

LA CORROSION PARIÉTALE DES GROTTES PAR LES AÉROSOLS D'ORIGINE ANIMALE

Les concrétions décolorées aux allures fantomatiques de certaines grottes ont parfois été interprétées comme le résultat d'une remontée du niveau de base ayant de nouveau ennoyé une cavité après une longue phase de concrétionnement. Dans bien des cas, il est possible de proposer une alternative au relèvement du niveau de base qui ne doit plus être systématiquement invoqué. En effet, les phénomènes de condensation-corrosion dans des cavités ouvertes sur l'extérieur ont été occupées par des animaux dont les déjections peuvent produire des effets similaires à la corrosion « phréatique » sur les parois comme sur les concrétions.

Avant d'aborder le sujet des aérosols et flux corrosifs aériens, il convient d'énoncer les différents réservoirs d'acidité dont sont issus les éléments chimiques qui corrodent le calcaire.

I. Les différents réservoirs d'acidité et modes de corrosion

Il existe au moins trois réservoirs de corrosion identifiables selon leur origine :

1. Le réservoir des grottes dites supergènes¹ associé au CO₂ d'origine végétale produit par les plantes dans les sols,
2. Le réservoir des grottes dites hypogènes² dont la chimie peut être celle du carbone (CO₂) ou du soufre (H₂S),
3. Le réservoir d'acidité dit biologique correspondant aux débris végétaux ou aux déjections (guano de chauves-souris ou d'oiseaux) ou réjections (guacharos) animales (**fig. 1**).

On peut brièvement rappeler les deux grands modes de corrosion du calcaire définis selon l'état de la matière : liquide ou gazeux. L'état liquide correspond à la corrosion dite « phréatique », la plus couramment admise en spéléogénèse pour les grottes supergènes ; l'état gazeux correspond à la corrosion par les aérosols, observables dans les grottes hypogènes.

Fig. 1 : Guano produit par les colonies de vampires qui peuplent la grotte de Shatuca (Pérou). Du fait de leur régime alimentaire (hématophage), les vampires rejettent plus de liquide qui s'accumule dans des cuvettes au sommet des tas de guano.



Ainsi, les modes de corrosion se répartissent en deux catégories conformément à deux des états de la matière : liquide et gazeux :

1. Mode de corrosion liquide

Différentes formes de corrosion (cupules, coups de gouge) des grottes supergènes sont visibles sur les parois des grottes et permettent généralement d'identifier un sens de courant. Ces formes sont caractéristiques des milieux dits « phréatiques » ou encore noyés ou épinoyés. Le CO₂ dissout dans l'eau est alors le principal agent de corrosion.

¹ Ce dit des grottes creusées par l'action des eaux météoriques dont résultent la plupart des grottes.

² Ce dit des grottes creusées par des eaux d'origine profonde (ex. : les eaux minéralisées ou thermales).

2. Mode de corrosion gazeux

Les formes de corrosion observées dans bon nombre de grottes hypogènes sont le résultat de la condensation-corrosion favorisée par des aérosols et flux corrosifs dont la composition chimique (CO_2 ou H_2S) est proche de l'eau d'origine profonde dont ils sont issus.

Le mode de corrosion liquide, de loin le plus commun, ne sera pas développé, cependant il n'est pas inutile de consacrer quelques lignes au mode de corrosion gazeux qui se manifeste par des phénomènes pariétaux dits de condensation-corrosion.

II. La condensation-corrosion

Après avoir rappeler le principe à l'origine du phénomène de condensation-corrosion, on constatera que celui-ci ne se limite pas aux grottes hypogènes, mais est bien un phénomène universel et commun à toutes les grottes du calcaire.

1. Rappel du principe

La condensation correspond au phénomène physique de changement d'état de la matière qui passe d'un état gazeux à un état condensé (solide ou liquide). Dans les grottes, la condensation de la vapeur d'eau sur les parois plus froides est le siège d'une corrosion lorsque cette vapeur se mélange à du gaz carbonique. L'acide carbonique ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$) ainsi produit corrode les parois calcaires. La permanence des différences de température entretient la condensation, entre l'intérieur de la cavité, généralement plus chaud (gradient géothermique), d'une part, et un environnement extérieur plus froid, d'autre part. Dans ces conditions, le phénomène de condensation-corrosion est durable et se renouvelle indéfiniment pour produire des effets visibles sur la roche calcaire.

Dans les grottes hypogènes, la condensation-corrosion sur le calcaire est particulièrement efficace. Notamment lorsque les parties basses de ces cavités sont occupées par des eaux chargées en CO_2 ou en H_2S qui libèrent des aérosols acides dans l'atmosphère. Ces aérosols se condensent un peu plus haut sur les parois plus froides de la grotte. L'eau condensée a la même composition chimique que la nappe d'eau sous-jacente généralement chargée en CO_2 ou en H_2S , les aérosols parviennent ainsi à corroder efficacement les parois. Le renouvellement du phénomène est assuré par la différence thermique entre les eaux d'origine profonde, généralement plus chaudes qui occupent le fond de la cavité, et la surface du karst plus sujette aux aléas climatiques.

La condensation-corrosion sur les parois des cavernes est admise chez la plupart des karstologues spécialisés dans l'étude des grottes hypogènes où l'on sait que le principal moteur est l'inertie thermique. Le but du présent article est d'étendre les effets de la condensation-corrosion à tous types de grottes et montrer qu'elle n'est pas spécifique des grottes hypogènes mais bien un phénomène universel et commun en spéléogénèse.

2. Un phénomène universel et commun

Historiquement, les phénomènes de condensation-corrosion les plus spectaculaires ont été reconnus dans les grottes hypogènes (Dublyansky, 2000 ; Audra et al., 2002 ; Dreybrodt, 2003) qui se développent grâce à la chimie du soufre ou du carbone. Mais elle a été reconnue également dans les grottes épigènes (Slabe, 1995) où des phénomènes moins spectaculaires ont parfois été identifiés (Bigot, 2010). Les cas de condensation-corrosion admis dans les grottes épigènes ont pour principal agent le CO_2 d'origine végétale, dont le réservoir correspond aux sols et à la végétation.

Cependant, il existe une autre origine au CO_2 qui peut affecter les parois des grottes : l'origine biologique. En effet, la fréquentation assidue sur de longues périodes de certains animaux, appréciant le milieu souterrain, peut générer des formes de corrosion significatives. L'importance du phénomène est facilement décelable sur les concrétions ; en revanche, l'incidence sur les parois calcaires est moins quantifiable en raison de l'absence de cernes de croissance. C'est pourquoi, il est utile de reconnaître les phénomènes liés à la condensation-corrosion, afin de ne pas les confondre avec une corrosion classique de type phréatique.

Le moteur de la condensation-corrosion est l'inertie thermique entretenue entre l'extérieur et les différentes sources de chaleur qui peuvent être, selon les cas, des masses d'eau, des masses d'air ou des foyers plus ponctuels dits biologiques.

III. Inertie des différentes masses thermiques

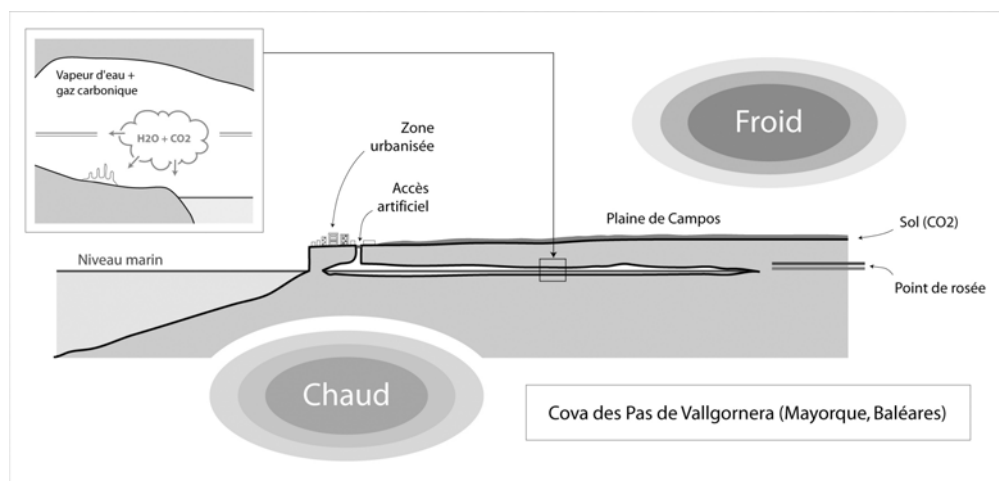
On a vu que les formes de corrosion dites phréatiques se développent en milieu noyé ou épinoyé (mode de corrosion liquide), alors que les formes de condensation-corrosion se développent en milieu aérien (mode de corrosion gazeux). Toutefois, les phénomènes de condensation-corrosion ne sont pas exclusifs des grottes hypogènes.

En effet, on observe ce type de corrosion dans des cavités supergènes, notamment lorsqu'il existe une inertie thermique suffisante capable de générer des flux gazeux qui condensent sur les parois de la cavité.

Trois exemples d'inertie thermique sont proposés, dont l'origine est due aux masses d'eau et d'air ou encore à de petits foyers d'origine biologique.

1. Les masses d'eau

L'inertie des masses d'eau peut être illustrée par une grotte des îles Baléares qui se développe au niveau de la mer. La Cova des Pas de Vallgornera (Île de Majorque, Baléares, Espagne) est une cavité aveugle découverte fortuitement lors de travaux d'aménagement.



Il s'agit d'une cavité d'origine hypogène au plan très labyrinthique dont le développement atteint 70 km pour une dénivelée de seulement 21 m (fig. 2).

Fig. 2 : Coupe schématique de la Cova des Pas de Vallgornera, Majorque, Espagne.

Les eaux saumâtres qui s'étendent sous le plateau de Campos sont relativement chaudes et créent une inertie thermique dont l'interface avec la surface du plateau plus froide correspond grosso modo à un plan horizontal situé au-dessus de la surface de l'eau. Les phénomènes de condensation-corrosion sont bien visibles sur les concrétions, mais aussi sur les surfaces pariétales (fig. 3).

Fig. 3 : Condensation-corrosion dans la Cova des Pas de Vallgornera, Lluçmajor, Majorque, Îles Baléares. Derrière la stalagmite très corrodée, les blocs effondrés du plafond présentent des arêtes arrondies, résultant du même phénomène.



2. Les masses d'air

L'inertie des masses d'air est illustrée par un aven des garrigues gardoises qui a la particularité de piéger le CO₂ produit par la végétation. Cet aven est partiellement exposé aux variations thermiques extérieures.

L'aven de la Clastre (Sanilhac-Sagriès, Gard) s'ouvre sur les bords du Gardon ; son puits d'entrée est en fait une ancienne cheminée recoupée par la surface (fig. 4). Il a servi d'aven-piège au cours du Quaternaire. Son fond obstrué présente souvent un « lac » de CO₂ où la concentration en gaz carbonique est forte. Le puits d'entrée profond d'une vingtaine de mètres constitue une zone d'échanges thermiques par lequel le froid extérieur parvient à pénétrer. Un massif stalagmitique situé juste à l'entrée d'une galerie présente des concrétions corrodées sur un seul côté : celui de la base du puits (fig. 5).

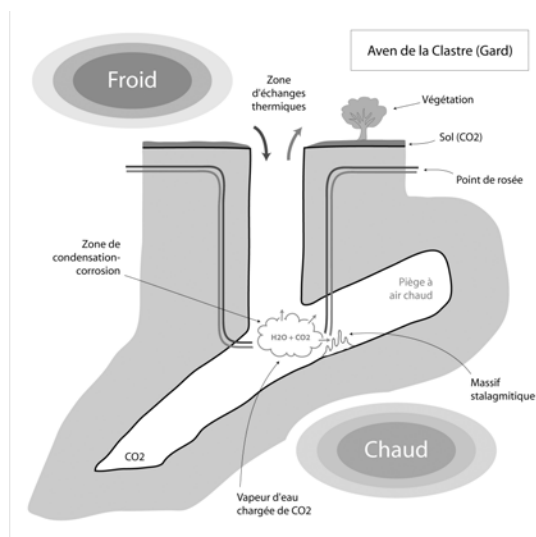


Fig. 4 : Coupe schématique de l'aven de la Clastre (Gard).



Fig. 5 : Massif stalagmitique corrodé de l'aven de la Clastre (Sanilhac-Sagriès, Gard). Une seule face des stalagmites est corrodée et correspond à la base du puits d'où est prise la photo.

La géométrie de la cavité et les faces corrodées des stalagmites montrent que les variations thermiques, entre le milieu relativement chaud de la grotte et la surface du plateau plus froide, contribuent à créer un point de rosée où la condensation-corrosion est particulièrement efficace.

Le reste de la cavité présente également des phénomènes de corrosion superficielle plus diffus et répartis sur tous les types de parois (roche encaissante, concrétions, remplissages).

3. Les foyers biologiques

L'inertie des « masses biologiques » est illustrée par des grottes à chauves-souris. La fermentation de leurs déjections dégage de la chaleur et crée ainsi une différence thermique suffisante capable de corroder les parois et concrétions situées à proximité des accumulations de guano. On ne détaillera que les phénomènes de condensation-corrosion dus aux concentrations de déchets animaux, en laissant volontairement de côté les phénomènes liés à la chaleur produite par les animaux (ours³, chauves-souris⁴) ou encore aux accumulations végétales apportées par les crues.

Les déchets d'origine animale sont le siège de phénomènes biochimiques complexes qu'on appelle fermentation. Ces fermentations sont engendrées par des bactéries anaérobies capables de décomposer les matières organiques en acides organiques pour donner notamment du méthane et du gaz carbonique.

Fig. 6 : Accumulation de guano fossile dans la grotte de la Grosse Marguerite (Gard).



En effet, dans certaines accumulations de déchets (fumier) la température peut monter jusqu'à 60°C. Des tas de guano de chauves-souris (**fig. 6**) peuvent constituer des foyers ou sources de chaleur et créer ainsi des zones de condensation-corrosion qui affecteront indifféremment la roche calcaire et les concrétions.

3 Les ours n'hibernent pas mais restent dans un état de léthargie pendant plus de six mois pour l'Ours noir d'Amérique. Ils parviennent ainsi à abaisser la température de leur corps de 30 à 36°C au lieu de 38°C. Compte tenu de leur masse corporelle, la présence d'ours dans une caverne de modestes dimensions pourrait avoir un impact en termes de condensation-corrosion et de CO₂.

4 Il a été émis l'hypothèse que les cloches, situées au plafond des grottes de l'île de Madagascar, soient le résultat de l'activité des colonies de chauves-souris qui s'y concentrent en grand nombre (Delaty, Dobrilla & Woloan, 2006).

Contrairement à la corrosion dite phréatique qui laisse parfois en relief des parties saillantes plus résistantes à la dissolution comme les filons ou planchers de calcite, la condensation-corrosion s'exerce uniformément sur toutes les surfaces et ne présente guère de phénomènes de corrosion différentielle.

Les concrétions de la grotte de la Grosse Marguerite présentent des cupules de corrosion particulièrement développées qui sont dues à la présence de colonies de chauves-souris ayant fréquenté assidûment la cavité.

IV. L'exemple de la grotte de la Grosse Marguerite (Gard)

La grotte de la Grosse Marguerite (Aiguèze, Gard) est une cavité des gorges de l'Ardèche qui présente des restes de guano a priori fossiles. La cavité ne possède qu'une seule entrée et sa géométrie (**fig. 7**) permet de la classer dans les pièges à air chaud : une configuration favorable au séjour des chiroptères.

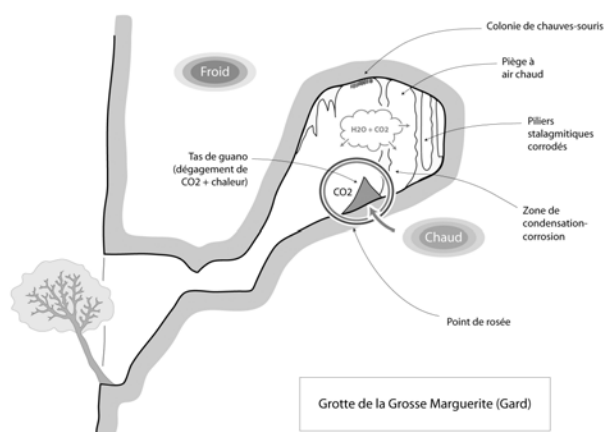


Fig. 7 : Coupe schématique de la grotte de la Grosse Marguerite (Aiguèze, Gard).

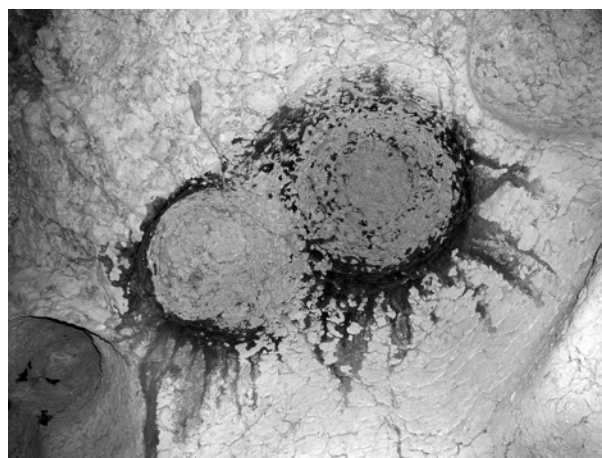
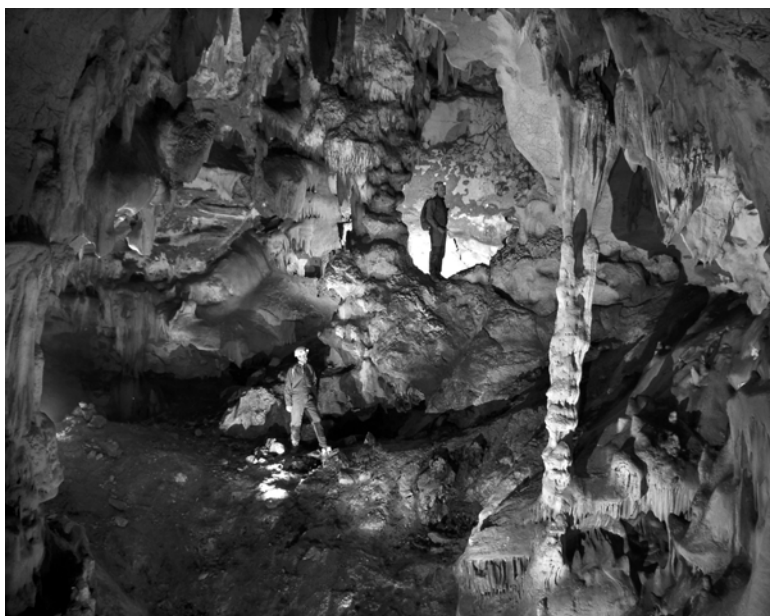


Fig. 8 : Coupes de plafond cernées de traces d'urine de chauves-souris, grotte de la Grosse Marguerite, Gard.

En effet, de nombreuses coupes, dont les contours sont soulignés par des traces d'urines caractéristiques (**fig. 8**), montrent que les colonies de chauves-souris ont fréquenté un temps la cavité. Les colonnes stalagmitiques ont des allures étranges, voire fantomatiques (**fig. 9**), car elles ont été fortement remodelées par la condensation-corrosion qui a réduit leur volume.

Fig. 9 : Les colonnes et piliers stalagmitiques de la grotte de la Grosse Marguerite (Gard) présentent une frêle morphologie qui atteste l'importance de la condensation-corrosion par des cocktails gazeux issus de la fermentation du guano.



Des cupules de corrosion sont visibles au pied de la colonne à proximité immédiate du guano. C'est en effet à cet endroit que les dégagements de chaleur, de CO₂ et divers composés à base de phosphore sont les plus importants. La source de chaleur fournie par le guano qui fermente a favorisé les phénomènes de condensation-corrosion particulièrement visible à la base de la concrétion (**fig. 10**).

Les formes de corrosion d'un pilier stalagmitique soumis à la condensation-corrosion varient de bas en haut. En bas, on trouvera les formes de corrosion les plus caractéristiques constituées par des cupules concaves relativement profondes, alors qu'en haut la diffusion du CO_2 et de la chaleur donnera des formes moins creuses et plus uniformes sur les surfaces exposées (**fig. 11**).

Fig. 10 : Cupules de condensation-corrosion dans un pilier de la grotte de la Grosse Marguerite (Gard). Au plafond, on aperçoit les traces d'urine laissées par les colonies de chauves-souris. Les cupules se situent à la base du pilier stalagmitique à proximité immédiate de l'accumulation de guano.

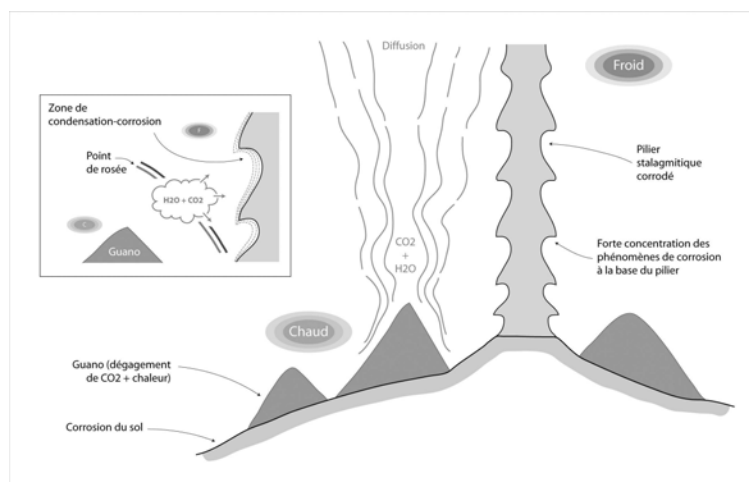


Fig. 11 : Coupe schématique d'un pilier stalagmitique soumis à des phénomènes de condensation-corrosion générés par le guano de chauves-souris.

Les phénomènes observés en France ne sont pas très spectaculaires, il existe aux Etats-Unis des sites plus démonstratifs.

V. L'exemple de Slaughter Canyon Cave (Etats-Unis)

D'autres phénomènes de condensation-corrosion imputables au guano de chauves-souris ont été observés sur des concrétions, notamment au Nouveau Mexique (Etats-Unis) dans Slaughter Canyon Cave.

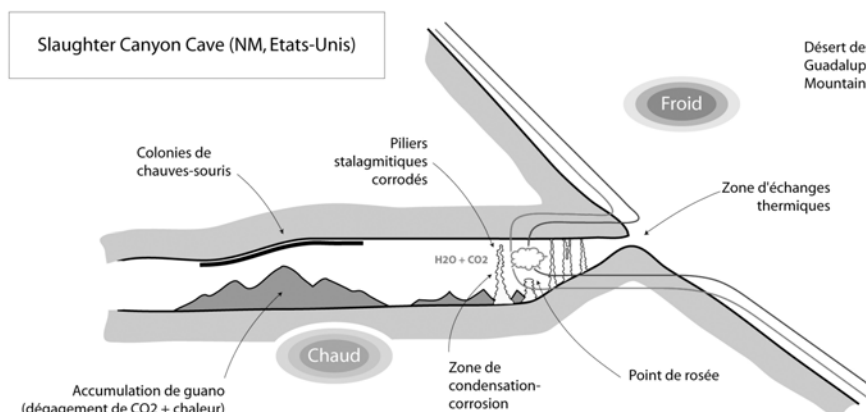
Les cupules profondes que présentent des stalagmites (**fig. 12**) ont été admises comme le résultat de la condensation-corrosion, mais seulement attribuées à la différence thermique existant entre l'intérieur de la grotte relativement chaud et le climat froid et sec du désert des Guadalupe Mountains. Or, les formes de corrosion de certaines concrétions présentent des points communs avec celle de la grotte de la Grosse Marguerite (Gard).

Fig. 12 : Stalagmite corrodée de Slaughter Canyon Cave (Nouveau Mexique, Etats-Unis). Certaines colonnes et planchers qui recouvrent le sol sont plus récents que la stalagmite.



En effet, dans la grotte de Slaughter Canyon (fig. 13) il existe d'importantes quantités de guano qui ont été exploitées au XIX^e siècle.

Fig. 13 : Coupe schématique de Slaughter Canyon Cave (Nouveau Mexique, Etats-Unis).



L'importance des masses de guano, laissées il y a au moins 200 000 ans par une espèce de chauves-souris aujourd'hui disparue (*Tadarida constantinei* Lawrence 1960), a généré de la vapeur d'eau et du CO₂ pendant de longues périodes qui ont contribué à renforcer et maintenir les phénomènes de condensation-corrosion.

Bien que les remplissages de guano fossiles soient scellés par un plancher stalagmitique daté (U-Th) à 209 ± 9 ka (Lundberg & McFarlane, 2006), des recherches de Victor Polyak & Paula Provencio sur les dépôts de guano de Slaughter Canyon Cave indiquent qu'ils pourraient être très anciens, de l'ordre de 0,5 à 1 Ma. Ce qui n'est pas très étonnant puisque l'âge de la grotte a été daté par les mêmes chercheurs à 7 Ma (Pate, 1999).

L'intensité de la corrosion sur des piliers stalagmitiques pourrait s'expliquer par la présence de chauves-souris qui ont laissé d'importantes quantités de guano qu'il est difficile d'apercevoir ailleurs que dans les coupes des phosphatiers (fig. 14).

Fig. 14 : Coupe de remplissages des phosphatiers montrant les épaisses couches de guano (4 à 5 m) recouvertes par des sédiments coiffés d'un plancher stalagmitique daté à plus de 200 000 ans, Slaughter Canyon Cave, Nouveau Mexique, Etats-Unis.



Lorsque la cavité est suffisamment vaste, les phénomènes de condensation-corrosion peuvent avoir une origine mixte due à l'inertie thermique des masses d'air et des masses biologiques qui contribuent toutes deux à augmenter la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur de la cavité.

En France, des sites semblables présentant des concrétions très corrodées ont été reconnus dans la grotte d'Isturitz (Pyrénées-Atlantiques), dans la grotte de Saint Marcel (Ardèche) ou encore dans l'abîme de Maramoye (Var).

VI. Conclusion

Certaines concrétions ou parois corrodées ont parfois été interprétées comme le résultat d'une remise en eau d'une cavité, à la suite d'un relèvement du niveau de base, ou encore d'une altération due à la fantômisation. Avant de proposer de telles hypothèses spéléogéniques, il convient de s'assurer que la cavité n'a pas été le siège de colonies d'animaux qui ont pu produire des déchets dont la fermentation et l'acidité ont été capables d'altérer les concrétions et les surfaces pariétales.

Des formes de corrosion-condensation ont pu être observées sur des piliers stalagmitiques parce qu'ils laissent apparaître les lignes de croissance concentriques de la calcite. Certes, les effets sur la roche encaissante sont beaucoup moins évidents à évaluer en l'absence de cernes de croissance, mais néanmoins réels. Une des prochaines phases de travaux s'attachera à quantifier les volumes corrodés de l'encaissant calcaire afin de déterminer le volume initial de la cavité avant l'arrivée des colonies de chauves-souris.

VII. Remerciements

Le rôle du guano de chauves-souris dans la condensation-corrosion pariétale résulte en partie des observations et discussions dans la grotte de la Grosse Marguerite (Gard) le 23 septembre 2012 avec Laurent Bruxelles et dans la grotte d'Isturitz (Pyrénées-Atlantiques) le 29 mai 2013, notamment avec Laurent Bruxelles, Hubert Camus et Nathalie Vanara.

VIII. Bibliographie

AUDRA Philippe, BIGOT Jean-Yves & MOCOCHAIN Ludovic (2002) - Hypogenic caves in Provence (France). Specific features and sediments. *Acta Carsologica*, 31/3, Slovenska akademija Znanosti in Umetnosti, pp. 33-50.

BIGOT Jean-Yves (2010) - Corrosion par les aérosols : le « panache » de l'aven de Noël. *Actes de la dix-neuvième Rencontre d'Octobre*, Saint-Laurent-en-Royans, 10 - 11 octobre 2009, S. C. Paris édit., n° 19, pp. 27-28.

BIGOT Jean-Yves (2012) - Compte rendu de la sortie du 24 février 2012 dans les grottes de la colline de Gaztelu (communes d'Isturitz et de Saint-Martin-d'Arberoue). 15 p. (inédit).

BIGOT Jean-Yves (2013) - Compte rendu de la sortie du 12 décembre 2013 dans les grottes des gorges du Gardon (Sanilhac, Sainte-Anastasie, Gard). 8 p. (inédit).

BIGOT Jean-Yves & GUYOT Jean Loup (2014) - Chauves-souris et condensation-corrosion dans les grottes du Pérou. *Actes de la vingt-troisième Rencontre d'Octobre*, Le Châtelard, 12 - 13 octobre 2013, S. C. Paris édit., n° 23, pp. 22-27.

DELATY Jean-Nicolas, DOBRILLA Jean-Claude & WOLOZAN David (2006) - Observations concernant les Tsingy de Madagascar et plus particulièrement ceux de la Bemaraha. *Spelunca, revue de la Fédération française de spéléologie*, n° 103, sept. 2006, pp. 39-44.

DREYBRODT Wolfgang (2003) - On feasibility of condensation processes in caves (comment to the paper Specific features and sediments). *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers* 1 (2), (<http://www.speleogenesis.info/archive/sg2/Dreybrodt/index.htm>)

DUBLYANSKY Yuri V. (2000) - Hydrothermal speleogenesis in the Hungarian karst. In *Speleogenesis. Evolution of karst aquifers*, Klimchouk A., Ford, D. C., Palmer, A. N., and Dreybrodt, W. (Ed.), National Speleological Society, Huntsville, pp. 298-303.

LAWRENCE Barbara (1960) - Fossil Tadarida from New Mexico. *Journal of Mammalogy, American Society of Mammalogists edit.*, Vol. 41, n° 3 (Aug., 1960), pp. 320-322.

LUNDBERG J. & McFARLANE A. (2006) - A minimum age for canyon incision and for the extinct molossid bat, *Tadarida constantinei*, from Carlsbad Caverns National Park, New Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies* 68(3), pp. 115-117.

PATE Dale L. (1999) - Slaughter Canyon Cave News. *Canyons & caves, A Newsletter from the Resource Management Offices Carlsbad Caverns National Park*, Issue n° 12 (Spring 1999), p. 1.

SLABE Tadej (1995) - Cave rocky relief and its speleogenetical significance. *Zbirka ZRC*, 10. Ljubljana: Znanstvenoraziskovalni center SAZU, 128 p.