



HAL
open science

La biocorrosion : un nouveau regard sur le karst

Lionel Barriquand, Laurent Bruxelles, Philippe Audra, Jean-Yves Bigot,
Didier Cailhol, Vasile Heresanu, Stéphane Jaillet, Nathalie Vanara

► **To cite this version:**

Lionel Barriquand, Laurent Bruxelles, Philippe Audra, Jean-Yves Bigot, Didier Cailhol, et al.. La biocorrosion : un nouveau regard sur le karst. Spéléo magazine, 2022, 116 (24-30). hal-03917453

HAL Id: hal-03917453

<https://hal.science/hal-03917453v1>

Submitted on 1 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Lionel Barriquand(1),
Philippe Audra(2),
Jean-Yves Bigot(3),
Laurent Bruxelles(4),
Didier Caillhol(4),
Vasile Heresanu(5),
Stéphane Jaillét(1)
et Nathalie Vanara(4)

(1)Edytem, Université
Savoie-Mont-Blanc ;
(2)Polytech Nice-Sophia,
Université de Nice ;
(3)Association Française
de Karstologie ;
(4)Traces Université de
Toulouse ;
(5)CIAM Université Aix-
Marseille

Chauves-souris, guanos et grottes, la biocorrosion ou la corrosion biogénique, un nouveau paramètre à prendre en compte dans l'évolution des cavités, des archives environnementales inédites, de nouveaux regards sur le karst

▽ Grotte de la Marie-Jeanne à Haïti, le plafond est constellé de coupoles biogéniques « creusées » par les chauves-souris.
Photo Serge Caillault

Un nouveau regard sur le karst...

1. Les chauves-souris sont des hôtes emblématiques des grottes. Elles occupent celles-ci bien avant les premières incursions de l'Homme dans ce milieu. Ainsi ces mammifères sont apparus à l'Eocène, il y a plus de 50 millions d'années, en Europe et aux Etats-Unis. En Rhône-Alpes par exemple leur présence est attestée il y a plusieurs millions d'années. Ainsi des fossiles de *Palaephylophora sp.*, *Myotis boyeri* (murin), *Rhinolophus lissiensis* et *delphinensis* (rhinolophes), *Megaderma vireti*, datant de 25 à 5 Ma, ont été découverts à Lissieu et Saint-Cyr-au-Mont-d'Or dans le Rhône. Des fossiles du genre *Plecotus* (oreillard), datant de 12 Ma, ont également été découverts près de Bourgoin-Jallieu dans l'Isère.

△ Fig. 1 : « nuage » de chauves-souris sortant de Dee Cave (Gunung Mulu National Park, Malaisie).
Photo Philippe Crochet.
▷ Fig. 2 : Tham Khoun Dom au carrefour des Chauves-souris, Laos, des milliers de chauves-souris recouvrent les plafonds de la grotte.
Photo Serge Caillault



2. Quelques éléments d'éthologie (comportement des êtres vivants)

Une même chauve-souris occupe plusieurs grottes en fonction de ses besoins. Ainsi des grottes sont réservées à l'hibernation, à la reproduction (*swarming*), à la mise-bas (parturition) ou simplement comme lieux de transit. En fonction de l'éthologie de chaque espèce ces mammifères se regrouperont en colonies plus ou moins importantes lors de ses différents moments ou resteront isolés. Ainsi sur 36 espèces européennes, 18 forment des essaims à une période de leur cycle annuel.

Dans les pays équatoriaux les populations sont bien souvent gigantesques et peuvent atteindre plusieurs millions d'individus dans une même cavité (fig. 1). Dans quelques pays européens des colonies importantes subsistent. Pour la parturition des colonies de plus de 10 000 murins sont connues en Bulgarie et en Albanie. Ce nombre atteint



fréquemment les 8 000 individus dans les grottes méditerranéennes. Pour les minioptères des colonies de 20 000 individus sont connues au Portugal et elles sont comprises entre 35 000 et 60 000 individus en Croatie et en Bulgarie. Dans ces conditions la densité de l'essaim peut atteindre 600 à 800 individus/m² en fonction de l'espèce. Au Kenya il a été montré que le taux de recouvrement du plafond d'une grotte, par les chauves-souris, était de 82 %! (fig. 2).

Tout le monde déplore la diminution du nombre de ces animaux dans les grottes françaises en prenant, bien souvent, comme référence les colonies connues au milieu du XX^e siècle. Elles pouvaient alors atteindre quelques milliers d'individus. Mais il n'y a aucune raison pour qu'il n'y ait pas eu des colonies de plusieurs dizaines de milliers de chauves-souris dans des grottes françaises dans le passé. Il faut certainement faire remonter le début du déclin de ces mammifères à une période beaucoup plus ancienne. Peut-être faut-il le faire démarrer au Néolithique qui marque la sédentarisation de l'Homme et les premiers grands défrichements impactant largement le milieu, ou lors d'une des grandes périodes

historiques d'extension agricoles. Les changements climatiques et les pénétrations humides qui interviennent après l'Holocène et qui marquent la fin du Néolithique ont vraisemblablement aussi des impacts marqués sur les populations de chiroptères.

3. Des rejets

Il est facile d'imaginer que la présence de grandes colonies de chiroptères dans une



grotte va avoir un impact sur le milieu. Nous aborderons ceux-ci à travers des exemples pris dans différentes grottes françaises et marocaines (fig. 3).

Tout d'abord la température corporelle d'une chauve-souris (hors hibernation) est comprise entre 37,0 et 41,1 °C. Les essaims se forment dans les points hauts des cavités qui sont les zones les plus favorables à une conservation de la chaleur. Ainsi les travaux menés par D. Cailhol et N. Vanara dans la grotte d'Espalungue (Pyrénées-Atlantiques) montrent une augmentation d'environ 4 °C de la température à proximité d'une colonie de 700 à 1 000 minioptères de Schreiber en période de parturition. En respirant les chauves-souris vont également rejeter de l'eau. Le cumul de ces deux phénomènes va être favorable à des phénomènes de condensation sur les parois se trouvant à proximité de l'essaim. Les chauves-souris relarguent également du dioxyde de carbone (CO₂) lors de leur respiration mais également par leur patagium, la membrane de l'aile (fig. 4). Les quantités rejetées vont en partie acidifier le film d'eau de condensation qui s'est formé sur la paroi. Celui-ci devient alors agressif pour le calcaire et entraîne la dissolution du carbonate de calcium (le ciment du calcaire). Celui-ci est alors altéré.

Pour s'accrocher les chauves-souris utilisent leurs griffes (celles-ci viennent se positionner dans les aspérités de la roche. Si cette dernière est trop altérée elle n'offrira plus la résistance mécanique nécessaire à l'accrochage et l'altérité tombera. Petit à petit il y aura alors un véritable recul de la paroi.

La chauve-souris a également des besoins naturels... elle fait aussi pipi-caca !

D'après les données bibliographiques la plus grande colonie de murins de Daubenton connue en Europe (20 000 individus) rejeterait environ 5,1 kg d'urine par jour. Celle-ci contient de l'urée qui très vite va se transformer en ammoniac engendrant une forte odeur dans la cavité (attention en milieu tropical les concentrations en

ammoniac dans l'air sont telles qu'elles peuvent entraîner des effets irréversibles chez l'homme). Quant aux sulfates, également générés par l'urine, ils resteront présents dans la grotte.

Si nous regardons maintenant ce qui se passe au niveau des fèces... et bien notre même colonie de murins de Daubenton, présente pendant 4 mois/an dans une grotte pendant 100 ans, peut générer 29,8 tonnes de guano soit 5,4 tonnes de phosphates ! Imaginez-vous le résultat si la colonie est présente pendant quelques milliers d'années...

Frais le guano est basique (pH = 7,77 mesuré dans la grotte de Blanot). Après quelque mois il devient légèrement acide (6,25 < pH < 6,74 pour des guanos de moins d'un an). Après quelques années il reste majoritairement que les phosphates et le guano devient alors très acide. Nous avons mesuré des pH de 2,72 dans la grotte des Cayres (Ardèche), de 3,20 dans la grotte des Huguenots Ardèche... L'eau qui le traversera deviendra alors très acide et agressive pour l'environnement. Les projections formeront également des aérosols très agressifs pour les parois.

Après lavage par l'eau cette acidité finira par disparaître. Le pH deviendra proche de la neutralité (pH de l'ordre de 7,0) et le guano ne formera alors plus qu'une sorte « d'argile » noire.

4. Une minéralogie spécifique

Les déjections apportent donc essentiellement des sulfates, des nitrates et des phosphates dans le milieu souterrain. En contact avec de l'eau, ils passent sous forme ionique. En solution ces ions réagiront alors les autres espèces minérales présentes dans le milieu.

Dans des conditions climatologiques favorables (milieu sec), les sulfates (SO₄²⁻) formeront du gypse (CaSO₄ · 2 (H₂O), fig. 5) avec le calcium (Ca²⁺) provenant des particules de calcaires qui se détachent des voûtes et des parois.

Les phosphates (PO₄³⁻) vont également réagir avec le calcium pour former de l'hydroxylapatite (Ca₅ (HPO₄)₃OH, fig. 6) ou de la brushite (CaHPO₄ · 2H₂O). En fonction des autres ions présents dans le milieu et des conditions aérologiques, tout un cortège de minéraux phosphatés pourra se former (fig. 7). Ainsi plus d'une centaine d'entre-eux sont décrits par Hill et Forti (1997). En France, leur nombre est beaucoup plus faible, aujourd'hui nous en avons identifié un peu moins d'une dizaine dont les principaux sont : *hydroxylapatite*, *taranakite*, *leucosphosphate* et *crandallite*.

Dans certaines cavités, comme la grotte du Chameau¹ au Maroc, quand les phosphates n'ont pas été exploités, les accumulations de minéraux peuvent être importantes et atteignent plusieurs dizaines de mètres cubes. Parmi eux peuvent se trouver des minéraux rares qui ne sont connus qu'à quelques occurrences en grottes, tels que sphéniscidite et minyulite.

Beaucoup plus rarement les phosphates vont également réagir avec des objets présents dans le milieu souterrain. Ainsi

dans la grotte d'Azé ils ont réagi avec des éléments constituant le bronze d'une lampe du I^{er} siècle av. J.-C (fig. 8). Les minéraux formés (libéthénite (Cu₂ (PO₄) (OH)) et pyromorphite (Pb₅ (PO₄)₃Cl) ont « étanchéifiés » les parois de cet objet et ont permis ainsi la conservation des mèches en tissu gaulois qu'elle contenait ainsi que des graisses utilisées comme combustibles il y a plus de 2 000 ans.

5. De nombreuses formes caractéristiques associées dans les grottes

Comme Lundberg et MacFarlane (2009, 2012 et 2015) l'ont montré dans plusieurs grottes au Kenya, en Jamaïque (double page avant cet article) ou bien encore à Bornéo la présence de ces grandes colonies va avoir un impact direct sur les parois du karst et donner naissance à des formes caractéristiques.

Les plus connues sont les coupoles (fig. 9). Elles résultent de la conjugaison de l'augmentation de température, de la formation d'un film d'eau acidifié par les rejets de CO₂ et des accrochages successifs des chiroptères.

Pour certaines elles sont très caractéristiques. Elles résultent de l'action d'un animal



△△ Fig. 3 : position géographique des différentes grottes ayant servies pour cette étude. 1 : grottes d'Azé, de Blanot et des Furtins ; 2 : grotte de Thais ; 3 : Aven d'Ornac, grottes de Saint-Marcel, des Cayres, des Huguenots, de Biberambou et de Chirolong ; 4 : grotte de Nabrigas ; 5 : grotte de la Roquette ; 6 : grotte d'Espalungue ; 7 : Grottes du Chameau, de Ghar Jakhouk et Kef Darban.

◁◁ Colonie de Chauves-souris au plafond de la grotte de Gourmier, massif du Vercors.

Photo Serge Caillault

◁ Fig. 4 : le patagium offre une grande surface pour le rejet de CO₂ par la chauve-souris.

Photo D. Vergnaud

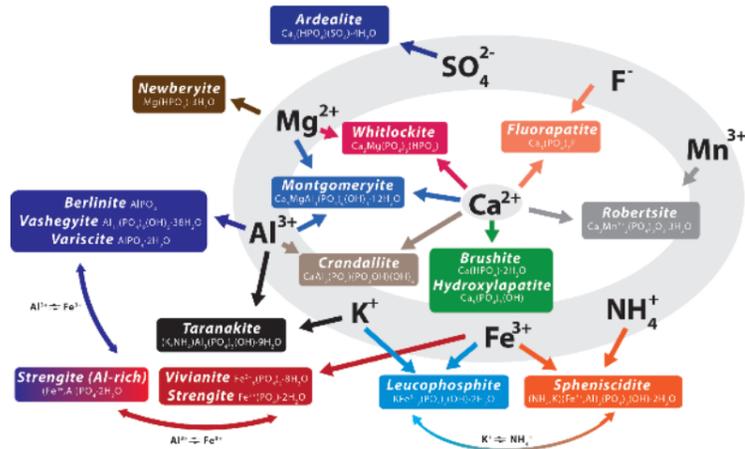
1 : Voir Spéléo magazine n°113 avec sa TGT.

◁ Fig. 5 : grotte du Chameau, Maroc, gypse à la surface d'une accumulation de guano.

Photo Lionel Barriquand

◁ Fig. 6 : croûtes marron-noir d'hydroxylapatite (phosphate de calcium) dans la grotte de Biberambou (07).
Photo Lionel Barriquand

▷ Fig. 7 : exemples de minéraux phosphatés qui peuvent se former en grottes à partir du guano de chauves-souris en fonction des éléments chimiques présents dans le milieu.
Schéma Audra et al., 2019



répété de nombreuses fois et donne ainsi naissance à un plafond perforé de cloches ou tubes verticaux (double page avant cet article).

Il est facile de reconnaître les coupoles utilisées par les chauves-souris, car leur base est bien souvent marquée par la présence de croûtes marron d'hydroxylapatite (fig. 9 bis).

Les impacts sur les parois sont variés et dépendent de leur exposition. Les parois inclinées sur lesquelles le guano va stagner se présentent sous une forme déclinée. Celles contre lequel le tas de guano s'appuie présentent des cupules (fig. 9).

Dans certains cas les parois présentent même des zones d'écoulement qui se sont formées sous le guano pour aboutir à un véritables crypto-lapiaz (fig. 10).

À l'inverse, les parois sur lesquelles le guano ne peut pas se déposer et sur lesquelles seuls les aérosols ont une action sont très lisses. Elles ne présentent généralement que des reliefs très doux engendrés par une corrosion différentielle liée à la présence d'ancienne coulée de calcite qui ont protégé temporairement la paroi (fig. 11).

De grandes flutes, ayant la forme d'un demi-tube, se développent à la base des parois, là où il y a accumulation de guano (fig. 12).

Mais également la formation de conques qui sont liées aux aérosols (fig. 13).

Les sols sont marqués par la présence de crypto-lapiaz et de chenaux d'évacuation des jus acides issus du guano (fig. 14).

Mais l'une des formes les plus caractéristiques est la présence de tines à guano (fig. 15). Elles sont creusées à l'aplomb de l'accumulation de guano. Leurs sections et leurs profondeurs varient de quelques dizaines de centimètres à plus d'un mètre.

Les concrétions sont également affectées par la biocorrosion. Les extrémités des stalactites et des draperies sont corrodées. Dans certains cas elles présentent une croûte d'hydroxylapatite (fig. 16).

Les coulées de calcite sont également touchées. La biocorrosion met souvent en évidence la succession de leurs lamines (fig. 17).

Quant aux stalagmites, la biocorrosion les impacte différemment en fonction de leur exposition :

- quand elles sont sous le guano : elles apparaîtront totalement « mangées » (fig. 18),
- quand le guano s'accumule à leur sommet : elles seront creusées et présenteront la forme d'un calice (fig. 19), ou alors elles seront totalement tronquées (ou amputées) sur un côté,
- quand elles sont soumises uniquement aux aérosols : elles apparaissent toutes lisses et prennent des allures de fantôme (fig. 20).

Dans certains cas, elles apparaissent recouvertes par un chapeau d'hydroxyapatite (fig. 21).

Les coulées présentent également des formes étranges (fig. 22).

6. Une spéléogénèse non négligeable.

Ces dernières années ont vu la mise en évidence de nouvelles théories sur la

▷ Fig. 9 : Ensemble de coupoles dans la grotte de Nabrigas.

▷▷ Fig. 9 bis : grotte des Furtins (71), croûtes d'hydroxylapatite à la base d'une coupole.

Photos Lionel Barriquand



▷ Fig. 8 : Lampe en bronze ayant subi la biocorrosion et tissu gaulois découvert à l'intérieur de celle-ci. Grotte d'Azé (71).



formation des grottes (fantômisation, karst hypogène...). La biocorrosion apparaît maintenant comme un nouveau processus à prendre en compte pour une évolution secondaire des cavités.

Son impact peut être évalué indirectement en mesurant le retrait de paroi partiellement protégée par des spéléothèmes datés, mais également en mesurant le volume perdu par des stalagmites datées.

Ainsi Lundberg et McFarlane (2009, 2012, 2015) avaient obtenu une valeur moyenne de retrait de 12,5 mm par millénaire, avec des valeurs maximales de 34 mm par millénaire. À la grotte du Chameau nous avons obtenu des valeurs allant jusqu'à 20 mm par millénaire. Dans la grotte d'Azé nous obtenons des valeurs allant jusqu'à 34 mm par millénaire.

Cette dernière grotte est particulièrement intéressante puisqu'elle a été totalement bouchée par un bouchon de calcite à 60 m du porche d'entrée, il y a 22 000 ans. Ainsi, seule l'entrée de la grotte a été soumise aux chiroptères (elle était considérée comme la plus grande maternité de Bourgogne dans les années 1950-1960), alors que toute



◁◁ Fig. 9 : grotte préhistorique d'Azé (71), la paroi qui a été en contact avec l'accumulation de guano présente des cupules liées à l'altération.

Photo Lionel Barriquand

◁ Fig. 10 : Grotte de Thais, Drôme, une partie des sols est transformée en crypto-lapiaz par la biocorrosion.

Photo Serge Caillault



◁ Fig. 11 : grotte du Chameau, Maroc, les parois sont lissées par les vapeurs corrosives, les reliefs sont dus à une corrosion différentielle entre coulée de calcite et paroi.

Photo Michel Renda

▷▷▷ Fig. 12 : grotte de Chirolong (07), « flutes » à la base des parois.

▷▷ Fig. 13 : grotte de Chirolong (07), conque au-dessus d'une accumulation de guano.

▽ Fig. 14 : grotte de Thais (38), une partie des sols est transformée en crypto-lapiaz par la biocorrosion..

Photo Lionel Barriquand

7. Une archive environnementale inédite.

sa partie amont confinée en a été préservée. Dans la zone d'entrée, nous retrouvons la plupart des impacts évoqués précédemment, alors qu'ils sont totalement inexistant au-delà du bouchon de calcite. Nous pouvons en particulier observer de nombreuses coupoles verticales au plafond de la zone soumise aux chiroptères alors qu'elles sont absentes dans la partie confinée (fig. 24).

Comme nous l'avons évoqué, le guano peut se présenter sous forme d'une accumulation de crottes sèches ou bien « d'argile » noire. Ces différences sont uniquement liées aux conditions environnementales dans lesquelles le guano a été



▷ Fig. 15 : Aven d'Orgnac, tîne encore remplie de guano ancien (échelle 10 cm).



▷▷ Fig. 16 : grotte du Chameau (Maroc), extrémité d'une stalactite biocorrodiée présentant une capote de minéral phosphaté.

Photos Lionel Barriquand

▷ Fig. 17 : ghar Jakhoukh (Maroc), les lamines de la coulée de calcite sont mises en évidence par la biocorrosion résultant du guano qui se trouve juste dessous.

▷▷ Fig. 18 : Aven d'Orgnac, stalagmite à moitié « mangée » par la biocorrosion.

▽ Fig. 19 : aven d'Orgnac, stalagmite transformée en calice par la biocorrosion.

△ Fig. 20 : aven d'Orgnac, stalagmite fantôme.

▽▽ Fig. 21 : grotte du Chameau (Maroc), croûte de minéral phosphaté (apatite) au sommet d'une stalagmite. Photo Daniel Chailloux.

▽▽▽ Fig. 22 : aven d'Orgnac, successions de déversoirs remplis de guanos dans une coulée de calcite.

conservé. En effet, nous avons daté des guanos, se présentant sous la forme d'une accumulation de crottes sèches située dans les salles Hautes de l'aven d'Orgnac. Alors que ces guanos nous semblaient récents, nous avons obtenus des âges compris entre 3029 av. J.-C. et 78 ap. J.-C. À l'inverse, dans la grotte des Furtins nous avons daté des guanos, qui se présentent sous la forme d'argile noire qui sont plus récents, de 1025 à 1160 ap. J.-C. À Blanot, ils datent vraisemblablement de 1728 à 1810 ap. J.-C. Marcel Jeannet évoque même des guanos de 10000 ans dans la grotte de la Chauve-Souris à Donzère (Drôme)!

Le guano peut donc constituer une archive couvrant un large espace temporel. Dans le cadre d'un projet de recherches dirigé par Laurent Bruxelles, de nombreux échantillons ont été prélevés dans le sud de la France afin de mener différentes recherches. Ce projet sera poursuivi dans les années à venir et conduira à étudier de plus en plus de cavités.



Ainsi, des analyses de pollens sont menées actuellement. Il se peut que le guano permette de reconstituer des environnements extérieurs anciens dans des territoires karstiques ou ces informations sont généralement très pauvres. Des analyses chimiques sont également en cours afin de montrer les traces des différentes pollutions s'étendant du tout début de la métallurgie jusqu'à aujourd'hui. Dans le cadre d'un autre projet, Eve Aphonso regarde également la situation actuelle des dépôts de guano et leur évolution par rapport à d'autres périodes historiques plus ou moins récentes. Le rôle du vivant dans l'évolution des accumulations de guano est également un paramètre qui reste à étudier (fig. 25 et 26).

8. Et les conséquences...

Comme nous l'avons vu, la biocorrosion liée aux chauves-souris peut avoir un impact très important dans certaines grottes. Cette spéléogénèse secondaire est à prendre en compte dans l'étude des réseaux karstiques et leur évolution. Celle-ci se traduit partout dans les zones occupées ou ayant été occupées par ces mammifères et sous différentes formes plus ou moins associées selon les cavités (fig. 27). À ces endroits, le retrait des parois et des spéléothèmes dépasse le centimètre par millier d'années. Outre l'aspect purement lié à la spéléogénèse, il convient maintenant de prendre en compte ces phénomènes dans la conservation des traces anthropiques et animales sur les

parois. Il est impressionnant de voir, par exemple dans grotte d'Azé qui a été de tous temps occupée par l'Homme et les animaux, qu'il ne reste aucune trace de leur passage sur les parois dans la zone exposée aux chauves-souris. Quasiment aucun graffiti n'est visible, alors que dans la grotte de Blanot qui est à proximité, et d'accès plus difficile, en présente plus de 2000. Il est donc indubitable que la présence de chauves-souris n'est pas compatible avec la conservation des traces, graffitis, dessins, peintures ou gravures qui pouvaient s'y trouver. Comment des œuvres vieilles de plusieurs dizaines de milliers d'années pourraient être conservées avec un tel retrait? 🦇

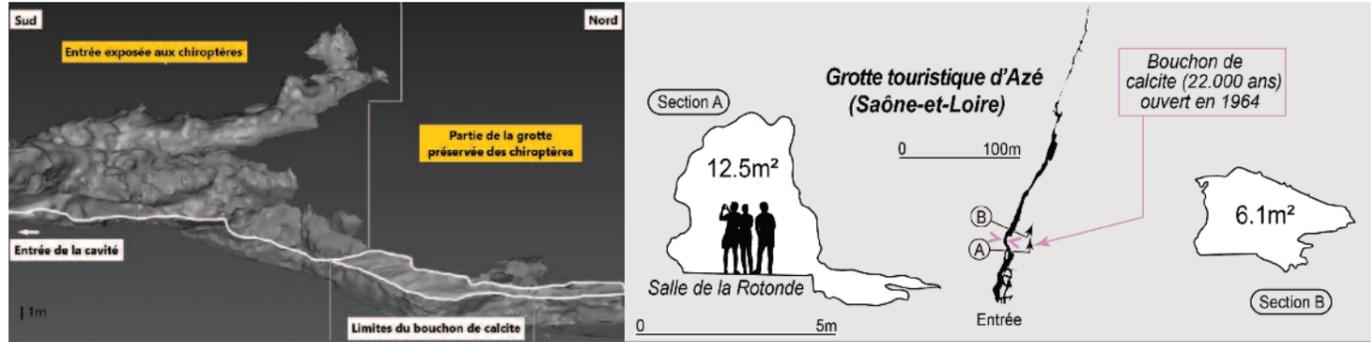


▷▷ Fig. 23 : grotte préhistorique d'Azé, relevé 3D de part et d'autre du plancher qui a fermé la grotte il y a 22 000 ans. Du côté de l'entrée (à gauche), le plafond est marqué par des coupoles, alors qu'au-delà du bouchon de calcite il est plat.

Modèle 3D, S. Jaillet, D. Blanchard et L. Barriquand

▷ Fig. 24 : grotte préhistorique d'Azé, sections de la galerie de part et d'autre du bouchon de calcite qui a isolé la partie amont, il y a 22 000 ans.

Relevé Stéphane Jaillet



◁◁ Fig. 25 : Ghar Jakhoukh (Maroc), micro-organismes de couleur blanche se développant sur le guano.

◁ Fig. 26 : grotte de Blanot (71), vue de détail de micro-organismes se développant sur du guano.

Photos Lionel Barriquand

Tous nos remerciement à D. Accary, J. Arnaud, L. Cadilhac, H. Caillaud, B. Chirol, E. Dardenne, I. Donzey, M. el Ahmadi, J.-L. Galéra, C. Gaillard, C. Gauchon, A.-M. Génuite, J.-P. Grandcolas, G. Hez, A. Jacquet, C. Jessaulme, J. Kemper, B. Piaudel, F. Prudhomme, O. Sakhi et S. Tocino qui nous ont aidés lors de cette étude.

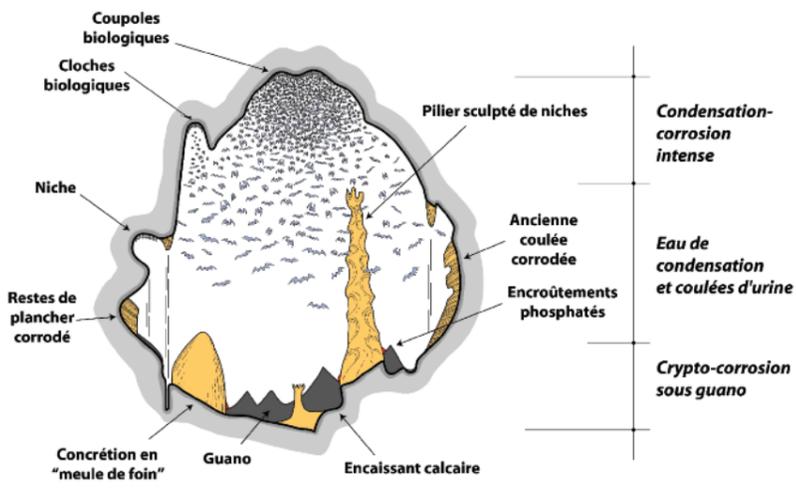
Ainsi qu'à Aven d'Orgnac : J. Ughetto ; Fondation Vallée de Zegzel : M. El Kadiri Boutchich ; Grottes d'Azé : I. Vernus, A. Lescale et M. Olivier ; Grottes de Blanot : D. Vergnaud, M. Duchassin et M. Rousseau ; Grotte de Saint Marcel : C. Gavin, D. Dupuy et C. Martin-Roy ; Grotte de Thais : L. Garnier ; CDS07, CEN Rhône-Alpes : B. Pascault ; Communauté de communes du Pays des Vans en Cévennes : T. Coste ; Conseil Départemental d'Ardèche : C. Sautière, D. Guillemet et C. Hopp ; CORA Groupe Chiroptères Rhône-Alpes : G. Issartel ; LPO : S. Vincent ; SRA AURA : K. Gernigon et B. Gély ; SRA Bourgogne-Franche-Comté : M. Talon et Y. Pautrat pour leur soutien lors cette étude.

Audra P., De Waele J., Benteleb I., Chroňáková A., Krístůfek V., D'Angeli I.M., Carbone C., Madonia G., Vattano M., Scopelliti G., Cailhol D., Vanara N., Temovski M., Bigot J.-Y., Nobécourt J.-C., Galli E., Rull F. and Sanz-Arnanz A., 2019. Guano-related phosphate-rich minerals in European caves. International Journal of Speleology, 48 (1), 75-105. Tampa, FL (USA) ISSN 0392-6672 <https://doi.org/10.5038/1827-806X.48.1.2252>

Audra P., Heresanu V., Barriquand L., El Kadiri Boutchich M., Jaillet S., Pons-Branchu E., Bosák P., Cheng H., Edwards R.L. and Renda M., 2021. Bat guano minerals and mineralization processes in Chameau Cave, Eastern Morocco. International Journal of Speleology, 50 (1), 91-109.

Barriquand L., Bigot J.-Y., Audra P., Cailhol D., Gauchon C., Heresanu V., Jaillet S., Vanara N., 2021. Caves and Bats: Morphological impacts and archaeological implications. The Azé Prehistoric Cave (Saône-et-Loire, France). Geomorphology, 388, 107785, 12p.

Bruxelles L., Jarry M., Bigot J.-Y., Bon F., Cailhol D., et al. La biocorrosion, un nouveau paramètre à prendre en compte pour interpréter la répartition des œuvres pariétales : l'exemple de la grotte du Mas d'Azil en Ariège. Karstologia, Fédération Française de Spéléologie et Association Française de Karstologie, 2016.



△ Fig. 27 : principaux effets et formes résultant de la biocorrosion observables dans une grotte. Philippe Audra et al., 2016