



HAL
open science

Influences de la corrosion de condensation et de la corrosion biogénique sur les parois et les dépôts de grotte, l'exemple de la grotte du Mas d'Azil (Ariège, France)

Didier Cailhol, Jean-Yves Bigot, François Bon, Laurent Bruxelles, Grégory Dandurand, Marc Jarry, Céline Pallier, Nathalie Vanara

► To cite this version:

Didier Cailhol, Jean-Yves Bigot, François Bon, Laurent Bruxelles, Grégory Dandurand, et al.. Influences de la corrosion de condensation et de la corrosion biogénique sur les parois et les dépôts de grotte, l'exemple de la grotte du Mas d'Azil (Ariège, France). *Préhistoire, Art et Sociétés*, 2021, LXXI, pp.7-28. <hal-03207500>

HAL Id: hal-03207500

<https://hal.science/hal-03207500v1>

Submitted on 8 Dec 2021

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.



HAL Authorization

Influences de la condensation et de la corrosion biogénique sur les parois et les dépôts de grotte, l'exemple de la grotte du Mas-d'Azil (Ariège, France)

Didier Cailhol,¹ Jean-Yves Bigot,² François Bon³
Laurent Bruxelles,⁴ Grégory Dandurand,⁵ Marc
Jarry,⁶ Céline Pallier,⁷ Nathalie Vanara.⁸

Les grottes et les réseaux spéléologiques sont des milieux très importants pour l'archéologie préhistorique et plus particulièrement paléolithique. Ce sont des objets naturels, résultats des évolutions environnementales à l'échelle d'un massif ou d'une région. Les interactions et les dynamiques en jeu sont issues des processus géologiques, climatiques et écosystémiques qui s'exercent au fil du temps sur un bassin d'alimentation et des systèmes hydrologiques installés en fonction des variations des niveaux de base. Il en ressort à différentes échelles, des structurations, des morphologies et des dépôts qui constituent des mémoires ou des archives des processus et des indicateurs de paléo environnements. Loin d'être des objets géologiques fossiles, les grottes ont été et sont toujours affectées par des évolutions environnementales, notamment climatologiques mais aussi biologiques, qu'il faut impérativement prendre en compte pour comprendre les relations présence/absence de vestiges d'occupations anciennes. La grotte du Mas-d'Azil en Ariège, site préhistorique majeur de la Préhistoire et phénomène karstique remarquable, n'échappe pas à ces phénomènes bien présents également dans d'autres cavités importantes du piémont pyrénéen.

1 / Edytem, UMR 5204 du CNRS - INRAP. didier.cailhol@inrap.fr
2 / AFK
3 / Université Toulouse Jean Jaurès - Traces, UMR 5608 du CNRS
4 / Traces, UMR 5608 du CNRS - INRAP

5 / Traces, UMR 5608 du CNRS - INRAP
6 / Traces, UMR 5608 du CNRS - INRAP
7 / Traces, UMR 5608 du CNRS - INRAP
8 / Université Paris 1-Panthéon-Sorbonne - Traces, UMR 5608 du CNRS

Introduction

En matière d'archéologie, les grottes constituent des milieux naturels essentiels pour la connaissance des sociétés et des cultures de la Préhistoire et des évolutions environnementales qui se sont produites au cours du Pléistocène et de l'Holocène. Si une partie du patrimoine archéologique se trouve enfouie dans les sédiments des grottes, l'art pariétal est le plus souvent observable dans des portions de galeries ou des salles, plus ou moins affectées par les évolutions environnementales. Ainsi, les vestiges d'art préhistorique parvenus jusqu'à nous ont bénéficié de conditions très particulières qui ont présidé à leur conservation. De ce fait, ces grottes sont le plus souvent décrites comme des cavités d'origine karstique réputées fossiles. Outre les phénomènes bien connus de recouvrement par des voiles calcitiques, qui témoignent d'un fonctionnement actif de la cavité postérieurement aux exécutions pariétales, les recherches récentes en matière de karstologie montrent l'importance de phénomènes temporaires de corrosion du calcaire liés à la condensation sur des zones des parois des cavités qui présentent pourtant toutes les conditions nécessaires à leur conservation. Grâce à l'approche systémique du karst, développée au cours des dernières décennies, la prise en compte des processus environnementaux, avec la climatologie de la grotte, l'identification des écosystèmes présents et passés, le rôle des facteurs biotiques à l'origine de phénomènes géochimiques met en évidence des dynamiques et des niveaux d'énergie conséquents dans l'évolution des morphologies d'une grotte. Ainsi, les différentes méthodologies d'études appliquées au karst permettent une approche plus précise pour la description des paysages souterrains et des évolutions à l'échelle du massif, de la grotte, de la galerie et de la paroi. Au cas particulier de l'archéologie, ces démarches offrent un angle de vue différent et portent un regard nouveau sur l'étude et la conservation des grottes ornées. Les apports de la géomorphologie et de la karstologie sont essentiels pour identifier et comprendre les paysages souterrains, l'évolution des morphologies pariétales et la conservation des remplissages. Ainsi, la description méthodologique des paysages souterrains des grottes et la compréhension de leurs composantes permettent de replacer les galeries d'intérêt archéologique dans l'ensemble du réseau et du massif karstique. Les études des processus physico-chimiques, biologiques et environnementaux impliqués dans l'évolution géomorphologique d'une galerie ou d'une cavité naturelle apportent des éléments essentiels pour reconstituer des chronologies, des intensités et des interactions (figure 1). À partir de l'utilisation de modèles numériques et de l'analyse 3D et 4D de morphologies et des espaces, ainsi que des dynamiques en jeu à différentes échelles de temps, il est alors possible de proposer des scénarii d'évolution et de mesurer l'impact des changements environnementaux dans l'évolution du site.

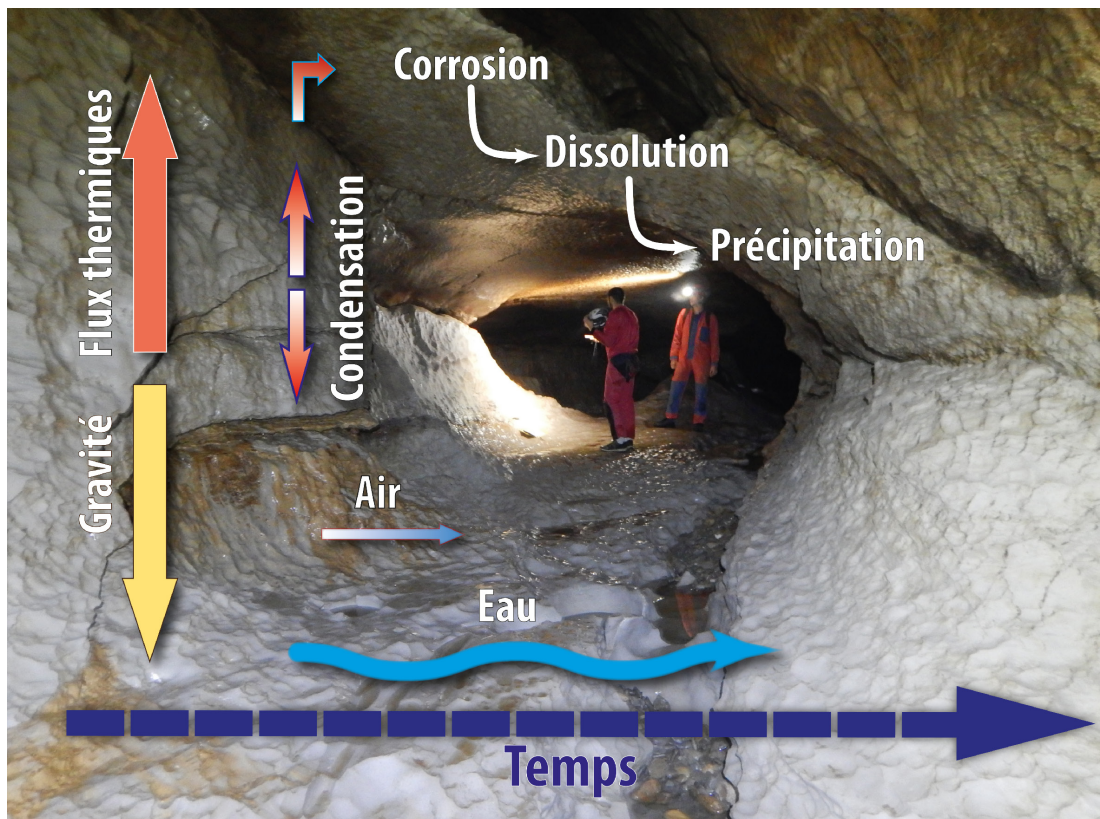


Figure 1 : les différents facteurs impliqués dans la karstification et l'évolution d'une galerie de grotte (infographie et cliché © Didier Cailhol).

Les approches multidisciplinaires d'étude des grottes dans le contexte de l'archéologie

Les études multidisciplinaires concertées et collaboratives abordent la grotte avec une approche systémique, à partir de disciplines comme la géologie, la géomorphologie, l'hydrogéologie, la biologie et la microbiologie, et la climatologie, afin de compléter et aider à la contextualisation des recherches archéologiques. Ce type d'approche développée notamment par Paul Ambert (Bruxelles, 2019) apporte une contextualisation des données archéologiques à partir des dynamiques spatiales à l'échelle du site, du territoire et des évolutions environnementales qui se sont succédées. Cette documentation du milieu souterrain prend en compte les flux et les sources d'énergie en jeu dans un système spéléologique (figure 1), ainsi que les mécanismes et processus impliqués dans la spéléogenèse : 1) Le temps ; 2) L'énergie (la gravité, les flux thermiques et les échanges géochimiques) ; 3) Des vecteurs : l'eau, l'air ; 4) Des processus physico-chimiques. Cela s'appuie sur l'installation de réseaux de mesures à haute résolution des paramètres physiques qui combinent des acquisitions automatiques et programmées à pas de temps serrés, de la cartographie et les descriptions de formes et de structures des portions de galeries ou d'objets naturels pour rendre compte du fonctionnement du système karstique. Il est alors nécessaire de définir une stratégie de mesures et d'acquisition de données pour choisir les emplacements, les équipements, les niveaux d'échelle et de précision qui répondent aux objectifs fixés.

Mesures et acquisition des données

Le suivi de la climatologie joue un rôle important dans cette approche du fait de son influence sur le système spéléologique. Il est installé à partir d'un réseau de mesures dans la grotte et de surface. Les paramètres suivis concernent la température de l'air et/ou de l'eau, le dioxyde de carbone, le dioxyde d'oxygène, l'hygrométrie, la dynamique des films d'eau. La documentation des structures du karst comprend des inventaires et les descriptions des morphologies de galeries, des parois, des dépôts chimiques, fluviatiles et anthropiques et de la microbiologie avec des analyses génomiques et la cartographie des biofilms de paroi. La base de données et la cartographie numérique à très haute résolution sous-entend l'acquisition et la gestion de données s'appuyant sur des protocoles et des équipements de mesure fiables et calibrés, sur l'utilisation des modèles 3D obtenus à partir de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie, de systèmes d'information géographique (SIG) pour le stockage des données et leur traitement spatialisé. Cette démarche amène la production de cartographies haute résolution des différentes thématiques et des analyses spatialisées de leurs influences sur le système karstique et spéléologique.

Les effets de l'aérogologie dans les réseaux spéléologiques

Dans un système karstique, des circulations d'air ont lieu entre la surface et le milieu souterrain. Ces flux de circulation dépendent des conditions environnementales, de la géométrie des galeries, leur taille, l'interconnexion des réseaux de conduits ainsi que du nombre et de la position topographique des entrées. Les modalités et les dynamiques qui les contrôlent, sont propres à chaque réseau spéléologique (figure 2). L'intensité et le sens des flux sont diversement influencés au sein du réseau spéléologique par les cycles nyctéméraux (jour-nuit), la saisonnalité et les variations météorologiques de très courtes périodes (semaine, jour). Les dynamiques aérogologiques obéissent à des lois physiques bien connues et identifiées (Covington et Perne 2015) : 1) L'effet cheminée dû à des entrées hautes et basses dans le système spéléologique ; 2) Les variations barométriques dans les systèmes spéléologiques confinés par des couvertures géologiques de type caprock (niveaux géologiques plus ou moins imperméables situés au-dessus d'un système karstique) ; 3) Des cellules de convection.

Aérologie des systèmes spéléologiques

Les processus physiques impliqués dans l'aérodologie :

- Les circulations par effet cheminée,
- Les circulations de convection,
- Les circulations barométriques,
- Les circulations créées par les écoulements d'eau,
- Les circulations liées aux changements de volumes de la grotte et des conduits lors des crues,
- Les circulations liées aux vents en surface.

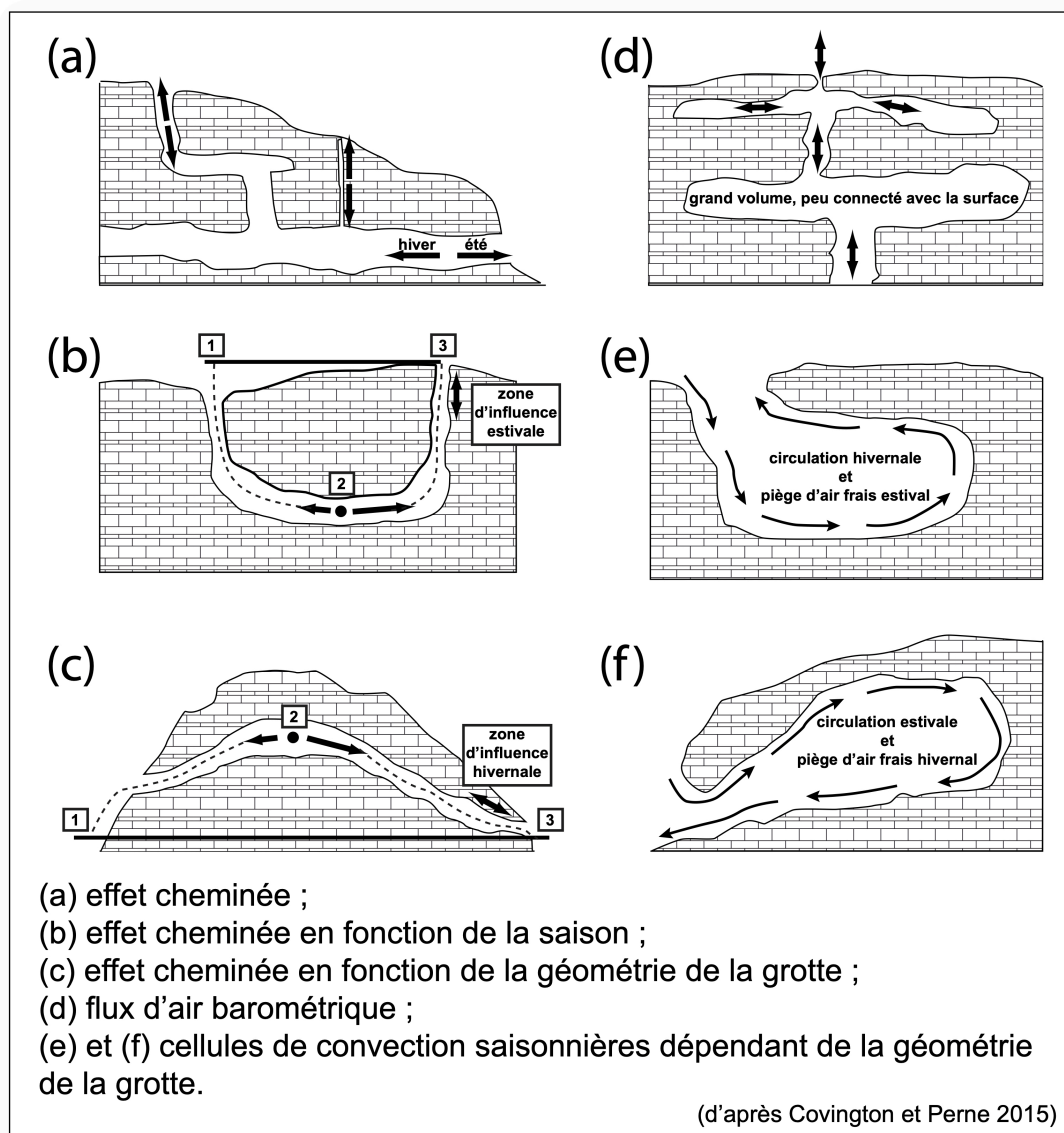


Figure 2 : dynamiques aérodologiques en jeu en fonction de l'organisation des systèmes spéléologiques (d'après Covington et Perne 2015).

La corrosion de condensation

La corrosion liée à la condensation sur les parois des grottes est un processus physico-chimique qui intervient dans certaines parties et portions de galeries qui dépend de l'aérodynamique locale (géométrie de la cavité, orifices ouverts ou fermés, etc.). Ce phénomène est complètement lié aux évolutions climatiques qui interviennent dans des zones localisées des galeries, en fonction de la structure du système spéléologique. À certaines périodes, la température de certaines portions de parois est plus froide que la température de l'air à cet endroit. Il se produit alors sur ces surfaces des phénomènes de condensation. Du fait de l'hygrométrie relative élevée dans les grottes, la température du point de rosée se trouve très proche de celle de la paroi. De très faibles variations de température de l'air conduisent alors à la formation d'eau de condensation sur des portions de parois. Un film d'eau se crée en équilibre chimique avec la pression partielle de dioxyde de carbone présente à cet endroit. La solution légèrement acide obtenue va corroder le calcaire et dissoudre les carbonates. C'est ce processus qui est appelé la corrosion de condensation (*condensation corrosion* en anglais) (Gabrovšek *et al.* 2010 ; D'Angelli *et al.* 2018). D'un point de vue systémique,

en termes de thermodynamique, l'aquifère du système karstique et les réseaux de galeries qui ont contribué à l'installation de ces processus sont considérés comme un cas très particulier, où la chaleur est avant tout transportée par advection plutôt que par convection comme c'est le cas dans les autres systèmes géologiques et hydrogéologiques. La corrosion de condensation est donc un processus physico-chimique dont l'intensité dépend de la géométrie, de la taille du système spéléologique, du contexte géologique et environnemental du système karstique. Ces phénomènes se répartissent dans la galerie en fonction des dynamiques climatiques et des morphologies à différentes échelles. Cela affecte les parois et les dépôts dans des zones spécifiques des grottes, avec des actions plus ou moins importantes sur les formes anciennes pour les modifier ou les faire disparaître. Ces phénomènes sont largement exprimés dans les grottes du Front nord pyrénéen. Ils contribuent aux évolutions des paysages des cavités et à l'évolution des morphologies des galeries et des remplissages. La grotte du Mas d'Azil et le réseau de Niaux-Lombrive-Sabart, présentent des contextes favorables à l'action de ces processus et des expressions remarquables de leurs effets sur les morphologies des galeries.

Les processus de corrosion de condensation et d'origine biogénique dans la grotte du Mas d'Azil (Ariège).

La grotte du Mas d'Azil est une des traversées spéléologiques emblématiques des grottes françaises (figure 3). La rivière l'Arize emprunte actuellement ses galeries monumentales issues de la percée hydrologique de l'extrémité de l'anticlinal. La géométrie du réseau de la grotte du Mas d'Azil résulte des évolutions paléogéographiques de la zone pré-pyrénéenne du massif de l'Arize. Les formes pariétales et les remplissages sédimentaires constituent les principaux témoignages des phases d'évolution plio-quaternaires de la rivière qui a évolué en capture karstique (Pallier *et al.* 2018). Cependant, l'observation fine des paysages souterrains, des morphologies des galeries et des salles adjacentes apporte des informations sur des évolutions spéléogéniques beaucoup plus récentes. Cette spéléogénèse est directement liée aux dynamiques climatiques et biologiques qui accompagnent les évolutions environnementales régionales. En effet, les rôles des processus liés à la corrosion de condensation (Gabrovšek *et al.* 2010) et à la corrosion d'origine biologique (Bigot 2014), due à la présence dans la durée de colonies de chiroptères, ont été relevés dans plusieurs parties de la cavité (Bruxelles *et al.* 2018).

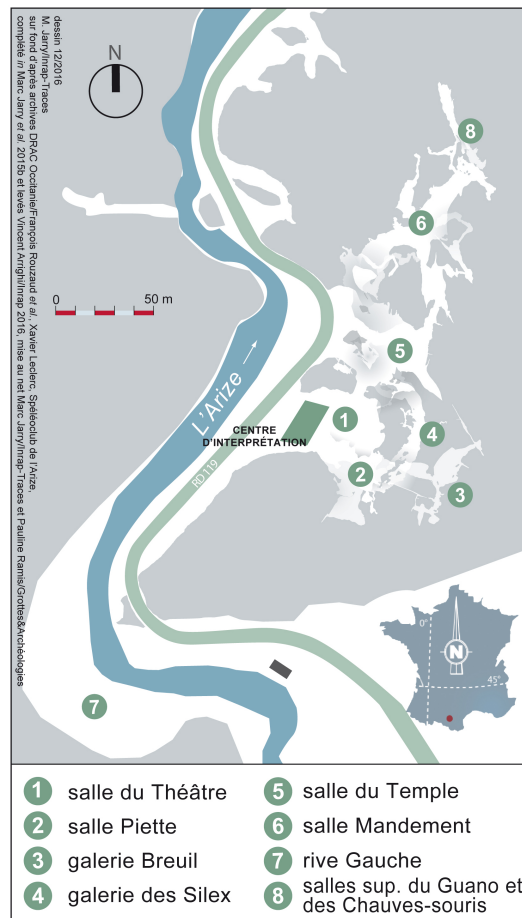


Figure 3 : localisation et topographie générale de la grotte du Mas d'Azil en Ariège, France (Marc Jarry / Inrap-Traces d'après Jarry *et al.* cf. crédit dans la figure).

Ces phénomènes spéléogéniques, attribués à l'Holocène, sont observables dans les parties hautes de la grotte, notamment dans les salles des Conférences, Mandement et Nord (salles supérieures du Guano et des Chauves-souris) ; (figure 3). Il s'agit des parties les plus chaudes et les plus stables en température de la grotte ; elles sont donc particulièrement propices à l'installation de colonies de chauves-souris. Ces parties hautes de la grotte ont été préservées des alternances gel-dégel et n'ont pas été affectées par les phénomènes de desquamation des parois qui ont largement affecté la galerie principale où coule l'Arize et les grandes salles adjacentes. Une cartographie précise a été établie à partir des inventaires des morphologies et l'utilisation de la photogrammétrie, pour localiser, sérier et hiérarchiser les différents processus corrosifs et érosifs dans la cavité. Ce travail de reconnaissance des formes et processus a permis de les replacer dans une dynamique d'évolution de la cavité s'appuyant à la fois sur la stratigraphie des remplissages et la géométrie des conduits (Bruxelles *et al.* 2018, Pallier *et al.* 2018).

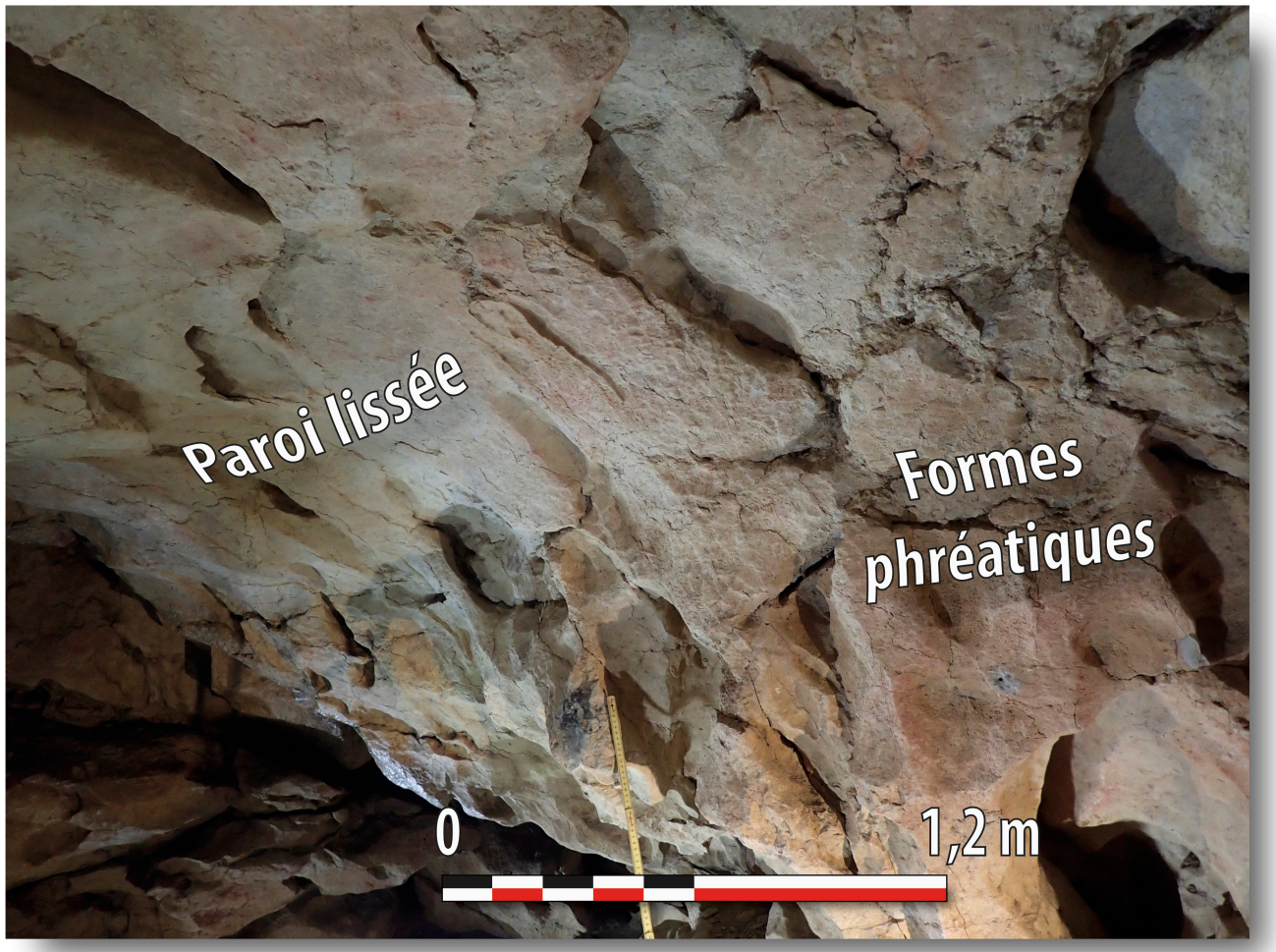


Figure 4 : effets de la corrosion liés à la condensation sur les parois à proximité de la Salle Piette. Atténuation des formes phréatiques anciennes (infographie et cliché © Didier Cailhol).

Les formes liées à la corrosion de condensation

Avec une géométrie compliquée et des morphologies de galeries d'une grande variété, l'aérogologie s'exerce de manière complexe et différenciée en fonction des zones de la grotte et des conditions climatiques extérieures et hydrologiques de la rivière. Dans les galeries, des emplacements très localisés se trouvent ainsi exposés à des phénomènes de condensation et l'installation d'un film d'eau sur les surfaces impactées par ces conditions thermiques. Il en découle des processus de corrosion des parois calcaires bien visibles avec l'altération des formes phréatiques héritées des circulations d'eau anciennes dans ces conduits (figures 4 et 5). Cela affecte également des coulées de calcite qui se trouvent, au fil du temps, presque complètement corrodées, ou avec la disparition plus ou moins marquée des signatures faites au crayon à mine depuis le 19ème siècle (figures 6 et 7). Les zones de condensation vont changer en fonction de la saison, des variations thermiques et d'intensité des courants d'air en circulation dans la grotte. Les secteurs à proximité des grandes galeries vont être plus particulièrement sensibles du fait des interactions marquées avec les conditions extérieures. Ceci est particulièrement visible dans le secteur de la salle Piette, à proximité de l'entrée de la galerie Breuil, du fait des dimensions de la galerie et de la proximité avec la galerie principale (figure 3).



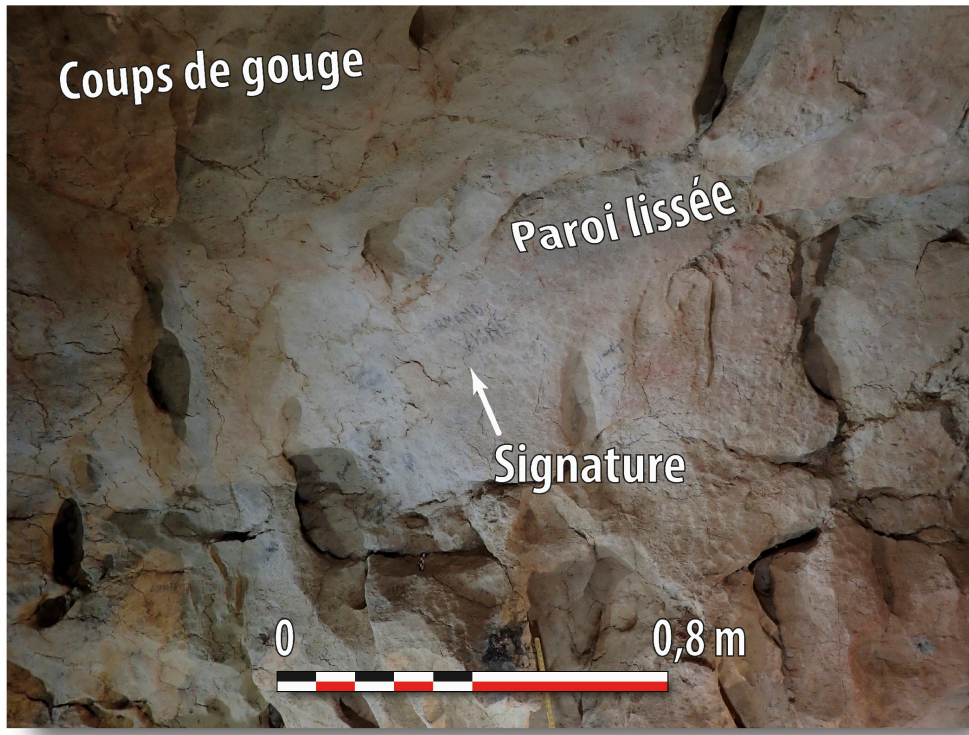


Figure 5 : effets de la corrosion liés à la condensation sur les parois à proximité de la Salle Piette. Effacement des coups de gouges, des inscriptions et signatures, et des coulées de calcite (infographie et cliché © Didier Cailhol).

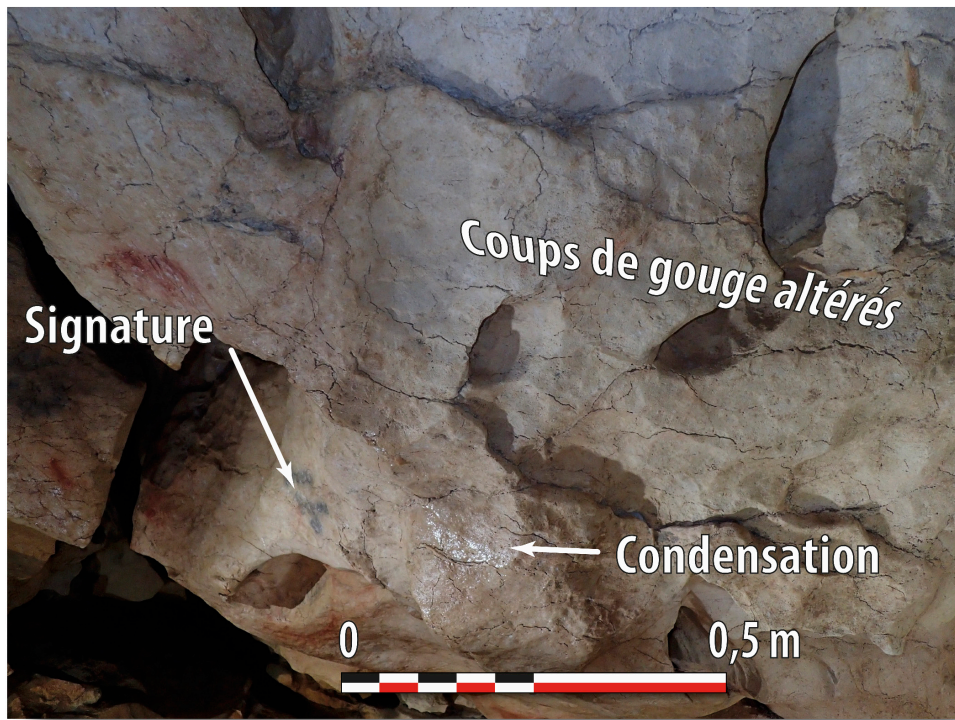


Figure 6 : effets de la corrosion liés à la condensation sur les parois à proximité de la Salle Piette. Zone de condensation sur la paroi et effacement des signatures (infographie et cliché © Didier Cailhol).

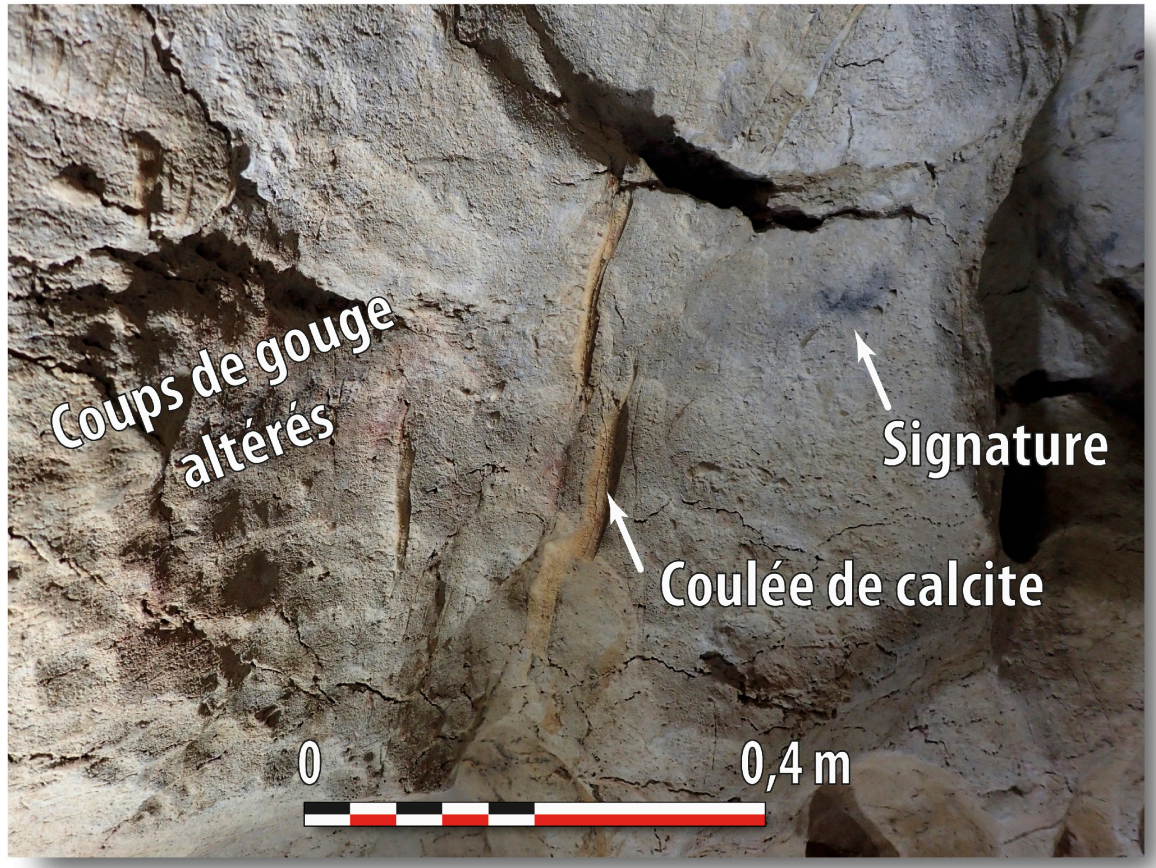


Figure 7 : effets de la corrosion liés à la condensation sur les parois à proximité de la Salle Piette. Altération des formes de paroi et des concrétions (infographie et cliché © Didier Cailhol).

Les morphologies issues de la présence des chiroptères

La présence de chiroptères dans une cavité va entraîner des changements importants dans ses écosystèmes et sur les morphologies des galeries et les remplissages (King-Webster et Kenny 1958, Lundberg et McFarlane 2009). En fonction des espèces, de la densité des colonies et de la durée des occupations dans une galerie de grotte, des effets conséquents vont se faire ressentir sur l'évolution post-spéléogénique des paysages souterrains. Cela s'accompagne de l'altération des parois, des remplissages (concrétions, dépôts fluviatiles, gravitaires ou climatiques), de changements des morphologies des galeries, des biotopes et de la climatologie souterraine (Lundberg et McFarlane 2009 ; Audra *et al.* 2017, 2018, 2019 ; Bruxelles *et al.* 2018).

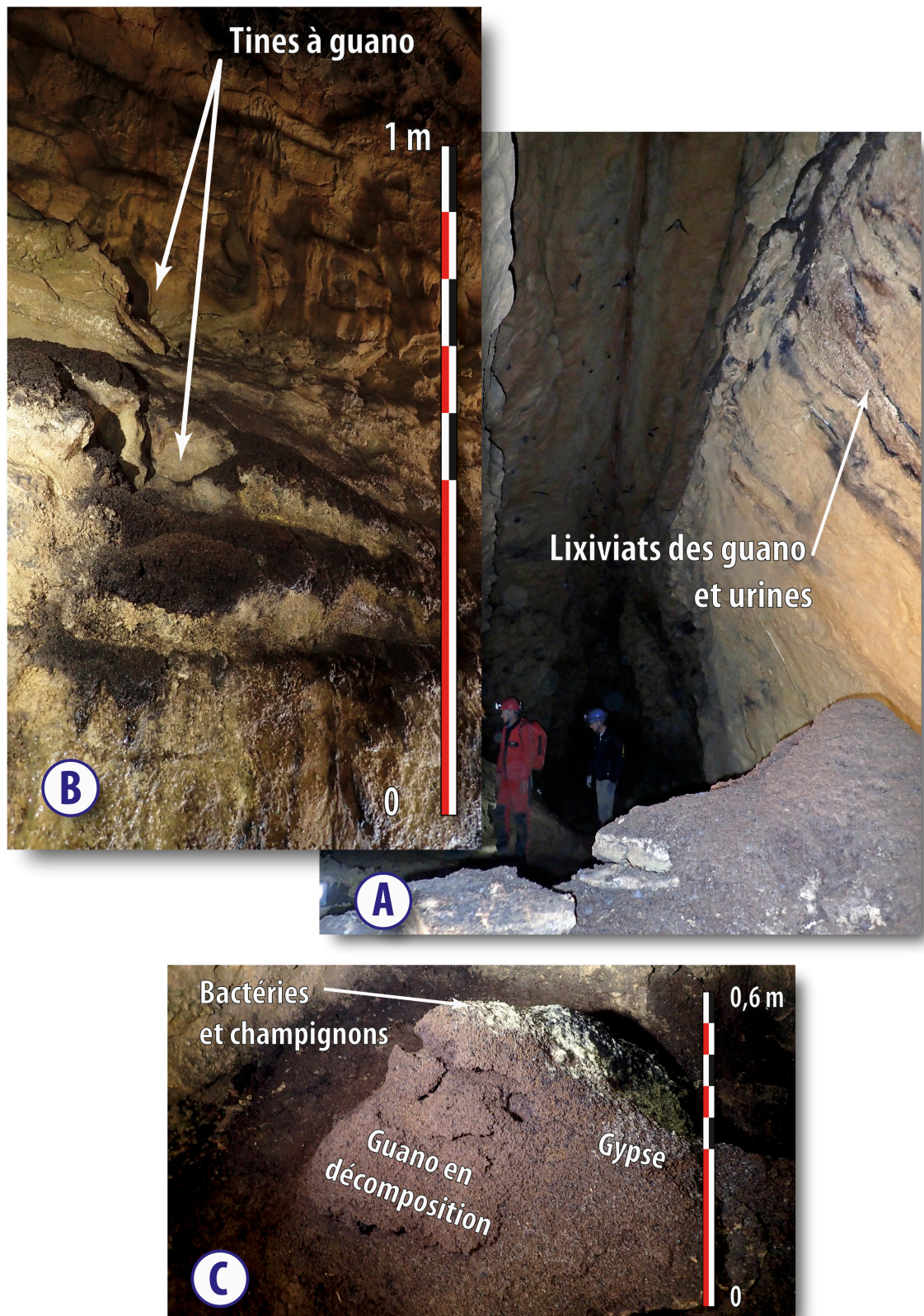


Figure 8 : impacts de la présence des chiroptères dans la galerie des Chauves-Souris. A : localisation des dépôts de guano au sol et sur les parois. B : dépôts sur les parois et les tines associées. C : dépôt de guano au sol et aspects des évolutions du fait des développements bactériens. (Infographie et clichés © Didier Cailhol).

Différentes marques de la présence des chauves-souris se retrouvent dans les galeries et sur les parois (figure 8). Aux plafonds et sur les parties hautes des parois, des taches de couleur sombre, sont régulièrement observées. Diverses espèces de chiroptères produisent des signaux olfactifs marqueurs de différentes phases de leur vie sociale (identification du groupe, des juvéniles, sexualité, territoire) ou à des fins comportementales (mâle dominant vis-à-vis de groupe de femelles et de mâles subordonnés). Pour cela, elles produisent des sécrétions grasses et olfactives à partir de glandes de la gorge ou des aisselles, qu'elles projettent ensuite en fonction des situations sociales. Cette signature olfactive permet ainsi aux individus de s'identifier et de se reconnaître tant en vol qu'au repos. Des analyses par chromatographie gazeuse ont mis en évidence plus de 372 composants lipidiques qui se distinguent entre les mâles et les femelles ainsi que des groupes différents au sein d'un même site (Brooke et Decker 1996, Altringham et Fenton 2003). Il est également observé des exsudats gras qui recouvrent les membranes des ailes et le corps. Ils ont pour fonction de maintenir la souplesse de la membrane qui relie l'extrémité des ailes au corps, le patagium, et d'éviter qu'il ne se dessèche. Les chiroptères l'enduisent d'une sécrétion produite à la commissure des lèvres (Dietz et Kiefer 2015). Ces différentes sécrétions glandulaires laissent des marques d'une couleur brun-noir sur les parois des emplacements occupés par les colonies (figures 9, 10).

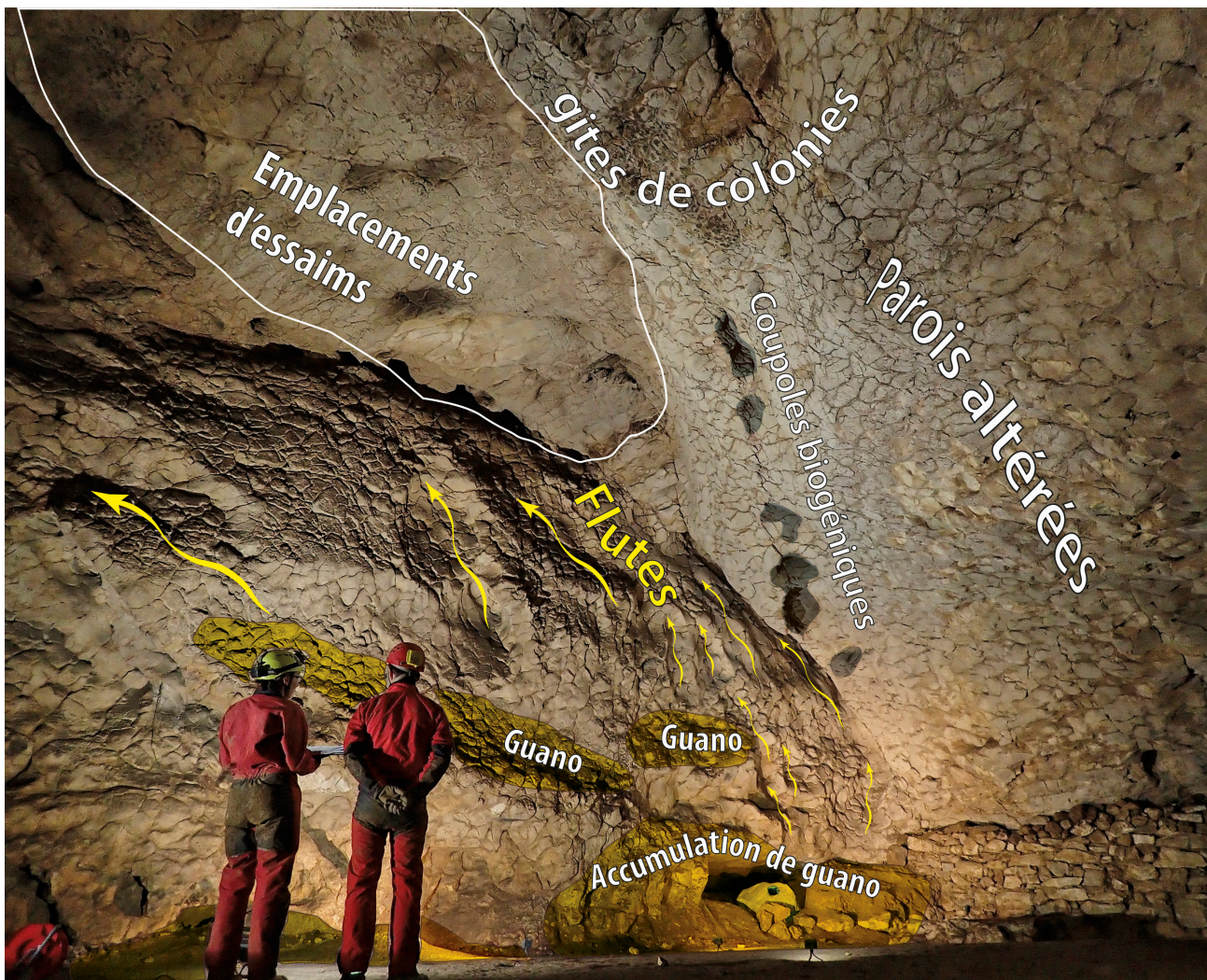


Figure 9 : grotte du Mas d'Azil. Impacts des processus de corrosion liés à la présence des chiroptères sur les parois des galeries et les massifs de concrétions. Coupoles liées à la présence des chiroptères sur les voûtes et flûtes de corrosion sur les parois du fait du guano (cliché et infographie © Didier Cailhol).

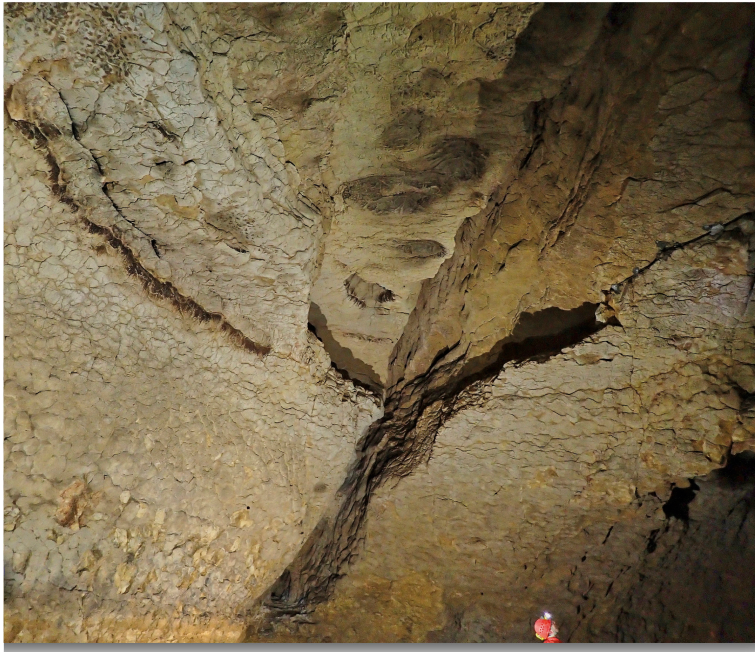


Figure 10 : grotte du Mas d'Azil. Vue des parois et plafonds impactés par la fréquentation des Chiroptères dans la Salle Mandement (cliché © Didier Cailhol).

Le guano issu de leurs déjections constitue également des marqueurs importants de la vie et des espèces présentes. Si les chiroptères défèquent en vol lors des phases de transit, elles le font également lors des périodes de repos ou de l'élevage des juvéniles, pendant les périodes où ils sont suspendus par les membres antérieurs dans les plafonds ou les surplombs dans les parois (figure 8). Ainsi, pour les espèces qui se regroupent en colonies importantes, notamment lors des périodes de mise bas et d'élevage des juvéniles, les accumulations au sol peuvent être importantes. Celles-ci se retrouvent également sur les replats des parois dans des accumulations moindres du fait de la dispersion par les écoulements des lixiviats provenant des urines et du ruissellement lié à la condensation. Le guano des chauves-souris insectivores comprend un pourcentage de 53 à 65 % de matière organique. Il est composé principalement de chitine et de traces de phyllosilicates. On trouve également de la brushite en microcristal qui se forme par réaction authigène. Le pH du guano frais est légèrement acide et contient un pourcentage de 25 à 57 % de phosphate ainsi qu'une proportion plus faible de sulfate d'ammonium. Au cours de sa dégradation, le guano prend une couleur grise avec la dégradation de la matière organique. Son évolution sur des cycles pluri-annuels va produire des composés carbonés, phosphorés et sulfurés de manière massive, du fait des processus biologiques et chimiques et aboutir à des minéralisations caractéristiques (Audra *et al.* 2017, 2018, 2019 ; Queffelec *et al.* 2017).

Les effets associés

Avec la présence importante de colonies de chiroptères, différentes espèces parasites se développent dans leur environnement. Il s'agit principalement de diptères de la famille des *Nycteribiidae* et *Streblidae* qui sont des ectoparasites exclusifs des chauves-souris (figure 11). Ces diptères ont un mode de reproduction larvaire qui se caractérise par le fait que l'œuf et la larve se développent dans l'utérus de la femelle. Le développement comprend 3 stades larvaires, qui sont nourris par une glande à lait. Les femelles ne déposent donc pas des œufs, mais directement une larve au dernier stade qui se transforme immédiatement en puppe sur la paroi. Ce stade peut durer de 16 à 55 jours. La puppe est plus ou moins transparente au début et devient ensuite de couleur plus sombre. L'émergence des adultes est stimulée par la présence des colonies qu'elles vont ensuite parasiter à leur tour (Baker 1967 ; Beaucournu *et al.* 1985 ; Beaucournu et Noblet 1996 ; Duvallat et Baldacchino 2017). Les puppes qui ne sont pas arrivées à leur terme et les restes de celles écloses, restent accrochées à la paroi pendant plusieurs décennies comme il est possible de le voir dans l'extrémité de la salle Mandement (figure 11). Cette durabilité dans le temps est à rechercher dans les interactions chimiques qui se produisent entre la chitine qui compose leur enveloppe et le carbonate de calcium. Par ailleurs, les puppes non viables constituent des supports pour le développement de communautés de bactéries chimiolithotrophes qui vont contribuer à la dégradation de la matière organique présente ici. La surface de la paroi subit alors une modification marquée à partir de l'ensemble de ces réactions.

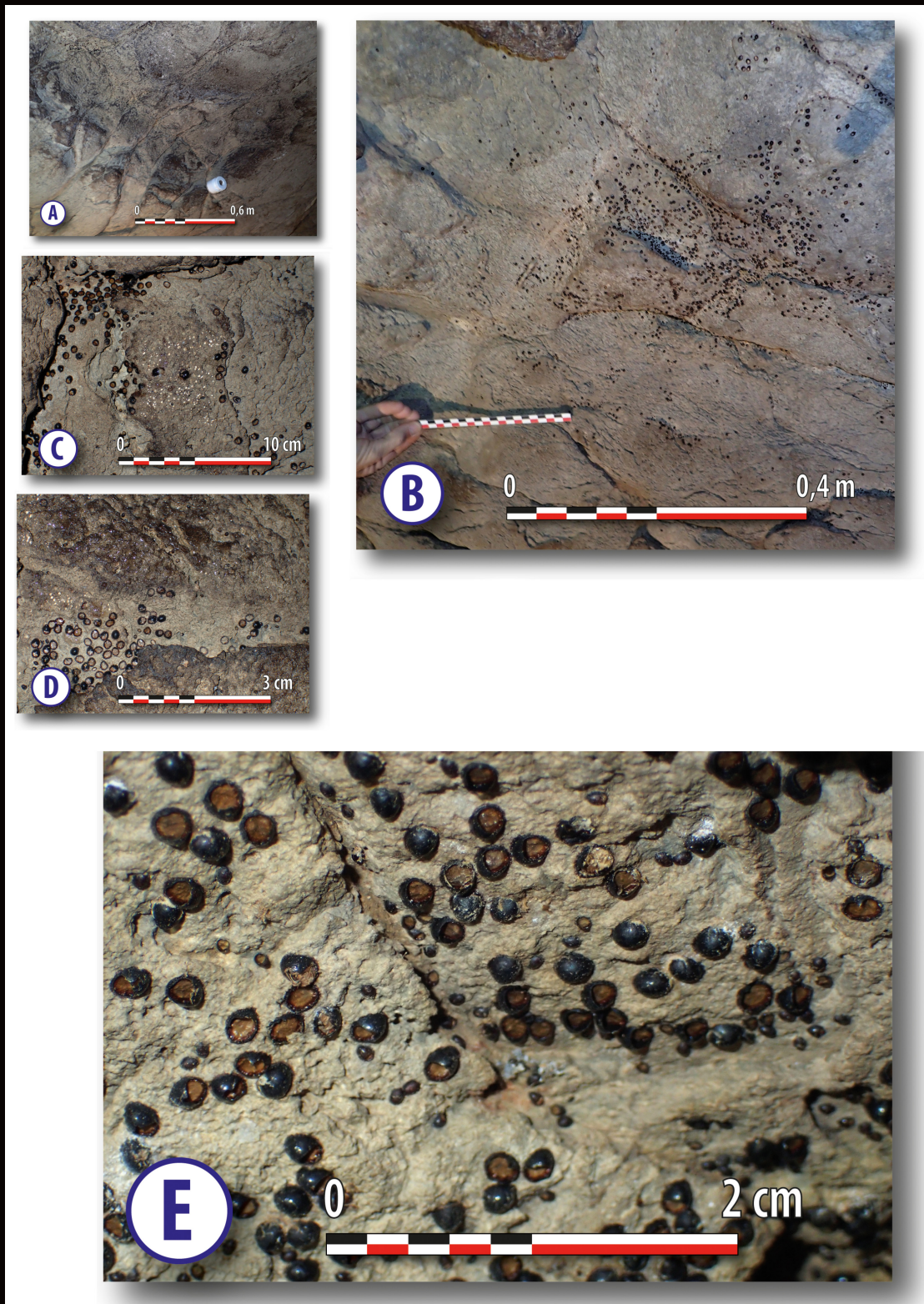


Figure 11 : grotte du Mas d'Azil. Localisation des pupes de Nycteribiidae et Streblidae et des colonies bactériennes associées sur les parois au fond de la salle Mandement.
A : surfaces couvertes.
B : localisation et densité des colonies.
C : associations des pupes et des biofilms bactériens.
D : détails des restes de pupes sur la paroi.
E : altération des parois par l'accroche des pupes et les réactions biochimiques associées (clichés © Didier Caillhol).

Les morphologies et les effets

La présence en nombre des chiroptères dans les salles ou les galeries de la grotte du Mas d'Azil va laisser un impact marqué sur l'évolution des parois et les morphologies de galeries (Bruxelles *et al.*, 2018). Par l'importance des colonies et leur présence active, elles vont contribuer à la modification du contexte climatique de la grotte avec des augmentations locales de température, de l'humidité relative et des émissions de CO₂ (Audra *et al.* 2018 ; Cailhol et Vanara 2018). Ainsi, les zones qu'elles fréquentent, dans les voutes et les parties hautes des parois vont se transformer avec la formation de coupoles à partir des irrégularités dans la roche (figures 9 et 10). En effet, leur présence en nombre dans ces parties au cours de périodes pluri-décennales va installer ou amplifier les processus de corrosion liés à la condensation dans ces parties de la grotte ou de la galerie (figure 9). Ces formes se rapprochent des coupoles d'origine phréatique que

l'on retrouve principalement dans les zones épinoyées des grottes. Si le processus de formation est identique - la corrosion de condensation - leur géométrie et leur disposition sont différentes (Bigot in Audra *et al.*, 2018). Les déjections forment des accumulations localisées de matière organiques, de dimensions parfois importantes (figure 8C). Avec la production de carbone, de sulfates et de nitrates au cours de leur dégradation, il va s'écouler des lixiviats acides qui s'accompagnent de corrosion et de dissolution des carbonates au sol et en pied de parois, des massifs de concrétions et la formation de minéralisations bien spécifiques (Audra *et al.*, 2019). Ces décompositions mettent en œuvre des processus bactériens et chimiques avec des dégazages qui se retrouvent emmenés en aérosols par les processus aérologiques en cours dans la galerie. Ceux-ci vont contribuer à les disperser dans le conduit et renforcent ainsi les processus de corrosion liés à la condensation qui s'exercent sur des portions de parois (figures 8 et 12).

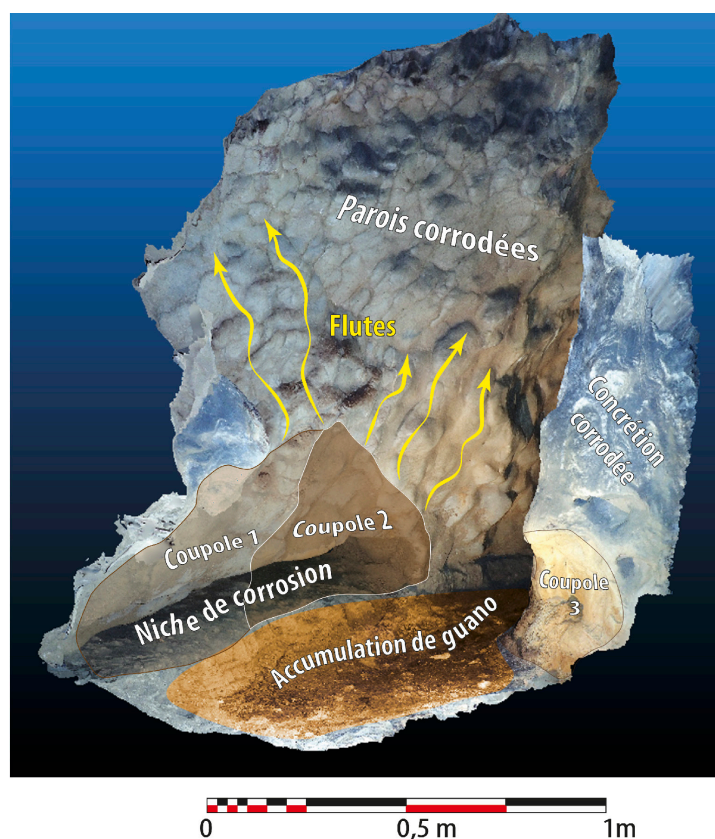


Figure 12 : grotte du Mas d'Azil. Impacts des processus de corrosion liés à la présence des chiroptères sur les parois des galeries et les massifs de concrétions. Actions des aérosols acides liés à la décomposition du guano sur les parois et les concrétions (cliché et infographie © Didier Cailhol).

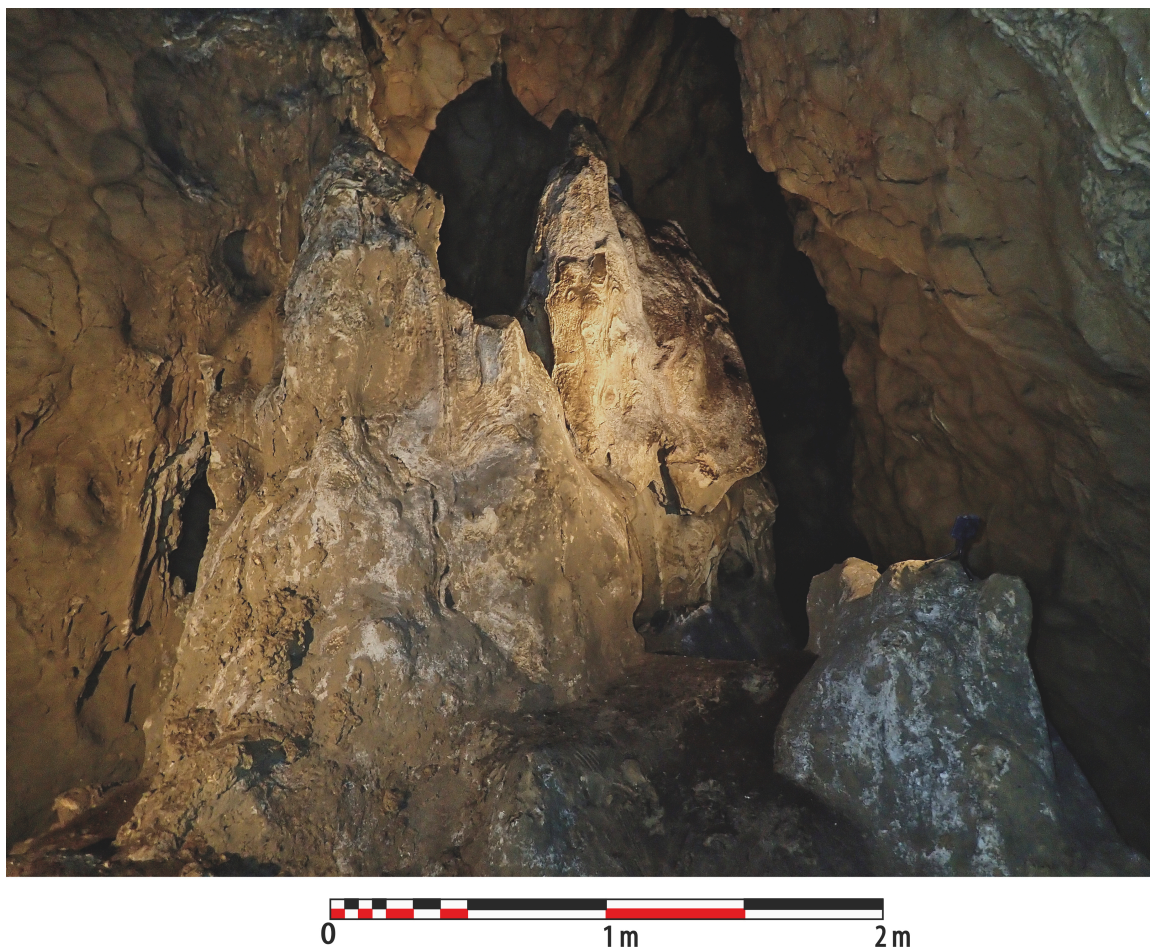


Figure 13 : grotte du Mas d'Azil. Impacts des processus de corrosion liés à la présence des chiroptères sur les parois des galeries et les massifs de concrétions. Corrosion et dissolution d'un massif de concrétions par les lixiviats et les dépôts de guano (cliché et infographie © Didier Cailhol).

Dans la salle Mandement et la salle des Conférences, les coupoles en place dans les plafonds témoignent de cette fréquentation par des colonies importantes. Les coupoles sont bien visibles dans la strate relativement horizontale qui forme la partie supérieure de la galerie. Elles se retrouvent également installées dans les fractures qui traversent la galerie où elles vont se surimposer à la forme initiale. Toutes sont marquées par des taches sombres avec, à l'aplomb, des restes minéralisés de guano bien visibles. Il s'agit de croûtes d'hydroxyapatite issues de la décomposition et la minéralisation des phosphates (Audra *et al.*, 2019). À l'échelle de la paroi, comme c'est le cas dans les salles supérieures du Guano et des Chauves-souris, la corrosion de condensation est importante malgré le relatif confinement de cette partie de la cavité. Les mesures de vitesse de courant d'air réalisées avec un anémomètre à fil ont montré à l'occasion de différentes campagnes, des valeurs relativement

faibles, comprises entre 0,02 et 0,08 m/s. La présence des chauves-souris influe directement sur l'installation de phénomènes de condensation sur les parois en faisant varier de quelques dixièmes de degrés la température de l'air. Dans un contexte d'humidité relative élevée, cette faible variation de température suffit à installer les conditions de condensation de la vapeur d'eau de l'air, sur certaines parties de la paroi. Avec les aérosols acides liés aux cycles biologiques des chiroptères et à la décomposition des tas de guano, la corrosion des parois calcaires se trouvent fortement activée par endroits. Des corrosions d'épaisseur millimétrique sont observées dans les parties médianes de la salle supérieure des Chauves-souris. Les calcaires présentent des surfaces avec une corrosion marquée qui fait ressortir les éléments sparitiques avec une structure cristalline plus résistante que les parties micritiques dissoutes et exportées en solution par le film d'eau (figures 14 à 17).



Figure 14 : état des parois dans la galerie des Chauves-Souris. Encrouement de calcite formé à partir des films d'eau issus de la condensation (cliché © Didier Cailhol).



Figure 15 : état des parois dans la galerie des Chauves-Souris. Corrosion de la paroi calcaire et des voiles de calcite sous l'action de la condensation. L'hydroxyapatite insoluble reste en surépaisseur et se détache du calcaire en cours de dissolution (cliché © Didier Cailhol).



Figure 16 : état des parois dans la galerie des Chauves-Souris. Voile de calcite qui vient en recouvrement sur un placage d'un reste de remplissage fluvial (cliché © Didier Cailhol).



Figure 17 : état des parois dans la galerie des Chauves-Souris. Corrosion d'un pendant de la paroi. Les structures sparitiques du calcaire ont une moindre dissolution que la calcite. L'accroche des chauves-souris sur la paroi provoque également une érosion mécanique (cliché © Didier Cailhol).

Lors de son écoulement sur la paroi le film d'eau voit son épaisseur varier en fonction du relief et la rugosité des états de surface. Ces variations vont entraîner des modifications de la pression partielle dans le film et le dégazage du CO₂. Ce changement de l'équilibre chimique conduit à la précipitation des carbonates sous forme de fins dépôts de calcite et des petites concrétions. Lorsque les processus liés à la condensation se font sur des surfaces plus importantes, il se forme alors des voiles de calcite et des concrétions dans les parties basses ou en encorbellement des zones affectées par le ruissellement des films d'eau (figure 18). Le concrétionnement peut être important avec des croûtes de calcite d'épaisseur centimétrique et des densités assez fortes de stalactites dont la taille peut être décimétrique. Cet encroûtement présente une faible cohérence avec la paroi. Les dépôts de guano ou l'altération du calcaire qui en découle ne permettent pas une bonne accroche de la calcite. Avec les biofilms présents, des altérations peuvent également se produire sous l'action des bactéries (figure 18). Des dépôts laiteux et gluants se forment alors (Pfendler *et al.* 2017).

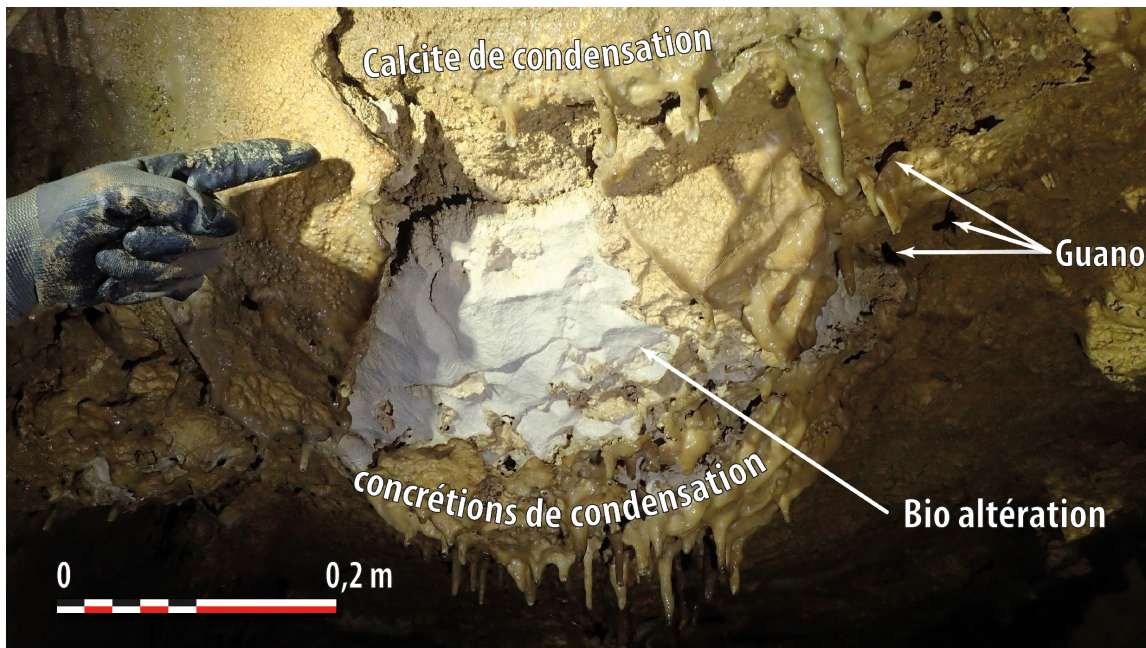


Figure 18 : vue des concrétions et des voiles de calcite liés au processus de corrosion liés à la condensation et aux ruissellements des films d'eau qui en découlent dans la salle supérieure du Guano. La matière organique issue du guano et les processus bactériens associés entraînent des formations de bio altération (cliché © Didier Cailhol).

Conclusion

La morphologie des galeries dans les grottes est le résultat des interactions entre le contexte géologique et les évolutions environnementales de la région en fonction des changements climatiques. Celles-ci se trouvent enregistrées dans les formes, tailles et textures des parois et des remplissages du fait des niveaux d'intensité des processus qui ont contribué à la création et à leur évolution. Les phénomènes physico-chimiques et les interactions biologiques vont évoluer en fonction des niveaux d'énergie qui vont interagir avec le contexte géologique local et régional, la géométrie et la taille du système spéléologique et le développement du système karstique. L'étude de ces phénomènes est nécessaire pour comprendre les dynamiques d'installation et d'évolution de la grotte tant dans le contexte du massif qu'au niveau de la galerie ou de la paroi. Une approche holistique permet d'identifier et de quantifier les processus en jeu, leur niveau d'intensité et les conséquences sur les différents éléments ou structures de la grotte. À partir du suivi et de l'enregistrement en continu, parfois à haute résolution, de données concernant l'aérogologie, l'hydrologie, la biologie et la microbiologie, il est alors possible de mettre en évidence les différentes phases d'évolution de la grotte et plus particulièrement ce qui relève de processus comme la corrosion de condensation, les changements environnementaux ou de la pression anthropique qui se sont exercés ou qui sont en cours dans les différentes parties du réseau spéléologique. Ainsi, la présence de colonies de Chiroptères, dans des situations de transit ou de mise-bas et d'élevage des juvéniles, a une incidence sur les morphologies pariétales. Les dynamiques aérogologiques qui en découlent génèrent des processus de corrosion de condensation. Associée aux fluides acides liés à la décomposition et la minéralisation du guano, la corrosion de condensation contribue au retrait des parois et à l'enrichissement chimique des sols en divers minéraux. L'impact lié à la présence de colonies de chiroptères, comme au Mas d'Azil, est un facteur important à prendre en compte pour l'étude des grottes archéologiques, la conservation des vestiges et justifie la mise en œuvre de méthodologies spécifiques et adaptées pour les études du contexte archéologique à partir d'un nouveau prisme pour l'interprétation génétique des morphologies pariétales mais aussi l'interprétation des grottes ornées avec pour les archéologues, une meilleure compréhension des pratiques artistiques des hommes du Paléolithique. En l'occurrence, notre étude de la grotte du Mas d'Azil abouti à la conclusion selon laquelle le caractère « caché » ou « périphérique » des témoignages pariétaux recensés dans ses parties profondes (à l'exemple de la modeste Galerie du Masque débouchant dans la Salle Mandement), est peut-être le fait d'une conservation différentielle explicable par les processus que nous avons décrits.

Bibliographie

ALTRINGHAM J.D., FENTTON M.B., 2003. Sensory Ecology and Communication in the Chiroptera. In: Kunz TH, Fenton MB, editors. *Bat Ecology*. The University of Chicago Press. pp. 90–127.

AUDRA P., BARRIQUAND L., BIGOT J.-Y., CAILHOL D., CAILLAUD H., VANARA N., NOBÉCOURT J.-C., 2018 - L'impact méconnu des chauves-souris et du guano dans l'évolution morphologique des cavernes. *Karstologia*, 68, 2016 : 1-20.

AUDRA P., BOSÁK P., GÁZQUEZ F., CAILHOL D., SKÁLA R., LENKA L., JONÁŠOVÁ Š., FRUMKIN A., KNEZ M., SLABE T., ZUPAN-HAJNA N., AL-FARRAJ AL-KITBI A., 2017. Bat urea minerals in arid environment. New cave mineral (Allantoin) from Kahf Kharrat Najem Cave, United Arab Emirates. *International Journal of Speleology*, vol. 46, n° 1, p. 81-92. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.46.1.2001>

AUDRA P., DE WAELE J., BENTALEB I., CHROŇÁKOVÁ A., KRIŠTŮFEK 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., SANZ-ARRANZ 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>

BAKER J.R., 1967. A review of the role played by the Hippoboscidae (Diptera) as vectors of endoparasites. *Journal of Parasitology*, 53 : 412-418.

BEAUCOURNU J.C., BEAUCOURNU-SAGUEZ F., GUIGUEN C., 1985. Nouvelles données sur les Diptères pupipares (Hippoboscidae et Streblidae) de la sous-région Méditerranéenne occidentale. *Annales de Parasitologie humaine comparée*, 60 : 311-327.

BEAUCOURNU J.-C., NOBLET J.-F., 1996. Les diptères pupipares parasites de chauves-souris dans les Alpes et les Préalpes françaises (Diptera, Streblidae et Nycteribiidae). *Bulletin de la Société entomologique de France*, tome 101 (3), p. 235-240. https://www.persee.fr/doc/bsef_0037-928x_1996_num_101_3_17245

BIGOT J.-Y., 2014. La corrosion pariétale des grottes par les aérosols d'origine animale. *Actes de la 23ème Rencontre d'Octobre - Le Châtelard 2013*, p. 14 – 21.

BRUXELLES L., JARRY M., BON F., CAILHOL D., DANDURAND G., PALLIER C., 2018. La biocorrosion, un nouveau paramètre à prendre en compte pour interpréter la répartition des œuvres pariétales. *Karstologia* n° 68, 2016: 21-30. hal-01838098

BROOKE A.P., DECKER D.M., 1996. Lipid compounds in secretions of fishing bat, *Noctilio leporinus*. *Journal of Chemical Ecology* (1996) 22: 1411. <https://doi.org/10.1007/BF02027721>

BRUXELLES L., 2019. L'apport des travaux de Paul Ambert dans la connaissance de l'évolution géodynamique du Languedoc et l'émergence de la géoarchéologie. In : « Actes du colloque international en Hommage à Paul Ambert, Paysages pour l'Homme » sous la direction de M. Laroche, L. Bruxelles, P. Galant et M. Ambert. P. 62-69.

CAILHOL D., VANARA N., 2018. Étude des processus de condensation corrosion et de biocorrosion dans la grotte d'Espalungue, karst de la vallée d'Ossau. In : *Projet Collectif de Recherches, Préhistoire ancienne de la Vallée d'Ossau, grotte d'Espalungue, rapport 2018*, p. 4-9.

COVINGTON M.-D., PERNE M., 2015. Consider a cylindrical cave: A physicist's view of cave and karst science. *Acta Carsologica* 44/3, 363–380, Postojna 2015

D'ANGELI I., SANTAGATA T., TOGNINI P., FOIANINI I., AUDRA P., CAILHOL D., VALME J., MILLER A., SAIZ-JIMENEZ C., DE WAELE J., 2018. Late-stage condensation-corrosion in high mountain marble cave (Val di Scerscen, Bernina Massif, Valtellina, Italy). *EGU 2018, Vienna*.

DIETZ C. et KIEFFER A., 2015. Chauves-souris d'Europe, connaître, identifier, protéger. Guide Delachaux et Niestlé, Paris, 399 p.

DUVAL M., 2010. Réflexions introductives : À la recherche de l'acceptation sociale. Entre conflits, processus participatifs et enjeux territoriaux dans les espaces protégés. Coordinateurs : Lionel Laslaz, Christophe Gauchon, Mélanie Duval-Massaloux et Stéphane Héritier. Espaces protégés, acceptation sociale et conflits environnementaux, Collection EDYTEM, pp.9-19, 2010, Collection Edytem n°10, 978-2-918435-02-0. halsde-00504980

DUVALLET G., BALDACCHINO F., 2017. Hippoboscidae, Nycteribiidae et Streblidae (Diptera). In : Entomologie médicale et vétérinaire sous la direction de Vincent Robert, IRD Edition. Chap. 3. pp : 405-411.

GABROVŠEK F., DREYBRODT W., PERNE M., 2010. Physics of Condensation Corrosion in Caves. In: Andreo B., Carrasco F., Durán J., LaMoreaux J. (eds) Advances in Research in Karst Media. Environmental Earth Sciences. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 91-96.

KING-WEBSTER W.A., KENNY J.S., 1958. Bat erosion as a factor in cave formation. Nature 181, 1813.

LUNDBERG J., McFARLANE D.A., 2009. Bats and bell holes: The microclimatic impact of bat roosting, using a case study from Runaway Bay Caves, Jamaica, Geomorphology, Volume 106, Issues 1-2, 1 May 2009, Pages 78-85, ISSN 0169-555X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.09.022>.

PALLIER C., JARRY M., BON F., CAMUS H., RABANIT M. et BRUXELLES, L., 2018 - Évolution karstique et occupations humaines de la grotte du Mas-d'Azil (Ariège, France) ; Karstologia, n° 68, 2016. hal-01871475

PFENDLER S., EINHORN O., KARIMI B., BOUSTA F., CAILHOL D., ALAOUI-SOSSÉ L., ALAOUI-SOSSÉ B., ALEYA L., 2017. UV-C as an efficient means to combat biofilm formation in show caves: evidence from the La Glacière Cave (France) and laboratory experiments. Environ Sci Pollut Res 24:24611-24623. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0143-7>

QUEFFELEC A., BERTRAN P., BOS T., LEMÉE L., 2017. Mineralogical and organic study of bat and chough guano: implications for guano identification in ancient context. Journal of Cave and Karst Studies, v. 80, no. 2, p. 1-17. DOI: 10.4311/2017ES0102