barrémien de pendage subvertical (n4 sur la carte), encadré de marnes et de marno-calcaires (sur la carte, n1-3 est le Néocomien marneux et n6-c1 le Cénomanién inférieur).

Ce lambeau de calcaire barrémien constitue l'extrémité Sud d'un affleurement que l'on peut suivre pratiquement jusqu'au col de la Cayolle, et qui est dilacéré par une faille appartenant à un faisceau satellite de l'arc de Castellane ; sur le terrain, la faille est bien visible à droite du porche, et au droit de la grotte en rive droite du Riou.

UN MODE DE FORMATION ORIGINAL

La situation de grotte du Chat semble a priori bien s'intégrer au modèle de l'émergence karstique devenue fossile par suite de l'enfoncement du niveau de base, aussi la formation de la cavité n'a-t-elle guère interpellé les spéléologues dans le passé ; il faudra attendre 1993 pour que Bruno Ducluzaux, associant explicitement la formation de la grotte à la source sulfureuse (pourtant connue depuis longtemps) qui coule dans le lit du Riou 90 mètres en contrebas de la grotte, propose un mode de creusement lié à l'hydrothermalisme et à la chimie des sulfates. Dès lors, un examen plus attentif des caractéristiques de la grotte, en particulier ses singularités peu compatibles avec une karstification conventionnelle, s'imposait : ce fut l'objet de nos travaux en 2005 et d'un stage « Equipier scientifique » de la Fédération Française de Spéléologie en 2006. Avant d'examiner la grotte du Chat sous cet angle, un état succinct de la question hypogène est proposé ci-après.

Historique de la problématique hypogène

Dans les années 1970 - 1980, des chercheurs américains qui travaillaient, l'un dans la grotte de Lower Kane, Wyoming (Egemeier), les autres dans le système de Carlsbad Cavern, Nouveau Mexique (Hill, Palmer...), ont été étonnés par les quantités considérables de gypse que recèlent ces cavités : ce minéral étant fortement soluble, un creusement karstique conventionnel provoqué par les infiltrations d'eaux venues de la surface n'aurait dû laisser que peu de gypse dans la cavité. Peu à peu, ils ont été amenés à conclure que ces cavités s'étaient creusées en raison de

remontées de fluides profonds, liquides, gazeux ou mixtes, chargés de composés sulfurés : suite à des processus complexes impliquant des bactéries, la transformation des composés sulfatés ou sulfurés en acide sulfurique avait provoqué une intense corrosion des carbonates, et leur conversion en sulfates.

La corrosion sulfurique par des remontées de fluides profonds, qualifiée d'« hypogène » par opposition à la corrosion « épigène » causée par des percolations d'eaux directement issues de la surface, a tout d'abord été accueillie dans la communauté scientifique avec scepticisme, puis a été admise comme un phénomène marginal ; mais un peu partout dans le monde, un nombre croissant de cavités ont été identifiées comme relevant de ce processus : tout d'abord la douzaine de grottes hydrothermales actives connues en tant que telles souvent depuis l'antiquité (grotte des Serpents à Aix-les-Bains, système de Frasassi en Italie, grottes de Buda en Hongrie), puis d'autres, inactives mais identifiées comme hypogènes (grottes de Rhar Kab Shrir, massif des Bibans, Algérie) ; certaines cavités sulfuriques récemment découvertes de façon fortuite se sont même ajoutées à la liste (grotte de Movile, Roumanie, en 1986).

Aujourd'hui, la part du creusement hypogène dans les vides souterrains en domaine calcaire apparaît de plus en plus significative : à la lumière de ces avancées, un nouveau regard s'est imposé, en particulier sur la question de la karstification primitive et sur les cavités reconnues par forage en zone noyée ou profonde.

Le processus de karstification hypogène

La plupart des aquifères auxquels on accède physiquement (spéléologie) ou techniquement (forages) sont relativement superficiels ; mais l'eau est également présente dans les couches géologiques profondes, à plusieurs centaines voire plusieurs milliers de mètres sous la surface. Là, elle est soumise à des pressions et des températures importantes : le gradient géothermique général est en effet de $3^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$ (c'est-à-dire que la température s'élève de un degré lorsqu'on descend de 33 mètres dans la croûte terrestre). Dans ces conditions physiques particulières, l'eau dissout massivement dans les roches lessivées à grande profondeur des minéraux et des gaz, notamment du gaz carbonique et de l'hydrogène sulfuré qui sont de loin les gaz les plus solubles (l'eau peut en contenir plusieurs grammes par litre) et qui sont très présents dans la croûte terrestre ; des minéraux solubles comme les chlorures et les sulfates sont dissous, ainsi que, si le calcaire est présent dans l'encaissant, de grandes quantités de carbonate de calcium ; enfin, dans ce contexte anoxique, des ions ferreux et du manganèse sont mobilisés.

Si ces aquifères sont confinés, et si leur zone de recharge est en situation géographique surincombante, les eaux peuvent resurgir en surface dans des zones moins élevées (artésianisme) à la faveur d'une opportunité structurale (généralement une faille). Lorsqu'elles remontent en surface, ces eaux profondes sont qualifiées d'« hydrothermales » en raison de leur température anormalement élevée ; à la pression atmosphérique, les gaz dissous à grande profondeur, souvent en grande quantité, sont libérés et l'eau pétillante (eaux minérales gazeuses).

L'hydrothermalisme se rencontre dans à peu près n'importe quel paysage géologique : en plein domaine cristallin ou plutonique, par exemple à Chaudes-Aigues dans le Cantal (où les sources qui jaillissent à 82°C ne doivent rien à l'ancien volcanisme auvergnat), aussi bien qu'en paysage calcaire (Gréoux-les-Bains, Digne-les-Bains, Aix-les-Bains...). Le cas qui intéresse les spéléologues est naturellement celui où les couches superficielles

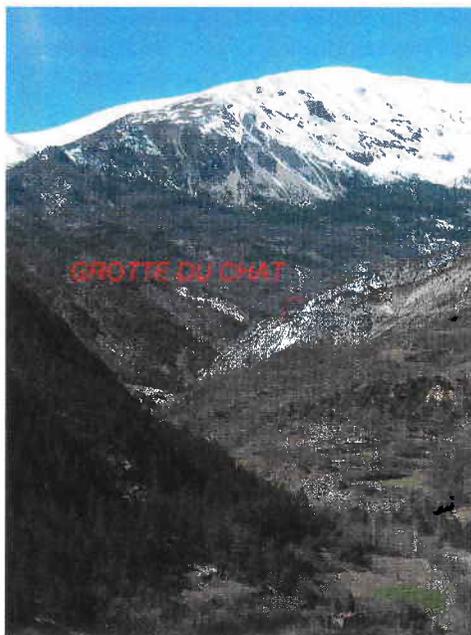


Fig. 1 : la vallée du Riou et la barre barrémienne de la grotte du Chat (photo J-C d'Antoni-Nobécourt)



Fig. 2 : la vasque de la source sulfureuse et ses filaments bactériens (photo J-Y Bigot)

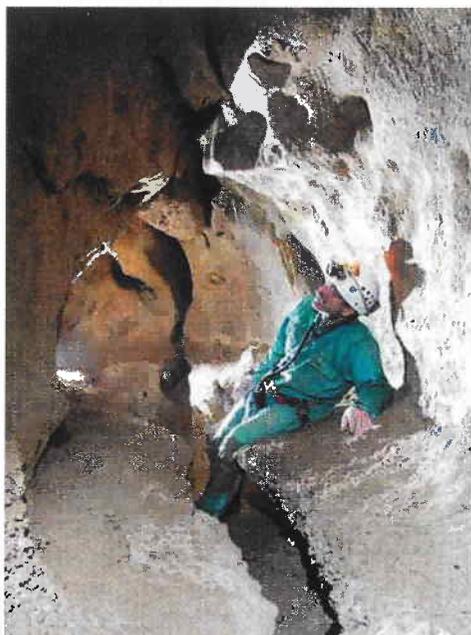


Fig. 3 : galerie dans le secteur du Labyrinthe profondément incisée par un chenal d'écoulement de fluides corrosifs (photo J-Y Bigot)

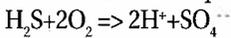


Fig. 4 : processus de corrosion et de déposition sur un même objet dans la grotte du Chat (photo J-Y Bigot)

sont calcaires, car le transit d'eaux hydrothermales va y déclencher une série de processus érosifs et dépositionnels spécifiques, à la fois proches et différents d'une karstification « classique ». L'agent de corrosion du karst « habituel » est en effet le gaz carbonique, qui forme avec l'eau un acide faible capable d'attaquer le calcaire, mais, dans le contexte hydrothermal, les concentrations sont massives et le processus de corrosion considérablement plus efficace.

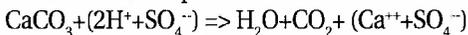
Le second agent de corrosion des cavités hypogènes est encore plus agressif, mais ce processus, dans lequel des bactéries jouent un rôle essentiel, ne se met en place que si l'eau a dissous des composés soufrés : dans les conduits profonds, en milieu sulfuré strictement anoxique, aphotique, et sous des températures élevées, des bactéries archaïques, proches de celles qui colonisent les « fumeurs noirs » des dorsales océaniques, se développent. Ces bactéries, dites chimiautotrophes et sulforéductrices, fondent une partie de leur métabolisme sur la réduction des sulfates en sulfures et en sulfites, et rejettent notamment du sulfure d'hydrogène et du soufre natif, exactement comme les organismes supérieurs rejettent du gaz carbonique. A la base de cette chaîne biologique bien circonscrite par certains chercheurs (Barton & Luiszer 2005), une ressource en carbone métabolisable semble requise : elle est puisée soit dans des dépôts fossiles (hydrocarbures dans le cas de Lechuguilla), soit dans des substances organiques piégées dans des remplissages exogènes récents.

Le sulfure d'hydrogène entre dans des boucles chimiques qui aboutissent à la production d'acide sulfurique :



(Hydrogène sulfuré + oxygène => acide sulfurique)

L'oxydation du sulfure d'hydrogène peut se faire grâce à l'oxygène atmosphérique ou à l'oxygène dissous dans des apports d'eau de surface, ce qui implique que la production d'acide sulfurique est maximale au niveau piézométrique, à l'interface air/eau ; mais, même en l'absence d'oxygène libre, les sulfites peuvent réagir avec l'eau pour produire de l'acide sulfurique. Cet acide dissout le calcaire et forme du gypse :



(Carbonate de calcium + acide sulfurique => eau + gaz carbonique + sulfate de calcium, c-a-d gypse)

Le gypse, très soluble, est éliminé par l'écoulement des eaux.

Une seconde série de boucles biochimiques fait appel à des communautés de bactéries plus ou moins aérobies présentes dans la tranche oxygénée du système hydrothermal. Ces colonies bactériennes, baptisées « snottites » par les chercheurs américains, se présentent dans les cavités actives connues (grotte de Villa Luz, Tabasco, Mexique) comme des amas organiques liés par une matrice visqueuse, collés sur les parois ou pendant des voûtes ; elles effectuent la réduction des sulfates et l'oxydation des sulfures en produisant également de l'acide sulfurique et de nombreux acides organiques, distillant des gouttes extrêmement corrosives dont le pH est couramment inférieur à 3, parfois à 1, amplifiant localement le processus de corrosion.

A noter que la corrosion sulfurique du calcaire libère du gaz carbonique lequel, dissous dans l'eau, va élever encore le seuil de saturation de l'eau à l'égard du calcium, et ajouter une corrosion carbonique « classique » à la corrosion sulfurique.

Enfin, dans les niveaux supérieurs des cheminées hydrothermales, des « cuisines » minérales variées et pas totalement connues dans le détail se produisent et abandonnent dans les conduits des remplissages spécifiques. Au contact de l'oxygène véhiculé par

les eaux d'infiltration météorique, le manganèse et les ions ferreux s'oxydent et précipitent en oxydes de manganèse et oxyde ferrique, parfois fixés sur un support bactérien, constituant des concrétions sans équivalent dans le karst « normal » : « pool fingers » de goethite sur filament bactérien de l'aven du Chat (Lagnes, Vaucluse) « chocolate flakes » de la grotte des Iboussières (Malataverne, Drôme) ; les concrétionnements de goethite de la grotte du Pieï (Lagnes, Vaucluse) étaient si importants qu'ils ont fait l'objet d'une petite exploitation minière au début du XX^{ème} siècle (Fig. 8). D'autres minéraux plus rares, comme la galène (sulfure de plomb PbS) ou la célestine (sulfate de strontium SrSO₄) sont parfois déposés ; plus couramment, la calcite se cristallise en scalénoèdres de très grandes dimensions caractéristiques du milieu hydrothermal : les analyses d'inclusions fluides dans les scalénoèdres décimétriques de la grotte de Champlang (Ardèche) ont ainsi établi qu'ils ont cristallisé sous des températures supérieures à 100°C, donc dans un environnement incontestablement hydrothermal.

Ces remplissages insolites sont des indices majeurs d'hydrothermalisme dans les cavités hypogènes pénétrables, même si ces cavités sont aujourd'hui inactives.

L'EMPREINTE SULFURIQUE DANS LA GROTTÉ DU CHAT

L'identification d'une cavité hypogène lorsqu'elle est active est aisée en raison de la physico-chimie particulière des eaux hydrothermales, relativement chaudes (entre 37 et 41°C à la grotte des Serpents, Aix-les-Bains, Savoie) et qui dégagent souvent du gaz carbonique et/ou du sulfure d'hydrogène à l'odeur caractéristique (grotte de Villa Luz, Tabasco, Mexique) ; le taux de H₂S dans l'atmosphère de certaines cavités hydrothermales actives peut même atteindre des concentrations de l'ordre de 120 ppm (soit 120µg par gramme d'air), mortelles pour l'homme. A minima, l'analyse chimique de l'eau révélera une minéralité particulière, fonction de la nature des roches qu'elle a baigné en profondeur, notamment des chlorures, des sulfates et des sulfures si elle a été en contact avec des évaporites.

Mais dans une cavité hypogène désactivée, il n'y a pas d'eau chaude et odorante pour comprendre que l'on n'est pas dans une cavité « ordinaire » ! Dans un tel cas, la multiplicité et la convergence des indices spécifiques de la spéléogénèse hypogène et de la corrosion sulfurique sont autant d'arguments qui trahissent leur origine ; dans le cas de la grotte du Chat, l'argument le plus évident est la source du vallon du Riou, qui est sans aucun doute possible associée à son creusement : elle est située en position de piémont dans la même dalle barrémienne que la grotte et comme elle au contact calcaire/marnes (Fig. 6) ; sur le versant séparant la grotte de l'émergence, on observe plusieurs conduits fossiles étagés témoignant de l'enfoncement progressif du niveau de base.

On se propose donc tout d'abord de détailler les caractéristiques physico-chimiques de la source hydrothermale du vallon du Riou, puis de détailler les indices de spéléogénèse hypogène relevés dans la grotte elle-même.

La source sulfureuse

Citée (mais pas localisée) dans l'inventaire Créac'h, légèrement utilisée à des fins touristiques par les guides de randonnée locaux, elle sourd dans le lit même du torrent le Riou, 90 mètres en contrebas de la grotte du Chat. Ses coordonnées Lambert III sont 956,562 / 3201,730 / 830.

Elle est peu visible car, au gré des alluvionnements, son exutoire se trouve souvent sous le niveau de l'eau du torrent, mais elle est repérable par une puissante odeur d'hydrogène sulfuré (c'est-à-dire d'oeuf pourri) perceptible à plusieurs mètres. Quelques blocs l'entourent qui lui aménagent une sorte de vasque d'eau tiède et laiteuse (Fig. 2). Certains auteurs attribuent l'aspect laiteux des sources sulfureuses à du soufre natif en suspension (Hose & Pizarowicz 1999).

Les parois de la vasque sont recouvertes de filaments bactériens blancs, fins mais très fournis, centimétriques. Des filaments bactériens blancs identiques peuvent être observés dans d'autres sources sulfurées froides ou tempérées (source Huguette, Saint-Martin-les-Eaux, Alpes-de-Haute-Provence). D'autres formes d'agrégats bactériens sont observées dans les sources sulfurées chaudes (source d'Alun, Aix-les-Bains, Savoie).

Température et débit : la source sourd dans le lit même du Riou et il est souvent impossible d'en estimer *de visu* le débit. L'émergence se situant sur la rive extérieure d'une courbe du torrent, il a été possible dans le cadre du stage « Equipier Scientifique » de shunter le virage par un chenal de dérivation creusé dans les alluvions, ce qui devait permettre d'isoler la source et de tenter une mesure de débit ; quelques mètres en aval des émergences, un petit seuil et un déversoir de fortune ont été aménagés : le débit mesuré en mars 2006 était de l'ordre de 6 l.s^{-1} . Le même dispositif a été utilisé le 30 juillet à l'étiage et a donné un débit de l'ordre de $2,5 \text{ l.s}^{-1}$.

Ces valeurs sont des minimales, car il n'est pas exclu qu'il y ait des sous-écoulements diffus dans les alluvions : il a été noté en plusieurs endroits dans le chenal d'origine des filaments bactériens fixés sur des galets, sans qu'on puisse savoir si les galets en question étaient en place ou non ; le fait qu'à une vingtaine de mètres à l'amont de la source, on sente localement de fortes émanations d' H_2S peut être un autre indice de sous-écoulements. L'assèchement du chenal a d'ailleurs révélé des griffons deux mètres en amont et un mètre à l'aval de la vasque, qui sont intégrés dans le débit mesuré. A l'amont immédiat de ce griffon, une fissure corrodée donne d'ailleurs accès à un conduit impénétrable où coule un sous-écoulement souterrain.

Le 1er novembre 2005, la température de la source était de $17,5^\circ\text{C}$, alors que celle du torrent était de 11°C (mesures Ph. Audra) ; le 18 mars 2006, lors du stage, la température de la source était de $17,5^\circ\text{C}$ et celle du torrent de $6,7^\circ\text{C}$ (mesures E. Gilli) ; le 30 juillet 2006 à 15 heures, en pleine canicule, la température de la source était de $18,5^\circ\text{C}$ alors que celle du torrent dépassait 24°C (mesures J-C d'A-N). La température dans la grotte du Chat oscille quant à elle entre 11°C (novembre 2005) et $12,5^\circ\text{C}$ (avril 2006).

On constate que :

- La température de la source est stable et nettement supérieure à celle de l'endokarst, ce qui indique un transit en zone profonde : compte tenu du différentiel thermique de l'ordre de 6°C et du gradient géothermique général, l'eau remonte au moins de 200 mètres sous la surface ; cette estimation est assurément sous-évaluée car des échanges thermiques entre l'eau et l'encaissant se produisent nécessairement au cours de l'ascension.

- Le débit subit une influence saisonnière marquée, mais sans grande amplitude ; dans le même temps, la température semble peu influencée par les conditions extérieures et par celle des eaux de ruissellement : on peut donc supposer que la source est peu contaminée par les apports directs de la surface, et que les eaux qu'elle restitue ont un temps de transit important à travers un aquifère peu transmissif qui amortit les variations de température et de débit.



Fig. 5 : l'entrée de la grotte du Chat ; remarquez le miroir de faille à droite du porche (photo R-M d'Antoni-Nobécourt)



Fig. 6 : la source sulfureuse dans le vallon du Riou (photo J-C d'Antoni-Nobécourt)

Ces éléments caractérisent une circulation non pas de type karstique « stricto sensu », mais dans un aquifère confiné et relativement profond. En deux mot : hydrothermale et artésienne.

Cependant, l'ordre de grandeur du débit demeure théoriquement compatible avec un impluvium limité à la surface demi-kilométrique du lambeau de calcaire barrémien encaissant strictement la grotte, intégré selon le coefficient d'infiltration spécifique calculé par E. Gilli pour les karsts du Sud-Est : cela ne signifie nullement que l'eau de la source est collectée sur le micro-karst de la grotte du Chat, mais qu'en l'état la question de l'origine de l'eau reste entière.

Composition chimique : compte tenu de la proximité des évaporites du Keuper, des vigoureux effluves de sulfure d'hydrogène, de la couleur de l'eau et du creusement de la grotte, on s'attend à ce qu'au laboratoire apparaisse une très forte présence de sulfates et de sulfures ; or, l'analyse chimique (voir tableau) révèle une minéralisation en sulfates nette mais relativement modérée : un peu moins de 40 mg.l⁻¹ ; ce taux est vingt à trente fois inférieur à celui mesuré dans les grottes hypogènes actives de Villa Luz (Mexique) et de Glenwood (Colorado) ; il est vingt fois inférieur à celui de la source de la Mescla (Malaussène, Alpes-Maritimes) qui n'est pourtant qu'en partie hydrothermale (d'après Reynaud 2000, valeurs relevées à l'étiage en octobre 1997). En revanche, il se trouve dans l'ordre de grandeur de celui de la source hydrothermale d'Alun (grotte des Serpents, Aix-les-Bains, Savoie).

Tableau comparatif des caractéristiques physico-chimiques de quelques sources hydrothermales en domaine calcaire

	<i>Grotte du Chat, Daluis, 06</i> (échantillon n° 3489 prélevé le 18/03/08, analysé le 20/03/08)	<i>Source d'Alun, Aix les Bains (1998)</i>	<i>Cueva de Villa Luz, Mexique</i> (Gordon&Rosen, 1962)	<i>Glenwood Cave, Colorado (1989)</i>	<i>Grotte de la Mescla, d'après Reynaud 2000, étiage Octobre 1997</i>	
PH	non mesuré	6,5	7,1	6,4	7,15	
Température	17,5 °C	40 °C	29 °C	49,6 °C	23,5 °C	
Chimie générale	Calcium Ca ²⁺	40,3 mg/l <i>2,01 meq/l</i>	125 mg/l <i>6,24 meq/l</i>	240,5 mg/l <i>12,00 meq/l</i>	690,4 mg/l <i>34,45 meq/l</i>	270 mg/l <i>13,47 meq/l</i>
	Magnésium Mg ²⁺	8,7 mg/l <i>0,72 meq/l</i>	17,5 mg/l <i>1,44 meq/l</i>		84,6 mg/l <i>6,96 meq/l</i>	53 mg/l <i>4,36 meq/l</i>
	Sodium Na	51,4 mg/l <i>2,24 meq/l</i>	30 mg/l <i>1,30 meq/l</i>	0,5 mg/l <i>0,02 meq/l</i>	6574 mg/l <i>285,86 meq/l</i>	1360 mg/l <i>59,14 meq/l</i>
	Potassium K ⁺	1 mg/l <i>0,03 meq/l</i>	4,5 mg/l <i>0,12 meq/l</i>	11,7 mg/l <i>0,30 meq/l</i>	125 mg/l <i>3,20 meq/l</i>	47 mg/l <i>1,20 meq/l</i>
	Somme cations	4,99 meq/l	9,10 meq/l	12,32 meq/l	330,47 meq/l	78,17 meq/l
	Chlorure Cl ⁻	27 mg/l <i>0,76 meq/l</i>	22,5 mg/l <i>0,63 meq/l</i>	531,8 mg/l <i>15,00 meq/l</i>	9706 mg/l <i>273,77 meq/l</i>	2080 mg/l <i>58,67 meq/l</i>
	Sulfates SO ₄ ²⁻	36,4 mg/l <i>0,76 meq/l</i>	145 mg/l <i>3,02 meq/l</i>	864,5 mg/l <i>18,00 meq/l</i>	1102 mg/l <i>22,94 meq/l</i>	880 mg/l <i>18,32 meq/l</i>
	Nitrates NO ₃ ⁻	<1 mg/l			0,2 mg/l	mg/l
	Sulfure S ²⁻	1,7 mg/l <i>0,03 meq/l</i>		Faible odeur d'H ₂ S	1,7 mg/l <i>0,03 meq/l</i>	mg/l <i>meq/l</i>
	TH en mg/l HCO ₃ ⁻	234,2 mg/l <i>3,84 meq/l</i>	262 mg/l <i>4,29 meq/l</i>		664 mg/l <i>10,88 meq/l</i>	180 mg/l <i>2,95 meq/l</i>
	TH en degré Français	19,2 °F				
Somme anions	5,38 meq/l	7,95 meq/l	33,00 meq/l	307,62 meq/l	79,94 meq/l	
Métaux	Fer total	22 µg/l				
	Cuivre total	<10 µg/l				
	Silice SiO ₂		24 mg/l		30,2 mg/l	mg/l

Cette relative pauvreté en sulfates (à titre de comparaison, Hépar, une eau minérale de consommation, en contient 1530 mg.l⁻¹ soit quarante fois plus !) est intuitivement perçue comme une condition plutôt défavorable à la spéléogénèse par corrosion sulfurique. Mais, au-delà du fait que nous mesurons aujourd'hui une eau dont la chimie a pu varier depuis le stade actif de la grotte du Chat, il convient de remarquer que, curieusement, l'émergence hydrothermale du Riou émet de grandes quantités d'H₂S alors que la source d'Alun, avec une teneur en sulfates supérieure, n'a qu'une très faible odeur, à peine perceptible même dans la salle confinée où elle est captée. Cette observation est encore mieux vérifiée dans la grotte de la Mescla où l'eau est 25 fois plus sulfatée que celle de la source hydrothermale du Riou, mais où la présence d'H₂S n'est pas signalée dans littérature.

Ceci indique ou confirme que la présence de sulfates n'est qu'une condition nécessaire mais pas suffisante à la production de sulfure d'hydrogène et d'acide sulfurique biogéniques. Or le Trias des Alpes-Maritimes contient bien sûr des sulfates, mais aussi des passées carbonneuses, qui furent par exemple exploitées dans la haute vallée de la Cagne (mines de Lignite de Vescagne) : ce pourrait être ici la source du carbone métabolisable que Barton et Luiszer (Barton & Luiszer 2005) font intervenir dans la boucle biochimique de production d'H₂S en milieu profond ; les marnes noires néocomiennes au contact desquelles se développe la grotte du Chat sont également riches en matières carbonées diffuses qui peuvent alimenter le processus. Il n'y a donc pas nécessairement de corrosion sulfurique en contexte très sulfaté, mais en revanche il y a corrosion sulfurique en contexte même modérément sulfaté dès lors que les autres composantes du cycle biochimique sont représentées, en particulier du carbone métabolisable.

La température de l'eau et sa stabilité interviennent probablement aussi dans la partition des associations bactériennes qui s'établissent en milieu hydrothermal, donc dans la production de H₂S et dans la spéléogénèse : à la grotte de la Mescla, les précipitations induisent dans la source des variations de température d'une amplitude de 10°C et des variations de concentrations dans un facteur de 1 à 100, ce qui constitue probablement des conditions défavorables au développement d'associations bactériennes stables. A contrario, ces variations sont a priori faibles dans la source sulfureuse du vallon du Riou.

En conclusion, la source géologiquement associée à la grotte du Chat semble bien être dans les conditions de permettre ou d'avoir permis la production d'acide sulfurique intervenant dans le creusement de la cavité.

Indices structuraux

La remontée d'eaux profondes nécessite peu ou prou une configuration d'aquifère artésien, ce qui a été bien établi pour la grotte des Serpents (Aix-les-Bains, Savoie), et suggéré par Alain Mangin pour la gouffre de la Vapeur et la grotte de l'Ermite (Ussat-les-Bains, Ariège). Ce type de circulation hydrologique, pas toujours aisée à cerner quand la cavité est active, demeure conjecturale quand la cavité est fossile : la grotte du Chat et sa source sulfureuse sont dans ce cas.

En revanche, une discontinuité majeure affectant la couverture constitue fréquemment une opportunité de remontée de fluides profonds en mode artésien et, de fait, la plupart des cavités hypogènes sont situées à proximité de failles ou de grands linéaments. C'est le cas dans la vallée de la Durance pour la grotte des Iboussières (Malataverne, Drome) et du gouffre de la Vapeur (Ussat-les-Bains, Ariège) : c'est aussi le cas de la grotte du Chat et de son émergence sulfureuse, établies à la faveur d'une faille appartenant à un faisceau satellite de l'arc de Castellane (Fig. 5).

Indices physiques

L'atmosphère d'une cavité hypogène, même fossile, semble souvent relativement chaude : en effet, dans les cavités épigènes, les écoulements des eaux de surface ont un effet climatique qui oblitère le gradient géothermique (c'est un chauffage central à l'envers : l'eau qui descend de la surface amène des frigidités) ; or, une cavité hypogène n'étant pas creusée par ces écoulements, elle en draine peu et la « clim » ne fonctionne pas bien : le gradient géothermique y agit donc de façon plus directe. C'est là un des indices qui permettent de poser la question de l'origine hypogène de la grotte de Scogli Neri (Ligurie, Italie). En revanche, la grotte du Chat se développant sous une faible couverture et dans une faible tranche altitudinale, le gradient géothermique n'y agit guère et ne permet pas de relever une anomalie thermique.

Indices minéralogiques

On observe dans la grotte du Chat une abondance d'encroûtements centimétriques de gypse, disséminés dans toute la cavité et localement importants : les quantités, sans rapport avec la composition du calcaire encaissant barrémien, seraient surprenantes en contexte karstique « traditionnel », et signent la corrosion sulfurique. Le gypse de substitution fait typiquement partie des indices de corrosion d'origine hydrothermale observés, par exemple dans le système de Frasassi (Italie), dans la Kraus Höhle (Autriche), et, bien sûr, à Lechuguilla (Nouveau Mexique).

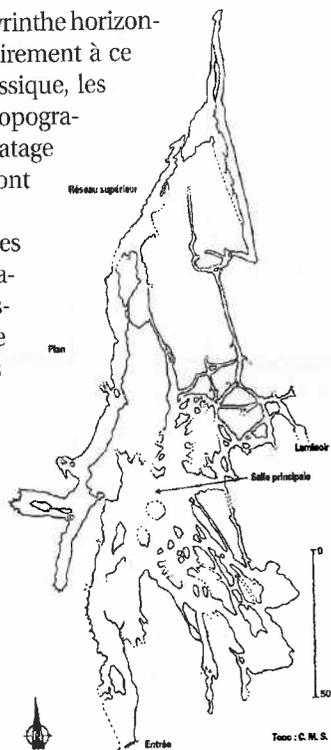
Indices hydrologiques

La grotte du Chat se développe sur un schéma de labyrinthe horizontal rappelant un banal delta souterrain, mais contrairement à ce qu'on devrait observer dans un drain karstique classique, les galeries s'amenuisent très rapidement vers l'amont topographique (terminus Cessole), non pas à cause du colmatage mais par absence pure et simple de creusement : l'amont apparent n'est donc pas un amont hydrologique.

Dans les plafonds, toutes les coupoles sont aveugles, les fractures sont pincées : les eaux qui ont creusé les galeries ne provenaient donc pas non plus de drains sus-jacents ; du reste, les reliefs environnant ce minuscule karst ne se prêtent pas à l'organisation de drainages allochtones alimentant la grotte via des pertes de contact. Enfin, il n'y a pas dans la grotte de galet, de boue ni de limons qui attestent d'un fonctionnement fluviokarstique.

Le maillage des galeries est en grande partie commandé par des diaclases pluridécimétriques qui entaillent la salle des Santons et la galerie de Cessole : or, leurs bords francs et nets ne sont pas modelés par l'absorption d'un actif, ce qui se serait produit si elles avaient participé à un drainage gravitaire classique, avec enfoncement du niveau de base.

On doit donc conclure qu'il n'y a jamais eu dans la grotte du Chat un actif épigénique dégringolant



Topographie en plan de la grotte du Chat (C.M.S.)



Fig. 7 : la salle principale de la grotte du Chat et ses tables de corrosion
(photo Ludovic Mocochain)



Fig. 8 : concrétions de goéthite sur support bactérien de la grotte de Lagnes, Vaucluse
(photo J-Y Bigot)

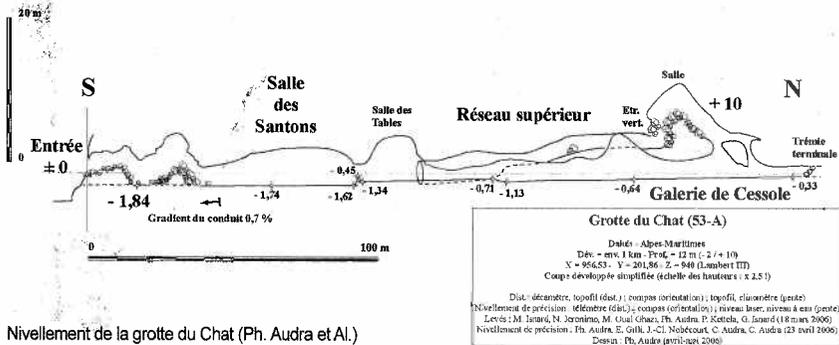
de l'épikarst à la recherche de la zone noyée, mais que l'eau s'extravasait nécessairement dans la cavité par ces diaclases ; elle a simplement cessé de s'extravaser lorsque le niveau de base s'est abaissé. Le sourcilon de quelques l.s.¹ à une dizaine de l.s.¹ qui est associé à la grotte du Chat ne semble d'ailleurs pas pouvoir rendre compte à lui seul de la dimension des conduits dans un schéma karstique conventionnel.

Le caractère non épigénique du creusement peut parfois ne pas être aussi clair que dans la grotte du Chat, car les cavités hypogènes fortuitement recoupées par des circulations karstiques épigéniques (grotte de l'Ermitte, Ussat-les-Bains, Ariège) peuvent présenter des remplissages exogènes masquant leur spéléogénèse originelle.

Indices macromorphologiques

La gravité n'étant pas le moteur mécanique du creusement hypogène, la verticale n'est pas privilégiée dans les cavités d'origine hydrothermale même en milieu relativement isotrope : le fluide qui creuse du bas vers le haut passe « où il veut » et « où il peut », la cavité est donc souvent oblique, anastomosée, labyrinthique (grotte Batori en Hongrie, grottes de Rhar Kab Shrir en Algérie, probablement aussi grotte de Scoglie Neri en Italie) : cette organisation générale se distingue donc bien du puits - méandre classique en karst « stricto sensu ». Cependant les cavités hypogènes peuvent parfois présenter, à l'instar du karst classique, une organisation en conduits plutôt verticaux (grottes de Pigette à Gréoux-les-Bains, Alpes-de-Haute-Provence, ou gouffre de la Vapeur, Ussat-les-Bains, Ariège) ou en conduits horizontaux (grotte de Villa Luz, Tabasco, Mexique), mais contrairement au karst gravitaire, la zone de transfert vertical se trouve au-dessous de la zone de transfert horizontal : ce sont des cheminées (pas toujours pénétrables) et non des puits ; contrairement à une cavité karstique « stricto sensu », la hiérarchisation de la cavité hypogène verticale décroît avec la profondeur (grotte de l'Ermitte, Ussat-les-Bains, Ariège). La zone de transfert horizontal (pas toujours développée) est une zone d'extravasement qui matérialise le niveau de base (grotte des Serpents, Aix-les-Bains, Savoie). Il est possible d'y identifier les points d'émission de fluides hydrothermaux, fissures ou conduits ascendants qui typiquement ne présentent pas de morphologies compatibles avec un fonctionnement absorbant.

L'organisation générale de la grotte du Chat est marquée par une remarquable planéité des conduits : le gradient des conduits est de 0,7%. Aucune zone de transfert vertical n'est identifiable au-dessus de la cavité, mais des fissures remontantes émissives sont clairement identifiables. La grotte du Chat est donc, comme la grotte des Serpents et la grotte de Villa Luz, une « water-table cave » creusée par corrosion au niveau du piézomètre.



Indices mesomorphologiques

La production d'acide sulfurique se produisant de façon concentrée à l'interface air/eau, où l'hydrogène sulfuré H_2S trouve de l'oxygène atmosphérique disponible pour s'oxyder en H_2SO_4 , la corrosion est massive au niveau de la surface de la nappe, importante au-dessus (convections d'air chaud chargé d'acide), mais moins importante dans les niveaux ennoyés ; il s'en suit le creusement de galeries horizontales en ogive dont les parties basses sont entaillées de profondes encoches de corrosion. Ce processus est parfois développé à un point tel que la nappe taille dans l'encaissant, autour des fissures ou conduits émissifs, de larges salles au plancher horizontal et plan matérialisant la surface piézométrique (grotte de Villa Luz, Tabasco, Mexique). Ces planchers rectifiés par la dissolution acide sont souvent repris secondairement par des écoulements corrosifs qui y incisent des rigoles et des chenaux, formant dans ce cas de très caractéristiques « tables de corrosion » en roche massive (grotte des Serpents, Aix-les-Bains, Savoie). Ces tables de corrosion sont spectaculaires dans la salle des Santons de la grotte du Chat (Fig. 7).

La similitude de ces encoches et chenaux avec des formes connues dans le karst épigène (banquettes d'érosion et trous de serrure) peut conduire à une interprétation erronée. Ainsi, dans le secteur du dédale, certaines galeries au sol plan présentent des surcreusements vigoureux, pluridécimétriques et tranchés dans le bed-rock comme à la machine (Fig. 3) ; or, le gradient est régulier et quasiment nul dans la cavité (0,7%, nivellement Audra, Gilli et Nobécourt 23/04/06) : ceci implique des écoulements dont la faible énergie potentielle ne peut expliquer ces chenaux entaillés à l'emporte-pièce : ces figures de corrosion ne peuvent être imputées qu'à un caractère particulièrement corrosif des écoulements.

Indices micromorphologiques

Y figurent essentiellement les formes qui relèvent de très forts pouvoirs de corrosion des fluides hydrothermaux, chargés d'acide sulfurique ou carbonique.

Les plus caractéristiques sont des « lapiés de parois », rigoles profondément incisées par les ruissellements ou égouttages en milieu exondé de « jus bactériens » dont les pH mesurés sont inférieurs à 3. Il existe dans la paroi Est de la galerie de Cessole un petit lapiaz de paroi aux rigoles très profondément incisées, qui ne peut résulter que de ruissellements extrêmement corrosifs ; il est environné de gypse qui atteste d'une corrosion sulfurique. Quoique discrète, cette forme est probablement le plus bel exemple, peut-être le seul, de lapiaz pariétal sulfurique identifié en France à ce jour.

Typiques également sont les « bubble trails », chemins de bulles de gaz corrosifs en milieu noyé provoquant une corrosion localisée au long de leur ascension contre paroi (grotte des Champignons, Puylobrier, Bouches-du-Rhône ou grotte de l'Ermitte, Ussatles-Bains, Ariège). On observe également dans certaines cheminées hypogènes des indices pariétaux de flux remontant (coups de gouge du puits de la grotte de l'Ermitte, Ussatles-Bains, Ariège). Mais la grotte du Chat s'étant creusée en régime épinoyé, il n'a pas été observé de « bubble trail » ni de coups de gouge.

Poches de substitution : les parois de la grotte du Chat sont ornées de centaines de cupules pariétales centimétriques à décimétriques ; on les observe le plus souvent au-dessus d'un niveau limite de l'ordre du mètre, et jusqu'à 2 mètres de hauteur : cela correspond au sommet de la zone inférieure élargie, c'est-à-dire au niveau de la nappe hydrothermale.

Dans le cadre du stage régional « Equipier Scientifique », une étude morphométrique (Fig. 9) a permis d'établir qu'elles tendent vers un modèle à l'embouchure faiblement elliptique (petit axe/grand axe =0,82) et de section proche de la demi-sphère (profondeur/rayon =0,88), avec de faibles écarts-type.

77,7 % des cupules ne s'écartent pas de plus de 30 % du cercle parfait, et on doit noter que 27% des 175 items mesurés avaient une profondeur supérieure au rayon de leur embouchure : ceci exclut une formation hydrodynamique type « coup de gouge », et suggère un processus de corrosion en conditions relativement isotropes : une altération de contact progressant dans la masse calcaire à partir d'un germe ponctuel, par diffusion uniforme d'un front d'altération ou de dissolution.

La morphologie de ces cupules semble voisine de celles que l'on observe dans beaucoup de galeries épinoyées (grotte de Pâques, salle de Minuit, Alpes-Maritimes), et, quoique les cupules soient en milieu épinoyé 3 fois plus nombreuses et 3 fois plus petites, la morphométrie y indique un tropisme identique vers la demi-sphère. La différence majeure tient dans le modelé des parois affectées par ces cupules : en milieu épinoyé, les surfaces corrodées sont chaotiques en grand, le modelé n'y est pas identifiable (Fig. 10) ; dans la grotte du Chat en revanche, les cupules affectent des parois dont le modelé est préservé, sans modification du profil de la galerie.

Des cupules identiques, respectant elles aussi les modelés des parois qu'elles perforent, ont été observées en cavités hypogènes dans la grotte des Serpents à Aix-les-Bains, Savoie (Audra, Bigot, Hobléa & Nobécourt 2006), et dans la Kraus Höhle, Autriche (Audra 2006). Ces figures de corrosion ont sans doute été décrites pour la première fois dans le système hypogène de Frassasi (Galdenzi & Maruoka 2003) où elles sont exemplaires car on les observe dans les niveaux hydrothermaux actifs, remplies de gypse en place. Elles sont de ce fait interprétées comme des poches de substitution de carbonates par des sulfates en milieu aérien. Les poches de substitution constituent donc une famille à part entière dans les formes de corrosion sulfuriques.

Popcorns : on observe dans la grotte de nombreuses concrétions en choux-fleurs ou « popcorns », qui se trouvent généralement dans les galeries sur une hauteur de 1 m à 1,20 m. Il est admis que les popcorns se forment en milieu exondé, par précipitation de minéraux dissous dans de l'eau circulant dans l'atmosphère sous forme d'aérosols (Dublyansky et Pashenko 1997). Les aérosols sont des gouttelettes dont la dimension est comprise entre quelques dizaines d'Angströms et quelques dixièmes de millimètre ; ils sont relativement négligés car seuls les éléments d'une taille supérieure à 5 µm sont visibles, mais certaines concrétions (choux-fleurs et coralloïdes) n'ont pas d'autre origine. Les circulations turbulentes d'air et d'eau créent des aérosols, mais il semble que de simples courants d'air tangentant des surfaces d'eau calme peuvent y arracher des « grappes de molécules », des micro-aérosols qui sont de fait minéralisés. La sagesse populaire a bien identifié ce phénomène en milieu littoral, où chacun sait que l'air marin est « salin ».

Dans la grotte du Chat, en regard de certaines fissures, des choux-fleurs se sont formés sous de petits surplombs rocheux de la paroi : la couche de choux-fleurs s'est donc développée sous une volute d'aérosols émis par la fissure.

Dans le même temps, certains objets montrent une limite nette entre roche corrodée et choux-fleurs, une couche de calcite laminée d'une épaisseur centimétrique étant parfois retaillée à l'interface, laquelle se situe toujours à un point d'inflexion de la surface de l'objet (Fig. 4). Ceci suggère une circulation dans l'atmosphère de la grotte de flux mixtes, chargés en même temps d'aérosols minéralisés et de substances corrosives ; dans les



Fig. 9 : protocole d'étude morphométrique des poches de substitution de la grotte du Chat (photo J-C d'Antoni-Nobécourt)



Fig. 10 : aspect de la corrosion cupulaire en milieu karstique épigène dans la galerie de l'Oiseau, grotte de Pâques, 06 - Saint Cézaire sur Siagne (photo J-C d'Antoni-Nobécourt)

sections où les vitesses linéaires sont rapides (milieu fissural, effet Venturi, veines gazeuses chaudes, parois « au vent »), la dynamique est orientée vers la corrosion, laquelle participe probablement à la formation et à la minéralisation des aérosols (« soufflage » des parois humides) ; dans les sections où les flux perdent leur compétence (élargissement des conduits, parois « sous le vent », diffluence en volutes gazeuses), la dynamique s'oriente vers le dépôt des aérosols et l'accrétion de leur minéralisation. Des observations similaires ont été faites dans les grottes de Pigette (Gréoux-les-Bains, Alpes-de-Haute-Provence) et des Champignons (Puylobier, Bouches-du-Rhône).

Le fait que ce type de concrétionnement soit aussi généralisé dans la grotte du Chat implique d'intenses productions et circulations d'aérosols en milieu, exondé, qui s'expliquent bien dans un modèle hydrothermal ou des gradients thermiques importants entretiennent des convections gazeuses. Les interactions des gradients thermiques, des convections et de la corrosion par condensation commencent à être appréhendées (Sarbu & Lascu 1997 ; Dublyansky & Dublyansky 1998) et permettent une approche globale des microformes hypogènes de la grotte du Chat :

- dans les volumes alimentés en fluides hydrothermaux, le gradient thermique entre les fissures émissives et le plafond est élevé, favorise la condensation dans les parties supérieures, et entretient de fortes convections d'air humide assurant un apport constant en H_2S oxydable et en vapeur condensable ; s'en suit l'altération de la voûte et le creusement de coupes sommitales ou de chenaux ventilés, un ruissellement constant de condensats, et le lessivage du gypse au fur et à mesure de sa formation. Dans ces conditions, pas de poches de substitution localisées, pas d'accrétion de popcorns : c'est la salle des Santons.

- dans les conduits secondaires moins alimentés, la ségrégation entre popcorns, poches de substitution et grands modelés de corrosion est essentiellement liée à la dynamique aérologique : le développement de convections ou de circulations provoque d'amples formes de chenaux rabotés par les courants d'air chargés d' H_2S gazeux oxydable ou d'aérosols acides (galerie de Cessole, dédale), tandis que les zones où la veine gazeuse perd de sa compétence (zone médiane de la galerie, « retour » de volute, élargissement du conduit) permettent l'accrétion des aérosols en popcorns ;

- seule l'isotropie (c'est-à-dire l'inertie totale) de l'atmosphère aboutit à des processus localisés où la diffusion de condensats acides par capillarité est prépondérante : ce sont les poches de substitution.

Dans cette ségrégation interviennent donc, entre autres facteurs, la communication aérologique avec l'exokarst ou a contrario le confinement de la cavité, la température du milieu et de l'eau, mais aussi la géométrie des conduits qui peuvent localement ménager dans les voûtes des poches où l'air chaud est stable, non influencé par les circulations aérologiques de la galerie.

Ces figures et fonctionnements spécifiques à la spéléogenèse hypogène et à la corrosion sulfurique sont remarquablement illustrés dans la grotte du Chat, ce qui en fait un cas exemplaire parmi les quelques cavités hypogènes reconnues en France.

Bibliographie :

- MANGINA**. 1964 – Formations gypseuses dans la grotte-gouffre de l'Ermitte, *Société Méridionale de Spéléologie et de Préhistoire, bulletin des sections tome XI*. Société Méridionale de Spéléologie et de Préhistoire.
- RUDNICKI J.** 1978 – Role of convection in shaping subterranean karst forms. *Kras i Speleologia, vol. XI, n° 2*, p. 92-101. Université de Silésie, Katowice.
- COLLIGNON B.** 1988 – Spéléologie, approches scientifiques *Edisud*, p. 49 ; p. 61 ; p 99-102.
- Sounier, Sounier et Oddou 1992 - L'aventure verticale dans les Alpes d'azur - *Edisud*
- DUCLUZAUX B.** 1993 - Les karsts à alimentation diffuse. *Actes des 3èmes Rencontres d'Octobre du Spéléo-Club de Paris à Montpellier*, p. 45-47. Spéléo-club de Paris.
- DUCLUZAUX B.** 1994 - La karstification hypogénique. *Actes des 4èmes Rencontres d'Octobre du Spéléo-Club de Paris*, p. 49. Spéléo-club de Paris.
- DUBLYANSKY V. & PASHENKO S.E.** 1997 - Cave Popcorn – An Aerosol Speleothem ? *Actes du 12ème Congrès International de Spéléologie, Suisse, 1997*
- SARBU S.M. & LASCU CH.** 1997 – Condensation corrosion in Movile cave, Romania *Journal of cave and karst studies* 59 (3), p. 99-102
- DUBLYANSKY V.N. & DUBLYANSKY V.V.** 1998 – The problem of condensation in karst studies *Journal of cave and karst studies* 60 (1), p. 3-17
- HOSE L.D. & PISAROWICZ J.A.** 1999 - Cueva de Villa Luz, Tabasco, Mexico : reconnaissance study of an active sulfur spring cave and ecosysteme. *Journal of cave and karst studies* 61 (1), p. 13-21
- GALDENZI S. & MARUOKA T.** 2003 - Gypsum deposits in the Frassassi caves, central Italy. *Journal of cave and karst studies* 65 (2), p. 111-125
- BARTON H. & LUISZER E.** 2005 - Microbial metabolic structure in a sulfidic cave hot spring : potential mechanisms of biospeleogenesis. *Journal of cave and karst studies* 67 (1), p. 28-38
- AUDRA P., BIGOT J.-Y. & NOBÉCOURT J.-C.** 2006 – Une cavité hypogène liée à des remontées d'acide sulfurique : la grotte du Chat (Daluis, Alpes-Maritimes). *Actes numériques des 5^e Rik-Rak, Nans-sous-Sainte-Anne, 14 & 15 janvier 2006*
- CRÉACHY.** - Inventaire spéléologique des Alpes Maritimes *Editions du B.R.G.M.*
Carte géologique au 1/50000^{ème}, feuille Entrevaux *Editions du B.R.G.M.*

Les articles de « Journal of caves and karst studies » sont consultables sur <http://www.caves.org/pub/journal/index.htm>

Lexique :

Allochtone : qui provient d'un autre endroit (par opposition à autochtone)

Anoxique : où le taux d'oxygène est très réduit (en anglais : anoxic)

Aphotique : zone où ne pénètre aucune radiation solaire (en anglais : aphotic)

Biogénique : qui résulte de l'activité biologique d'organismes vivants

Carboné : qui contient du carbone

Carbonique : relatif au carbone ou à ses dérivés, plus particulièrement au gaz carbonique CO₂ (en anglais : carbonic)

Chimiautotrophe : se dit des bactéries qui produisent des composés organiques sans utiliser l'énergie de la lumière. Elles produisent notamment des oxydes de substances inorganiques comme le soufre, l'azote ou l'ammoniac. (en anglais : chemautotrophe)

Diapir : déformation des couches superficielles par des matériaux sous-jacents relativement plastiques, ou extrusion à travers les couches superficielles de ces matériaux sous-jacents ; généralement, le diapirisme est provoqué par les évaporites (sel, gypse, halite...)

Évaporite : roche formée à la suite de l'évaporation d'eau de mer

Ferriq : oxydes et sels dont le fer est trivalent (FeCl₃, Fe₂O₃ = hématite) (en anglais : ferric)

Ferreux : 1/ qui contient du fer - ou bien 2/ corps composé dont le fer est bivalent (FeCl₂) (en anglais : ferrous)

Ferrugineux : qui contient du fer, généralement oxydé (source, roche...) (en anglais : ferruginous)

Fer : élément fer (Fe) (en anglais : iron)

Hydrothermal : relatif à des eaux souterraines chaudes et riches en fluides minéralisés

Sulfate : sel d'acide sulfurique caractérisé par le radical (SO₄⁻²) (en anglais : sulfate)

Sulfaté : qui contient des sulfates

Sulfite : sel de l'acide sulfureux H₂SO₃

Sulforéductrice : se dit des bactéries capables d'extraire métaboliquement de l'oxygène des sulfates, en les décomposant en sulfures, notamment d'hydrogène (H_2S)

Sulfure : soufre + métal (pyrite, blende, galène...) ou cation complexe (en anglais : sulfide)

Sulfuré : combiné avec du soufre (par exemple hydrogène sulfuré H_2S) (en anglais : sulfidic)

Soufre : élément soufre (S) (en anglais : sulfur, sulphur)

Sulfurique : produit des émanations sulfureuses, acide sulfurique (en anglais : sulfuric)

Sulfureux : contient du soufre libre ou l'ion sulfure (en anglais : sulfurous)