



**HAL**  
open science

## 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

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

### ► To cite this version:

Laurent Bruxelles, Marc Jarry, Jean-Yves Bigot, François Bon, Didier Cailhol, 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*, 2016. hal-01838098

**HAL Id: hal-01838098**

**<https://hal.science/hal-01838098>**

Submitted on 24 Jul 2018

**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.

Public Domain

Laurent BRUXELLES<sup>1,2,3</sup>,  
Marc JARRY<sup>1,4</sup>,  
Jean-Yves BIGOT<sup>5</sup>,  
François BON<sup>4,6</sup>,  
Didier CAILHOL<sup>1,7</sup>,  
Grégory DANDURAND<sup>1,4</sup>  
et Céline PALLIER<sup>1,4</sup>

(1) INRAP, 13 rue du Négoce,  
F-31650 Saint-Orens-de-Gameville;  
laurent.bruxelles@inrap.fr, marc.  
jarry@inrap.fr, didier.cailhol@inrap.fr,  
gregory.dandurand@inrap.fr,  
celine.pallier@inrap.fr

(2) Institut Français d'Afrique du Sud,  
USR 3336

(3) GAES, Université du Witwatersrand  
(Johannesburg), 62 Juta Street,  
Braamfontein, 2191 Johannesburg,  
Afrique du Sud

(4) TRACES, UMR 5608 du CNRS

(5) Association Française de Karstologie  
(AFK), 21 rue des Hospices, F-34090  
Montpellier, jeanbigot536@gmail.com

(6) Centre de recherche français à  
Jérusalem, UMIFRE 7 CNRS-MEAE,  
bon@univ-tlse2.fr

(7) Edytem UMR 5204 du CNRS

# 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

**RÉSUMÉ :** Des observations récentes montrent que les chauves-souris ont un impact important sur les morphologies pariétales de très nombreuses grottes dans le monde. L'état de surface et les formes associées attestent de la fréquence et de l'ampleur du phénomène de biocorrosion, les parois ayant pu reculer par dissolution de quelques millimètres à plusieurs décimètres voire mètres. Si ces retouches post-karstogéniques impliquent une révision de certains processus invoqués dans le creusement ou la réutilisation de conduits karstiques, elles ont également des conséquences sur l'art pariétal en grotte. Ainsi, il est envisageable que dans les cavités où vivent des colonies de chauves-souris, les œuvres d'art, qu'elles soient peintes ou gravées, ont disparu avec la dissolution de leur support. En fonction de la géométrie, de la morphologie et de l'aérogénie d'une cavité, ses parois ont pu être affectées par l'altération et notamment la biocorrosion. Il en résulte une répartition de l'art pariétal visible qui n'est pas uniquement due au choix des hommes préhistoriques mais aussi à un processus taphonomique. Ce processus peut affecter les zones profondes de grottes, habituellement

les mieux protégées : il devient donc important de savoir en identifier les stigmates et d'en évaluer l'ampleur avant d'interpréter la répartition spatiale de l'art pariétal d'une grotte. La grotte du Mas d'Azil (Ariège) présente une véritable opposition entre les parties ornées, où l'on observe encore les formes de creusement initiales, et celles sans art, où les formes de biocorrosion sont manifestes.

**MOTS-CLÉS :** Grotte ornée, chauves-souris, biocorrosion, taphonomie des parois, grotte du Mas d'Azil

**ABSTRACT :** *BIOCORROSION, A NEW PARAMETER TO TAKE INTO ACCOUNT WHEN INTERPRETING THE DISTRIBUTION OF ROCK PAINTINGS. THE EXAMPLE OF THE MAS D'AZIL CAVE IN ARIÈGE (FRANCE). Recent studies in several caves show that bats have had a significant impact on the walls and the roof of many caves in the world. These forms, unknown until recent years, show the importance of the phenomenon of biocorrosion, as the walls retreated by dissolution from a few millimeters to several decimeters or even meters. Although this post-karstogenetic weathering implies a revision of some processes invoked in*

*the development or the reuse of karstic conduits, it also has consequences on rock art. One can imagine that the areas where colonies of bats lived have been subjected to this process. In consequence, the fragile rock art, whether painted or engraved, have disappeared with the dissolution of their support. Thus, depending on the morphology of the cavity but also on the aerology, sections of caves or parts of walls could be affected by biocorrosion. The result is a distribution of art intimately linked to a taphonomy process, even in the deepest parts of caves, usually the best preserved from walls degradations. It is therefore important to be able to recognize this phenomenon and to evaluate its extent in order to make an unbiased interpretation of the global distribution of rock art in a cave. The Mas d'Azil (Ariège) Cave presents a strong opposition between the decorated parts, where we still observe the initial karstogenetic features on cave walls, and those without rock art, where biocorrosion evidences are visible.*

**KEY WORDS :** Cave painting, bats, biocorrosion, wall taphonomy, Mas d'Azil Cave.

## Introduction

Exceptionnelle par ses dimensions et son empreinte dans le paysage, la grotte ariégeoise du Mas d'Azil, dans les Petites Pyrénées (figure 1), est un site capital de la Préhistoire européenne.

Sans omettre ses riches occurrences de fréquentations néolithiques et protohistoriques, ce gisement archéologique fouillé depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, éponyme de l'Azilien [Piette, 1889 et 1895], est également une référence majeure pour le

Magdalénien, notamment pour la structuration de sa phase moyenne [Delporte, 1979]. Pendant près d'un demi-siècle, les fouilles successives, au premier rang desquelles celles de Piette à la fin des années 1880, ont permis de réunir l'une

des plus remarquables collections archéologiques, notamment d'art mobilier, pour le Magdalénien européen [e.g., Piette 1907; Péquart et Péquart 1960, 1961a et 1961b; Clottes et al. 1981; Schwab 2008]. L'Aurignacien y est à présent également bien confirmé, permettant une révision des dynamiques d'occupation du paysage à l'aube du Dernier Maximum Glaciaire [Jarry et al., 2017]. Plusieurs parties de la grotte sont ornées de gravures et de peintures, attribuées pour l'essentiel au Magdalénien. Quelques indices d'un art plus ancien avaient également été identifiés dans le secteur A de la galerie Breuil (cf. *infra*), dont l'attribution doit tenir compte de l'histoire complexe des phases de colmatage et de vidange de la cavité : leur rattachement à l'Aurignacien, parfois évoqué, paraît ainsi devoir être écarté [Jarry et al., 2017; Pallier et al., à paraître, a et b].

À la suite d'opérations d'archéologie préventive liées au réaménagement touristique du site, un programme

pluridisciplinaire est en cours depuis 2013 qui proposera, à terme, une cartographie géologique et archéologique de la grotte, basée sur une topographie révisée, ainsi qu'une étude géoarchéologique complète du monument [Jarry, 2014 et 2015]. Parmi les différentes approches menées au cours de ces recherches, un réexamen récent de l'état des parois de la cavité a permis de mettre en évidence l'impact de la biocorrosion dans certaines parties de la grotte. Compte tenu de l'importance des modifications des parois en lien avec la présence de colonies de chauve-souris, on peut alors se poser la question de la préservation d'éventuelles œuvres pariétales dans ces galeries.

Cet article propose une étude comparative des morphologies de parois entre les parties ornées et les galeries ne contenant pas ou plus d'art pariétal. Il se base essentiellement sur des observations de terrain réalisées en 2017. D'autres études complémentaires, notamment aérologiques et microclimatiques sont en

cours mais leur exploitation requiert des enregistrements sur au moins une année. Ces travaux doivent également prendre en compte les importantes modifications morphologiques qu'a subies la grotte au cours de ses différents aménagements depuis plus d'un siècle, et sont complétés par une étude des archives.

## I. Présentation du contexte géologique et géomorphologique

La zone sous-pyrénéenne, dont fait partie le massif du Plantaurel, est principalement constituée de grès, marnes et calcaires, plissés lors de l'orogénèse pyrénéenne en une série de synclinaux et anticlinaux d'orientation globale est-ouest. Cette structure a conditionné l'organisation du réseau hydrographique. Les cours d'eau se sont encaissés dans les terrains les plus tendres et ont recoupé en cluse les parties calcaires plus compétentes. C'est le cas de l'Arize, qui s'est enfoncée dans les grès et les marnes du Maastrichtien supérieur, puis qui a recoupé l'extrémité du synclinal de Lézères-Pradals constitué de calcaires lithographiques du Paléocène (figure 1). La rivière a d'abord creusé son lit au niveau du col du Baudet, 40 m au-dessus du porche actuel. Au cours de son incision, elle a été progressivement absorbée par une série de pertes dans les calcaires marins à polypiers du Thanétien supérieur, avant de résurger quelques centaines de mètres plus au nord. Cette percée hydrogéologique correspond à une auto-capture souterraine de l'Arize qui a ainsi creusé la galerie principale encore actuellement empruntée par la rivière [Pallier et al., à paraître a et b].

Cette galerie est longue de 420 m et large de 30 m en moyenne. Le réseau est constitué de vastes salles (du Théâtre, du Temple et Mandement) reliées entre elles par des conduits plus étroits (galeries des Silex et des Ours par exemple). Elles correspondent à des boucles de recouplement de méandres qui se sont développées dans un second temps, en rive droite de la galerie principale (figure 2). Ce réseau, guidé par la structure synclinale, s'élève progressivement en direction de l'est. Cette structuration étagée est acquise par la succession de stades de colmatage et de vidange de la grotte, enregistrés dans l'ensemble du réseau au cours du Pléistocène.

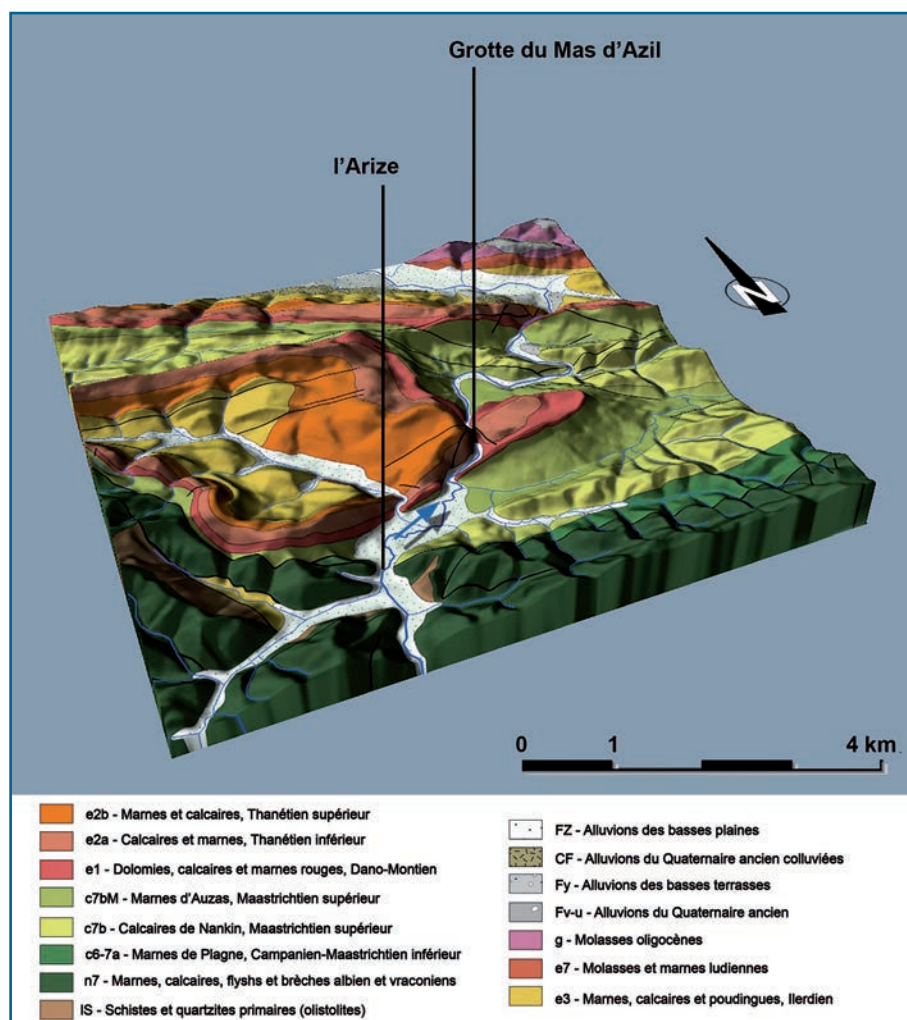


Figure 1 : Contexte géologique de la grotte du Mas d'Azil [d'après Bilotte et al., 1988].  
Geological context of the Mas d'Azil Cave [after Bilotte et al., 1988].

## II. L'art du Mas d'Azil, présentation et répartition

L'art pariétal paléolithique de la grotte du Mas d'Azil est discret, bien que les manifestations y soient assez nombreuses, soit plus d'une centaine d'unités graphiques. En l'état actuel des connaissances, les expressions pariétales ne sont présentes que dans quatre secteurs dispersés sur la rive droite, plus précisément dans de petits espaces confinés, à l'écart des grandes galeries principales [Breuil 1903; Bégouën et Breuil 1912-1913; Leroi-Gourhan 1971; Alteirac et Vialou 1980 et 1984; Vialou 1986; Le Guillou 2017] (figure 2).

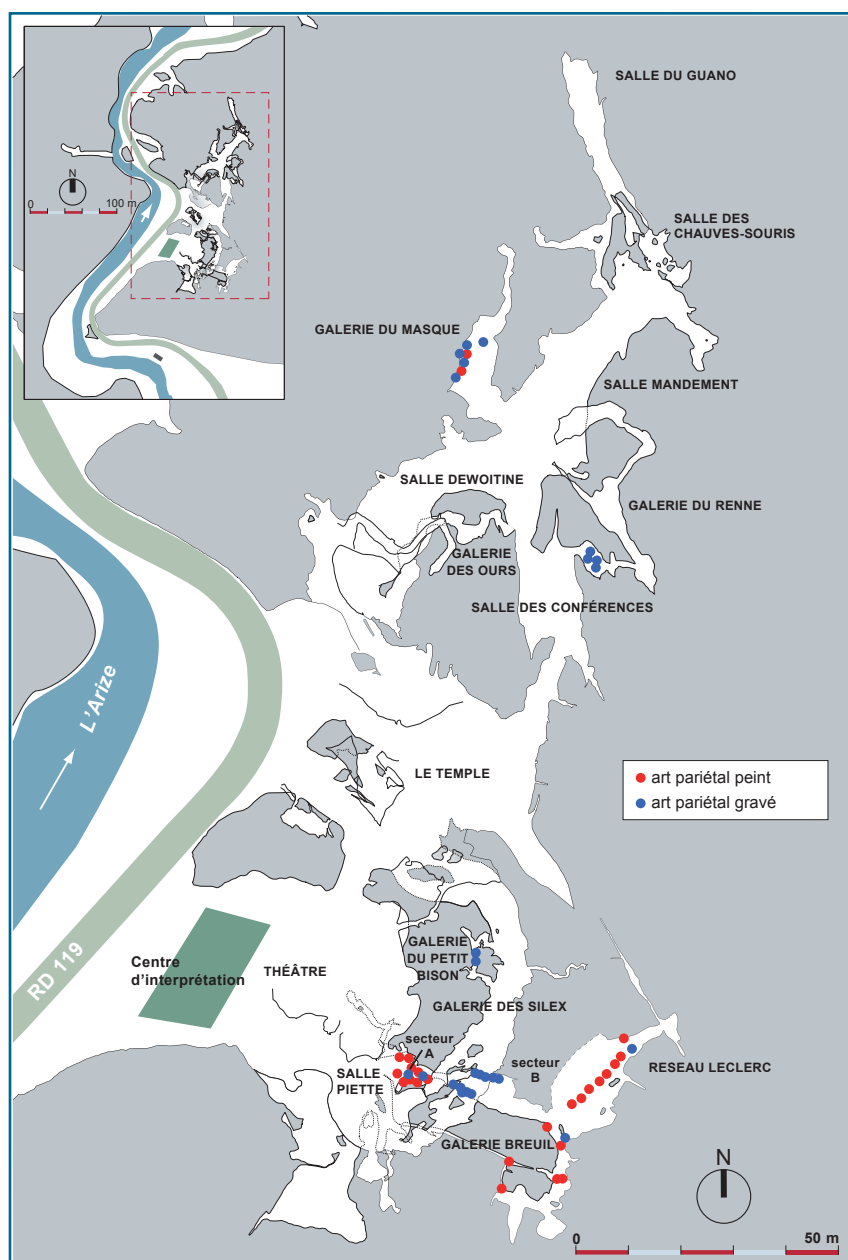
**La galerie Breuil** compte le plus important ensemble d'œuvres de la grotte. La première salle, dite « secteur A » [dénomination des secteurs in Alteirac & Vialou 1980], n'est en fait qu'un recoin de la salle Piette. Ce secteur A, dont l'entrée était obstruée par des brèches et des cailloutis mis en place au cours du Magdalénien, porte sur ses parois de nombreuses peintures rouges, plus rarement noires, ainsi que quelques gravures : points, traits, taches, mais aussi, parmi un lot d'animaux indéterminés : un bison, un cervidé et deux chevaux. Assez estompées (cf. *infra*), elles diffèrent nettement, stylistiquement et techniquement, des œuvres du reste de la galerie Breuil et correspondent sans nul doute à une expression artistique antérieure au Magdalénien. Nos récents travaux [Jarry et al. 2017 et à paraître; Pallier et al. à paraître, a et b] démontrent qu'elles ne peuvent être rattachées à l'Aurignacien puisque nous savons désormais qu'un ennoisement de la cavité lié à une phase d'alluvionnement majeure succède aux niveaux d'occupation de cette période [op. cit.]. En attente d'analyses complémentaires, cette ornementation appartient donc à une fourchette temporelle très large, située entre le Gravettien et le Magdalénien moyen. Après avoir franchi un bouchon sédimentaire désobstrué au XX<sup>e</sup> siècle (figure 2) dans un remplissage pléistocène, on accède au « secteur B » de la galerie Breuil. En avançant vers le fond, on trouve d'abord à main droite les gravures de cinq bisons puis, en face, un poisson gravé, un bison gravé et peint [Alteirac et Vialou, 1980 et 1984]. Les figures suivantes sont un félin peint et gravé avec au plafond une tête de bison noir. Viennent ensuite, du côté du réseau Leclerc, des points rouges au plafond et sur les parois, un cerf noir et deux poissons gravés. Puis sont figurés un masque humain et deux sexes mâles, un oiseau, un ensemble de traits gravés et, pour terminer, deux chevaux gravés. Au sud, la galerie Breuil se prolonge, après un secteur aux parois rouges d'ocre, par d'étroits laminoirs et galeries, pour déboucher en hauteur sur la salle Piette.

Il s'agit de l'entrée initiale de cet ensemble [Jarry et al. à paraître].

Dans les parties supérieures du réseau, plusieurs secteurs, plus limités, ont également livré des témoignages pariétaux. Ainsi, **la galerie du Petit Bison** démarre à partir de la galerie des Silex, initialement presque entièrement obstruée de limons. Elle est constituée d'un petit diverticule à deux entrées très étroites. Il contient une gravure de bison et quelques signes gravés.

**La galerie du Renne** débouche latéralement dans la salle des Conférences et relie, par un passage supérieur, la salle Mandement. La partie ornée se situe tout près de la salle des Conférences, à l'entrée du diverticule, la suite de la galerie étant initialement obstruée par des gours jusqu'à sa désobstruction par Mandement au XX<sup>e</sup> siècle. La salle ornée était, elle aussi, en grande partie comblée par des gours, vrai-

Figure 2: Plan de la grotte du Mas d'Azil. Localisation des œuvres pariétales paléolithiques [d'après les archives DRAC Occitanie / F. Rouzaud et Y. Le Guillou, X. Leclerc, Spéleo-club de l'Arize, complétées d'après M. Jarry et al. 2015 et levés V. Arrighi/Inrap 2016. Map of Mas d'Azil Cave showing the location of the main rock art occurrences [after DRAC Occitanie archives / F. Rouzaud et Y. Le Guillou, X. Leclerc, Arize Caving Club, completed in Jarry et al., 2015 and the mapping of V. Arrighi/Inrap 2016.





semblablement antérieurs aux ornements. L'espace disponible était donc très restreint et l'accès devait se faire en rampant. Les œuvres, gravées, sont uniquement au plafond. Il peut être distingué, parmi un ensemble complexe de tracés, un cheval et un bison.

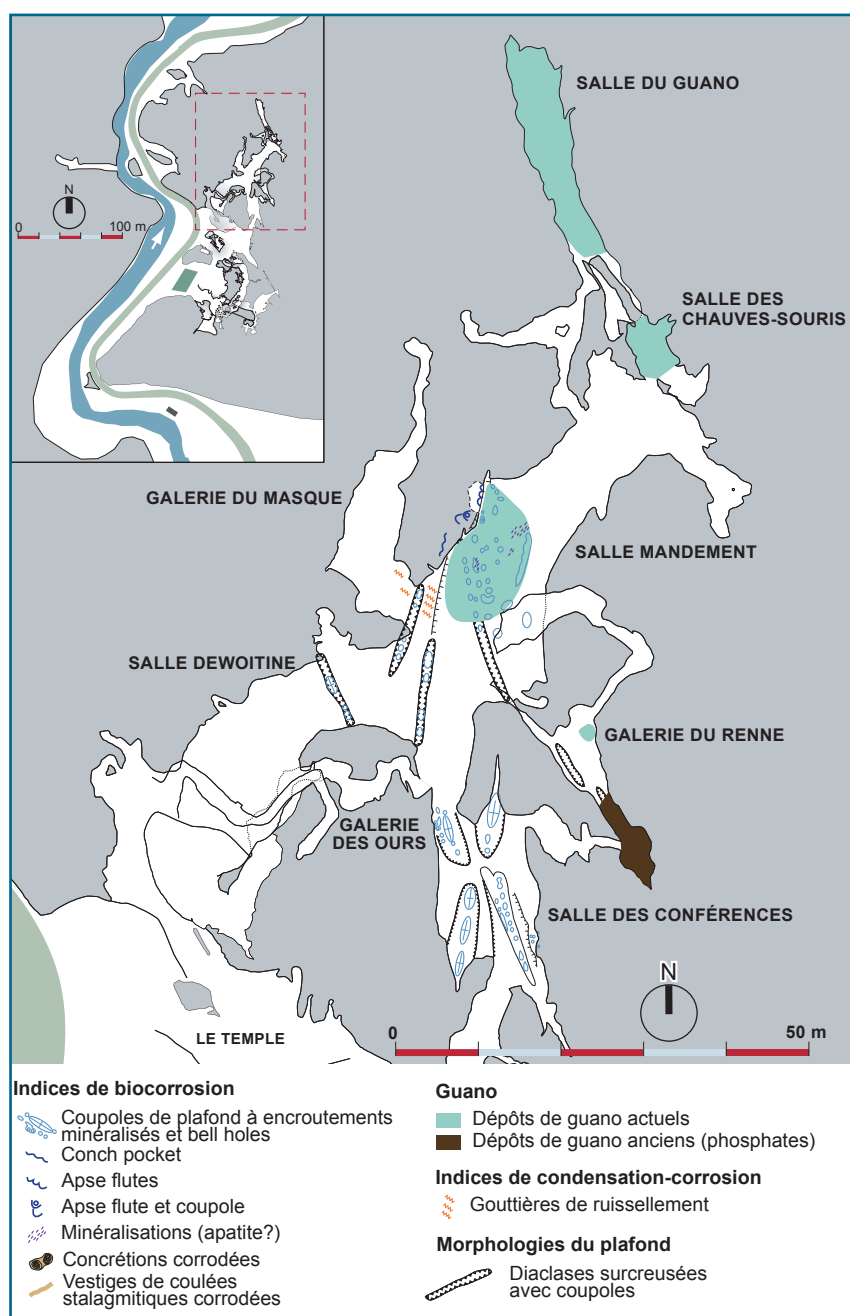
**La galerie du Masque** est un conduit bas, large de plusieurs mètres, débouchant sur la salle Mandement (figure 2). L'accès initial à cette petite galerie est difficile à restituer avec précision, mais il aurait pu être plus étroit, avant l'évacuation des sédiments de la salle Mandement. L'extrémité de cette galerie, au-delà du secteur orné, était également entièrement colmatée par des limons fluviatiles mis en place avant le Magdalénien (désobstruction XX<sup>e</sup> siècle). À gauche, sur la paroi, sont visibles entre autres gravures indéterminées : un profil

humain, un signe gravé et un arrière-train de cheval. Au plafond est gravée une tête de bouquetin. Ces gravures peuvent être assez marquées. Quelques impacts de couleur rouge sont présents.

### III. Les formes de corrosion identifiées : caractérisation et répartition

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-quadernaires de la grotte et de son environnement. Une observation plus fine des paysages souterrains et des morphologies des voûtes et parois permet de préciser les phases récentes d'évolution des galeries en lien avec des dynamiques climatologiques et biologiques. En effet, le rôle des processus liés à la condensation-corrosion [Gabrovšek *et al.*, 2010] et à la biocorrosion [Bigot, 2014] du fait de la présence de colonies de chiroptères, doit être envisagé pour appréhender l'évolution de certaines parties de la cavité, notamment au cours de l'Holocène (figure 3). La principale difficulté est de distinguer l'origine des formes entre morphologies de creusement noyées, traces de condensation-corrosion et indices de biocorrosion. Ainsi, la biocorrosion modèle des formes qui ont longtemps été interprétées comme des morphologies noyées et/ou épinoyées. Pour une description détaillée, nous renvoyons les lecteurs à une série de travaux [King-Webster et Kenny, 1958; Wilford, 1966; Dwyer et Hamilton-Smith, 1975; Butler, 1995; Tarhule-Lips and Ford, 1998a et b; Miller, 2006; Ford and Williams, 2007; Bigot, 2014; Bigot et Guyot, 2014; Caillaud, 2017]. Deux articles récents proposent une typologie des figures et des morphologies liées à la corrosion par les chiroptères. Ainsi, J. Lundberg et D.A McFarlane [2012] distinguent deux types de morphologies : les formes « subaériennes » en lien avec les mouvements ascendants de convection thermique et de condensation-corrosion ainsi que celles développées par crypto-corrosion, sous le dépôt de guano (lapiaz, encoches et encorbellements). Ph. Audra *et al.* [2017a], quant à eux, ont différencié quatre classes morphosédimentaires : les formes liées à la nidification des chauves-souris (*bell holes and cupolas*), les différents dépôts et minéralisations formés par les déjections des chauves-souris (*excretas and urine marks and trickles, phosphate and apatite crust*), les formes liées à la crypto-corrosion sous guano (*pinacles, pedestal, karrens...*) et celles mises

Figure 3: Carte de répartition des indices de condensation-corrosion et de biocorrosion dans la partie nord de la grotte du Mas d'Azil.  
Map location of the occurrences of condensation-corrosion and biocorrosion in northern part of the Mas d'Azil Cave.



en place par les phénomènes de condensation-corrosion (*smoothed walls and ceiling, wall and pilar niches and channels...*). C'est cette dernière nomenclature que nous utiliserons dans cet article.

Dans la grotte du Mas d'Azil, les formes pariétales liées à la spéléogénèse, comme les coups de gouge, indicateurs de vitesse d'écoulement de l'eau, ou encore des lapiés de voûte, dus à la présence de remplissages, se retrouvent dans différentes parties du réseau [Ramis *et al.*, 2016]. D'autres morphologies, telles que les coupoles de plafond et les larges cupules ou surfaces lisses, recouvrent des zones qui avaient préalablement enregistré le fonctionnement hydrogéologique du système spéléologique. Ces dernières morphologies, qui viennent en surimposition des précédentes, sont liées aux phénomènes de condensation-corrosion, bien connus dans les cavités dites hypogènes. Toutefois, ces phénomènes affectent également les grottes épigènes, au sens de Klimchouk [2007] et Audra [2007], dès lors que les conduits, dits « fossiles », largement ouverts à l'extérieur, se trouvent exposés aux variations climatiques (températures) et aux incursions animales (chauves-souris). Les morphologies liées à la condensation-corrosion se superposent alors à celles du creusement initial qu'elles effacent partiellement ou en totalité.



#### A. Les phénomènes de condensation-corrosion (sans biocorrosion apparente)

Juste avant l'entrée de la galerie Breuil, dans le secteur A (figure 3), les formes de corrosion spéléogéniques (coups de gouge) sont relativement fréquentes, aussi bien sur les parois qu'à la voûte. Cependant, en certains points, ces morphologies sont très effacées, justement là où les dessins préhistoriques

Figure 4: Entrée de la galerie Breuil (secteur A), avant le bouchon sédimentaire pléistocène désobstrué. Ici, on observe une diffusion des pigments des peintures anciennes et des graffitis plus récents. Aujourd'hui encore, cette partie de la cavité est soumise à une importante condensation.

Cliché : J.-Y. Bigot/AFK.

*Entrance of the Breuil gallery (sector A), just before the passage opened in the Pleistocene sediments. Here, the paintings are more diffuse. Even today, this part of the cave is the place of an important condensation process (photo J.-Y. Bigot/AFK).*

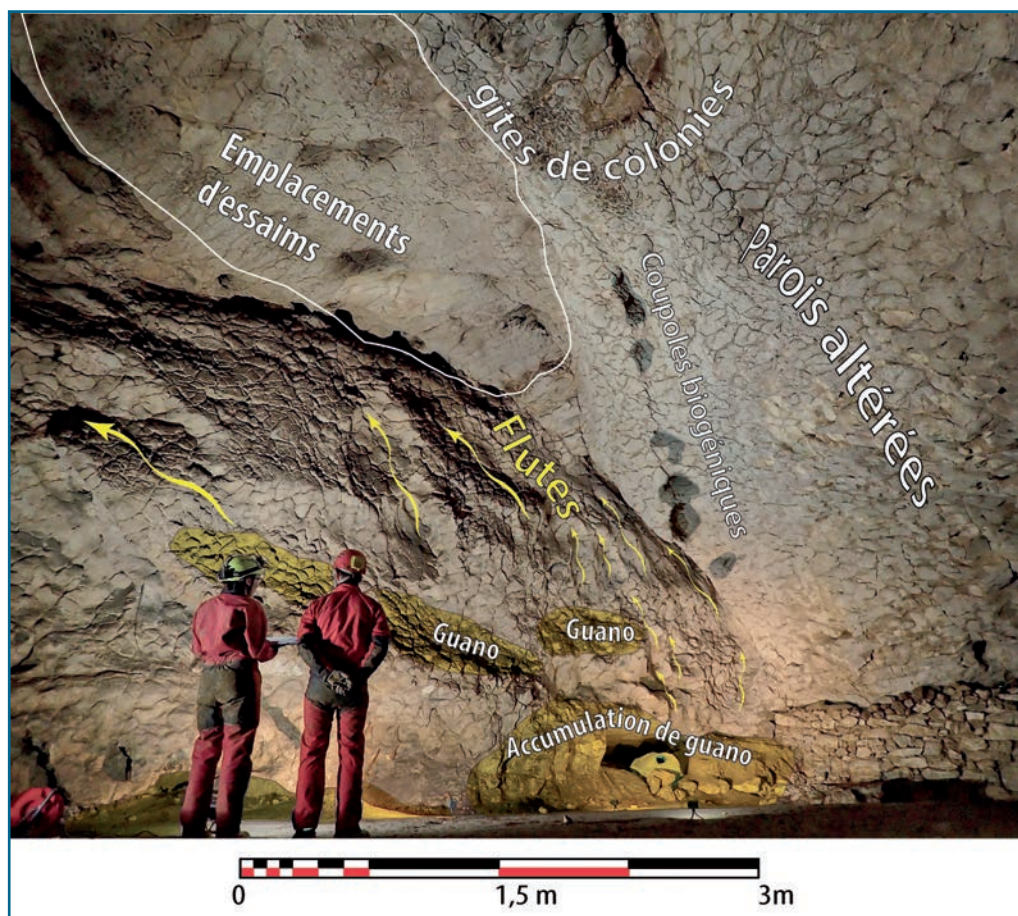


Figure 5: Formes de biocorrosion liées aux chiroptères et identifiées sur la paroi nord-ouest de la salle Mandement (cliché et infographie D. Cailhol/Inrap). C'est l'association de ces formes et leur organisation dans l'espace qui permettent également de les distinguer des autres processus morphogénétiques. *Biocorrosion features due to bats on the western wall of the Mandement chamber (photo and infography D. Cailhol). The combination of these features and their organization permit to recognize a biocorrosion origin, instead of other morphogenetic processes.*



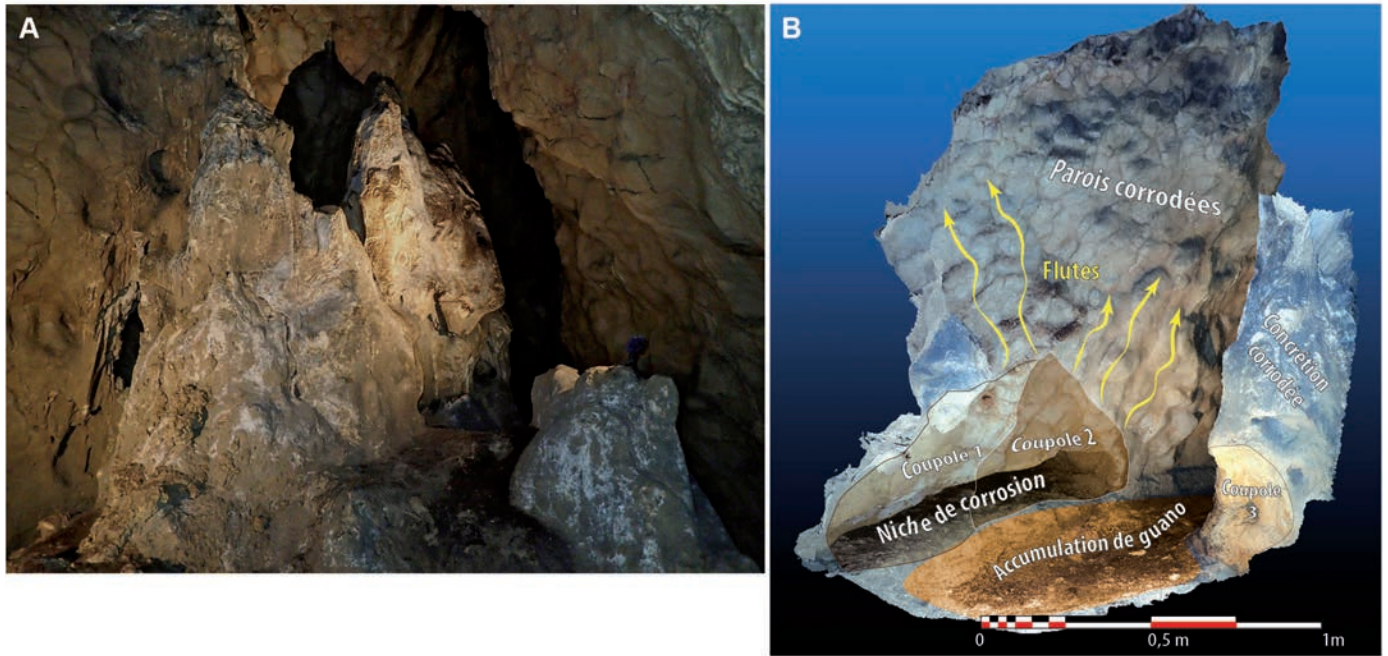


Figure 6: A - Salles des Chauves-souris, massif de concrétions fortement altérées par la présence de colonies de chauves-souris. Cliché D. Cailhol/Inrap. B - Vue de la partie terminale de la Salle des Chauves-souris. Les formes de polygones liées à l'altération des calcaires sont nettement visibles sur les parois. Les zones d'accumulation de guano vont, lors de leur décomposition, produire de la chaleur et des flux acides à l'origine des flutes et des petites coupoles biogéniques le long de la diaclase.

Cliché et photogrammétrie D. Cailhol/Inrap.

A - *Speleothems deeply weathered due to the presence of bats colonies in this room.* B - *Biocorrosion features along the wall of the Bats Chamber. Guano accumulation produces heat and acid air flows, which are responsible of flutes, pockets and biogenic cupolas along the diaclasis (photo and photogrammetry D. Cailhol, Inrap).*

rouges sont les plus estompés. De même, de nombreux graffitis du XIX<sup>e</sup> siècle présentent eux aussi une diffusion du pigment de part et d'autre du trait à la mine de graphite (figure 4).

Les phénomènes de corrosion qui affectent la paroi du secteur A de la galerie Breuil tendent donc à faire disparaître les morphologies pariétales, les formations de calcite mais aussi les dessins préhistoriques et les graffitis. Il s'agit là d'un phénomène actif et actuel comme le montrent les effets sur les graffitis du XIX<sup>e</sup> siècle. Ainsi, il est probable qu'une dynamique favorisant la condensation-corrosion se soit mise en place à la suite des aménagements entrepris dans la cavité. En effet, lors du diagnostic archéologique mené par l'Inrap pendant l'hiver 2012, des températures de 6,5° ont été relevées dans la salle Piette alors qu'elles sont de 10,7° dans la galerie Breuil [Calastrenc et al., 2017]. Ce jour-là, nous avons pu observer en plusieurs endroits des surfaces recouvertes de gouttelettes d'eau, perlant principalement à la pointe de protubérances rocheuses. Des observations comparables ont été réalisées en septembre 2017. Cette partie est donc plus exposée aux variations de température qui génèrent, suivant les conditions aérologiques, des phénomènes de condensation.

Le fonctionnement climatologique du secteur A contraste avec celui du secteur B, la zone ornée de la galerie Breuil. Dans cette partie profonde et protégée, les formes pariétales de creusement (coups de gouge) sont parfaitement préservées et n'ont été l'objet d'aucune corrosion postérieure après la perte de fonctionnalité hydrologique du conduit. Seuls quelques voiles de calcite viennent éclaircir les parois sombres de la galerie. Ici, les œuvres

pariétales sont très bien préservées et aucun phénomène de diffusion des pigments ou d'estompage n'a été reconnu dans le secteur B.

## B. Les phénomènes de biocorrosion

Les phénomènes de biocorrosion, intégrant aussi des phénomènes de condensation-corrosion induits, sont observables dans les parties hautes de la grotte (figure 3), notamment dans les salles des Conférences, Mandement, Dewoitine et dans les salles Nord (salles du Guano et des Chauves-souris). Il s'agit des parties les plus chaudes et les plus stables de la grotte, propices à l'installation de colonies de chauves-souris. Dans ces salles préservées des alternances gel-dégel, on n'observe pas les phénomènes de desquamation des parois qui ont affecté le couloir principal de l'Arize et les grandes salles adjacentes.

### 1) La salle Mandement

La salle Mandement est une vaste galerie située dans le prolongement de la salle Dewoitine ; elle se trouve au carrefour de plusieurs autres de dimensions plus modestes (figure 3).

Les plafonds de la salle attestent d'une occupation importante par des chiroptères. Des traces sombres, probablement d'apatite, liées à la minéralisation des guanos [Audra et al., 2017], sont abondantes. À côté, de nombreuses taches noires d'aspect gras, sont également des indicateurs d'occupation importante du lieu par des colonies de chauves-souris. Ces taches noires et grasses sont issues de sécrétions qui constituent des signaux olfactifs en usage au cours de différentes phases de la vie sociale (identification du groupe, des juvéniles, sexualité, territoire) ou

à des fins comportementales (mâle dominant vis-à-vis de groupes de femelles et de mâles subordonnés). Ils témoignent du regroupement d'un nombre conséquent d'individus sur des périodes actives longues [Brook et Decker, 1996]. L'association de ces traces avec des morphologies en coupole peut résulter d'un choix d'implantation des chauves-souris. Mais certaines d'entre elles peuvent s'être formées par la présence des chiroptères [Miller, 2006; Lundberg et McFarlane, 2012], par dissolution directe (jets d'urine) et condensation-corrosion liées à leur respiration et au rejet de CO<sub>2</sub> (figure 5).

Les parois de la salle Mandement, assez caractéristiques de cette partie de la grotte, présentent une forte altération. La structure des calcaires graveleux paléocènes du Thanétien inférieur est soulignée par des polygones en relief (« calcaires à miches ») qui se mettent en place à partir de l'élargissement de fissures résultant des phénomènes intenses de condensation-corrosion. À d'autres endroits, des flûtes de corrosion viennent s'imprimer au-dessus des accumulations de guano du fait des dégazages liés à leur décomposition [Miller, 2006; Bigot, 2014; Lundberg et McFarlane, 2012; Audra et al., 2017].

C'est l'association de ces formes et leurs relations dans l'espace (figure 5), qui rend le diagnostic d'une évolution par biocorrosion envisageable, à la différence des autres processus (condensation-corrosion seule ou creusement noyé initial). Bien sûr, la biocorrosion peut accentuer certaines morphologies de départ, par exemple par l'élargissement et l'approfondissement de coupoles phréatiques.

## 2) La salle des Chauves-souris

Située au nord-est de la salle Mandement, elle contient des massifs stalagmitiques extrêmement corrodés du fait des actions corrosives des lixivias acides et de la décomposition des accumulations de guano [Tarhule-Lips et Ford, 1998 a et b; Bigot et Guyot, 2014; Caillaud, 2017]. Les ensembles stalagmitiques sont méconnaissables, car ils ont perdu leur forme originelle et laissent apparaître les lamines de calcite indiquant une réduction substantielle de leur volume (figure 6 A). Au plafond, on n'observe plus aucune stalactite, mais seulement la roche à nu. Les formes en miches de l'encaissant calcaire sont visibles à la voûte, comme dans la salle Mandement. Les formes de corrosion par le guano qui s'accumule dans la salle, sont décelables également au sol où ne subsiste plus aucun plancher stalagmitique. Celui-ci a pourtant existé dans le prolongement aval des stalagmites comme le montrent, à leur base, les lamines subhorizontales tronquées (figure 6 B).

## 3) La salle du Guano

La salle du Guano se développe le long d'une haute diaclase. Elle comporte une unique grande coupole bien identifiable au plafond avec des traces sombres caractéristiques des essaims et, au sol, un tas de guano conséquent. Auparavant, la salle du Guano devait communiquer avec la surface, car différentes traces de présence ursine y ont été relevées. On observe notamment de nombreuses griffades conservées dans l'argile. À l'extrémité nord de la salle, un chaos de blocs atteste d'un éboulement. Dès lors, ce dernier a certainement interdit l'accès des ours à cette salle. En effet, la galerie d'accès actuelle depuis la salle Mandement était totalement colmatée par des sédiments fluviatiles, et n'a été désobstruée qu'au XX<sup>e</sup> siècle. La communication avec la salle des Chauves-souris, quant à elle, ne se fait que par un conduit en hauteur, au plafond de la salle, beaucoup trop élevé pour les ours.

Dans cette salle, on observe une grande quantité de traces de griffes dans les placages argileux. Il est intéressant de noter que ces traces sont absentes de la paroi calcaire et n'apparaissent que sur le placage argileux (figure 7). Cette concentration de traces résulte d'une conservation différentielle et non d'un choix délibéré des ursidés à faire leurs griffes sur une zone particulière. Les traces aujourd'hui visibles ne sont que la terminaison de griffades plus grandes, dont l'essentiel se prolongeait auparavant sur les parois calcaires. On mesure pleinement ici un phénomène de dissolution de la paroi calcaire par rapport au placage argileux insoluble. La corrosion de la paroi calcaire peut être attribuée à la présence récente de chauves-souris. Le recul différentiel observé sur les parois calcaires est de plusieurs millimètres

Figure 7: Salle du Guano, griffades d'ours imprimées dans un placage d'argile. Notez qu'en dépit de leur densité et de leur profondeur, elles sont absentes de la paroi calcaire. Cliché D. Cailhol/Inrap. Bear claw marks let on a remnant of clayey filling in the Guano chamber. Note that despite their abundance and their depth, they are not anymore present on the limestone wall.





à plusieurs centimètres. Autres exemples de conservation différentielle, des griffades de plus petite taille ont été également observées entre les supports argileux et rocheux dans les galeries attenantes.

#### IV. Art pariétal et biocorrosion : une exclusion systématique

##### A. Les altérations de parois dans la grotte du Mas d'Azil

Cette cavité a connu une évolution complexe, avec notamment des phases successives de colmatage et de vidange de ses remplissages [Pallier *et al.* à paraître, a et b]. Lors des périodes pendant lesquelles la grotte est partiellement décolmâtée, accessible aux hommes et à la faune, l'évolution des parois est soumise à des processus d'altération qui

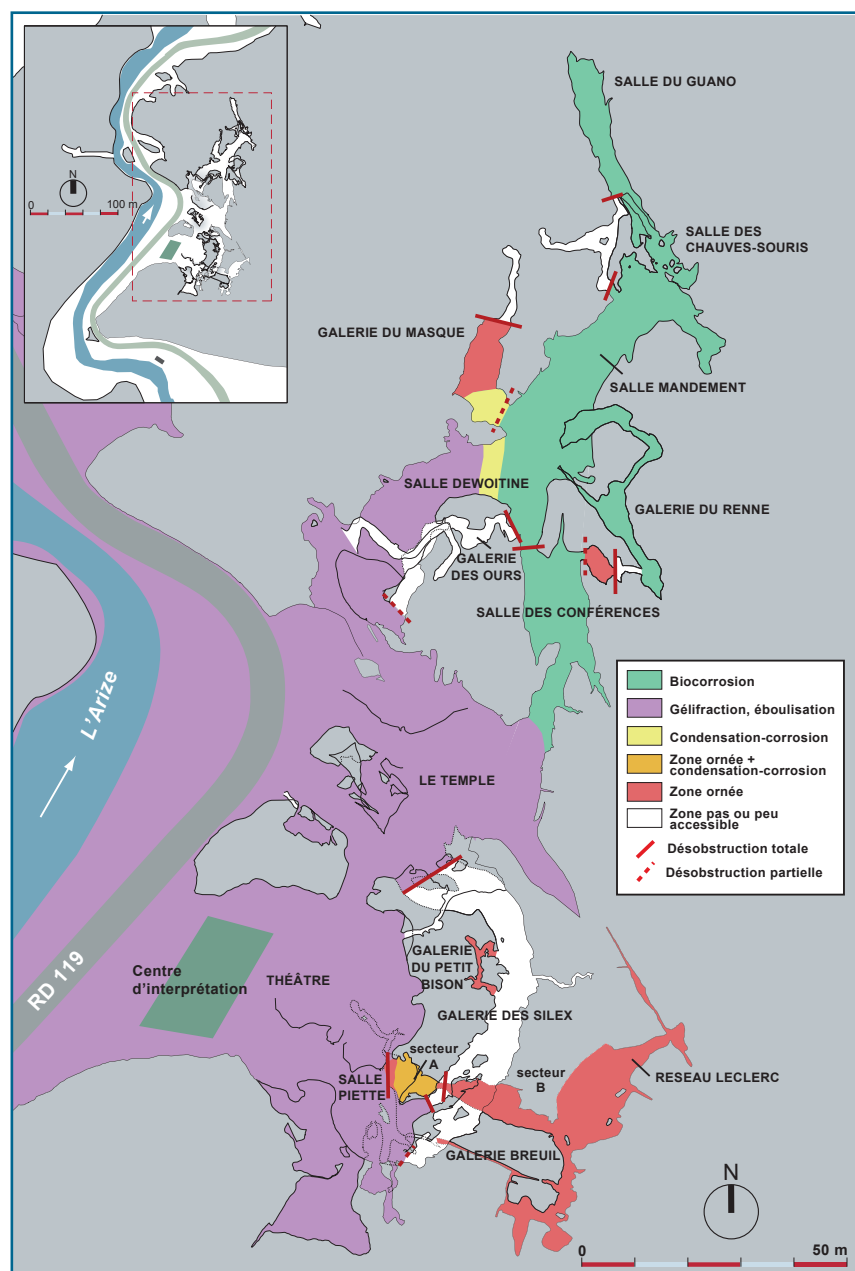
diffèrent en fonction de leur situation topographique et des contextes climatiques et environnementaux souterrains (gélifraction, condensation-corrosion ou biocorrosion). Ainsi, la galerie principale, la salle du Théâtre, la salle du Temple et les galeries qui les raccordent (figure 8) sont fortement marquées par la desquamation des parois due à la gélifraction et aux réajustements mécaniques. La gélifraction est perceptible jusque dans les parties les plus hautes de ces salles, certains blocs étant gélifractés sur place, par exemple contre la paroi est de la salle du Théâtre. À l'interface avec les zones profondes de la cavité, plus tempérées, on observe des indices de condensation-corrosion sur la voûte et des parois. C'est le cas à l'entrée de la salle Dewoitine, de la galerie du Masque, mais aussi, comme nous l'avons vu plus haut, de la galerie Breuil (figure 8). Ce sont des seuils climatiques où l'air humide des parties profondes de la grotte condense au contact de l'air et des parois plus froids. Ce phénomène est régulièrement constaté à l'entrée de la galerie Breuil, où les peintures préhistoriques tout comme les graffitis du XIX<sup>e</sup> siècle sont estompés. Si l'impact de ce phénomène semble relativement modeste, les formes de creusement initiales étant encore perceptibles, il peut être néanmoins assez rapide, en lien avec la désobstruction du bouchon sédimentaire par Mandement en 1937. À noter que ce phénomène est aujourd'hui encore actif et que le processus d'estompage des peintures se poursuit donc vraisemblablement.

Dans les galeries plus profondes du Mas d'Azil (salle des Conférences, salle Dewoitine, salle Mandement), on n'observe plus de trace de gélifraction ni de condensation-corrosion liée à l'interface climatique. Mais l'on ne retrouve pas pour autant les morphologies pariétales liées au creusement initial de la cavité. Ici, un autre processus a profondément modifié l'état des parois : la biocorrosion. Les parties accessibles et tempérées de la grotte ont été occupées par des colonies de chauves-souris dont l'impact direct et indirect a été le recul de plusieurs millimètres à plusieurs centimètres des voûtes et des parois.

##### B. Art pariétal vs biocorrosion au Mas d'Azil

Sur la base de ce constat, il est alors intéressant de faire la comparaison entre les états de parois et la répartition de l'art pariétal, tout en sachant que certaines galeries n'étaient pas accessibles, ou uniquement en partie, durant le Paléolithique (figure 8). S'il est évident que les zones desquamées par le gel et soumises à une éboulisation active ne peuvent pas avoir conservé d'art pariétal, les salles profondes et plus tempérées (salles des Conférences,

Figure 8 : Carte de synthèse des états de parois montrant notamment l'opposition entre les secteurs soumis à la biocorrosion et les parties ornées de la cavité.  
Synthesis map showing the opposition between areas where biocorrosion has been recognized and rock art.



Dewoitine et Mandement) semblaient y être plus favorables. Bien qu'il soit certain que les hommes préhistoriques, et notamment les artistes qui ont décoré les galeries du Petit Bison, du Renne et du Masque, les ont parcourues, aucun vestige de peinture ou de gravure n'a été reconnu dans ces salles. Bien sûr, rien n'indique que ces salles aient été ornées mais il est intéressant de noter l'opposition systématique entre les parties ornées et celles où l'on observe des indices de biocorrosion. Ainsi, c'est toujours dans les premières que l'on reconnaît les formes pariétales liées au creusement initial ou à l'évolution de la cavité. L'essentiel des voûtes et des parois de la galerie Breuil est couvert de coups de gouge. Dans les galeries du Petit Bison et du Renne, les parois sont encore relativement lisses, les miches n'étant que peu dégagées par la corrosion. Enfin, la galerie du Masque présente une paroi plus différenciée. Nous y avons observé des traces de condensation-corrosion uniquement dans la zone d'entrée, où il n'y a pas d'art pariétal d'ailleurs. Les miches du calcaire encaissant sont moins visibles dans la seconde partie de la galerie, là où des œuvres pariétales ont été reconnues. On peut attribuer ce fait à son éloignement par rapport à la salle Dewoitine occupée par les chauves-souris et la zone où s'exerçait la condensation-corrosion pariétale. Dans tous les cas, la paroi de la galerie du Masque n'est pas aussi irrégulière et altérée que les salles où ont été observées des traces de biocorrosion.

Deux hypothèses sont donc envisageables pour interpréter l'exclusion observée entre art pariétal et biocorrosion. Les parties de la grotte les plus tempérées ont pu abriter des colonies de chauves-souris de longue date, avant même que les Magdaléniens n'occupent la grotte. Les parois des salles des Conférences, Dewoitine et Mandement étaient alors déjà soumises à la biocorrosion pendant le Magdalénien. Entre les accumulations de guano, l'atmosphère irritante et les parois déjà fortement altérées, on peut comprendre que les hommes préhistoriques n'aient pas choisi ces parties pour exprimer leur art.

Mais il est également envisageable que ces salles et galeries aient elles aussi été ornées. Il est impressionnant de voir à quel point les hommes du Magdalénien sont allés loin sous terre, dans des galeries exigües (galerie Breuil, réseau Leclerc,

galerie du Petit Bison, galerie du Renne), pour peindre ou graver alors que de larges parois s'offraient à eux dans les grandes salles. Il est tout à fait possible que la salle des Conférences, la salle Dewoitine tout comme la salle Mandement aient elles aussi été ornées. Mais l'impact de la biocorrosion sur les parois, à l'image des griffades d'ours de la salle du Fond, a provoqué le recul de la paroi et des voûtes et en a effacé toutes les traces. L'exemple du secteur A de la galerie Breuil montre d'ailleurs la rapidité des effets de la seule condensation-corrosion capable d'estomper des graffitis du XIX<sup>e</sup> siècle. L'impact de la biocorrosion sur plusieurs siècles ou plusieurs millénaires d'occupation par des colonies de chauves-souris est loin d'être négligeable. Par opposition, les petits conduits situés à l'écart des colonies et de leurs effluves corrosives, présentent des états de parois préservés sur lesquelles les œuvres pariétales sont conservées.

### C. Les conséquences sur les interprétations archéologiques

La confrontation de ces observations avec les interprétations archéologiques sur l'art pariétal de la grotte apparaît comme extrêmement pertinente. Ainsi, dès 1903, Breuil avait remarqué à quel point l'art pariétal du Mas d'Azil était dégradé. Il indique que « *la détérioration des gravures murales du Mas d'Azil enlève presque tout intérêt à leur étude* ». Il ajoute également que « *le fait de leur présence au fond d'une galerie obscure [en l'occurrence, ce que nous pensons identifier comme la galerie du Renne, qui n'était pas une salle d'habitation et n'en pouvait pas servir], est un précieux renseignement pour la question de la généralité et de la destination de l'ornementation des grottes* ». Avec les découvertes suivantes, cette vision a été confirmée. Ainsi, Vialou [1983] écrit : « *Nous constatons que l'art pariétal du Mas d'Azil gagna la totalité du réseau de la rive droite : il s'agit donc bien d'un site profond et complexe, typiquement pyrénéen [...]. Le choix de galeries plutôt étroites et à l'écart des lieux largement fréquentés paraît être délibéré et déjà significatif même si d'autres paramètres « sociologiques » et « psychologiques » sont vraisemblablement intervenus lors de ce(s) choix.* ».

La répartition des phénomènes de condensation-corrosion et de biocorrosion dans la grotte du Mas d'Azil conduit à envisager de manière plus générale la question de l'art pariétal sous un autre

angle. Ainsi, au-delà de choix purement artistiques, la présence de colonies de chauves-souris a-t-elle orienté le choix des lieux d'ornementation dans la grotte ? Ou, plus probable, la répartition des œuvres traduit-elle une conservation différentielle de l'art pariétal ? Au-delà des zones desquamées, les salles tempérées ont-elles perdu leurs ornements du fait d'une biocorrosion postérieure. L'« art caché » des auteurs anciens n'est peut-être qu'un « art résiduel », uniquement préservé dans les galeries les moins exposées aux dégradations des parois, y compris dans les secteurs que l'on pensait les plus protégés.

### Conclusion

Il est évident que le phénomène de condensation-corrosion et de biocorrosion, par l'intensité de l'altération et de la dissolution des parois qu'il induit, n'est pas compatible avec la préservation des œuvres pariétales. Dans la grotte du Mas d'Azil, il apparaît clairement qu'il n'existe aucun témoin d'art conservé sur les parois où la biocorrosion a été observée, alors même que l'on sait que ces galeries ont été fréquentées par les hommes du Magdalénien. Par opposition, on ne trouve des œuvres peintes ou gravées que dans des petites galeries latérales, préservées à la fois des phénomènes de condensation-corrosion et des processus de biocorrosion. Si cette exclusion systématique ne constitue pas une démonstration, il devient très pertinent de se poser les questions suivantes : cette opposition est-elle systématique dans les grottes ornées ? Si oui, cela s'explique-t-il parce que les galeries étaient insalubres, les parois peu propices à l'expression artistique ou simplement parce que les œuvres ont disparu depuis ?

Dans tous les cas, l'intensité et la rapidité de la corrosion, surtout quand elle d'origine biologique, doivent inciter à la prudence dans l'interprétation de la répartition des œuvres pariétales en grotte. En plus des autres phénomènes déjà connus par les archéologues et qui sont intégrés dans l'étude classique des grottes ornées, la mise en évidence récente de la biocorrosion, sa reconnaissance et sa prise en compte dans l'approche archéologique doivent désormais être systématiquement considérés. L'identification de ce processus de corrosion spécifique et la question



de son impact sur les œuvres pariétales impliquent désormais de revoir sous un autre angle l'ensemble des grottes ornées, même celles que l'on pensait les mieux préservées. En effet, la climatologie et l'aérogologie d'une cavité conditionnent les choix d'implantation des chauves-souris, lesquelles constituent autant de foyers de biocorrosion susceptibles de dégrader

les œuvres pariétales, même dans les galeries les plus reculées. A contrario, il serait intéressant de savoir si la présence d'art pariétal signifie que la cavité ou la galerie n'abritait pas de colonies de chauves-souris. Les réponses à ces questions devraient permettre de fournir des informations concernant l'accessibilité de la cavité ou sa climatologie passée.

La biocorrosion constitue un nouveau prisme pour l'interprétation génétique des morphologies pariétales mais aussi pour l'interprétation des grottes ornées. À l'exemple de la grotte du Mas d'Azil, ce concept contribuera, en collaboration avec les archéologues, à mieux comprendre les pratiques artistiques des hommes du Paléolithique.

## Bibliographie

- ALTEIRAC A. & VIALOU D., 1980** - La grotte du Mas d'Azil, le réseau orné inférieur. *Bulletin de la Société préhistorique de l'Ariège*. T. XXXV, année 1980, p. 3-63.
- ALTEIRAC A. & VIALOU D., 1984** - La grotte du Mas d'Azil, in *L'art des cavernes, Atlas des grottes ornées paléolithiques françaises*, Paris, Impr. Nat., p. 389-394.
- AUDRA P., 2007** - *Karst et spéléogénèse épigènes, hypogènes, recherches appliquées et valorisation*, 278 p. Habilitation Thesis, Nice.
- AUDRA P., BOSÁK P., GÁZQUEZ F., CAILHOL D., SKÁLA R., LISÁ L., JONÁŠOVÁ Š., FRUMKIN A., KNEZ M., SLABE T., ZUPAN HAJNA N. and AL-FARRAJ A., 2017** - Bat urea-derived minerals in arid environment. First identification of allantoin, C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>N<sub>4</sub>O<sub>3</sub>, in Kahf Kharrat Najem Cave, United Arab Emirates. *International Journal of Speleology*, 46 (1), 81-92. Tampa, FL (USA) ISSN 0392-6672
- BÉGOUËN H. & BREUIL H., 1912-1913** - Peintures et gravures préhistoriques dans la grotte du Mas d'Azil. *Bulletin de la Société archéologique du Midi de la France*, t. XVII, n° 42-43, p. 139-142.
- BIGOT J.-Y., 2014** - La corrosion pariétale des grottes par les aérosols d'origine animale. *Actes de la 23<sup>ème</sup> Rencontre d'Octobre* - Le Châtelard 2013, p. 14-21.
- BIGOT J.-Y. et GUYOT J.-L., 2014** - Chauves-souris et condensation-corrosion dans les grottes du Pérou. *Actes de la 23<sup>ème</sup> Rencontre d'Octobre*, Le Châtelard 2013, p. 22-27.
- BILOTTE M., CASTERAS M., PEYBERNÈS B., REY J., SOULA J.-C. et TAILLEFER F., 1988** - *Notice de la carte géologique du Mas d'Azil au 1/50000*, BRGM, Orléans.
- BREUIL H., 1903** - Rapport sur les fouilles de la grotte du Mas d'Azil (Ariège), *Bulletin archéologique du Comité des travaux historiques et scientifiques*, p. 421-436.
- BROOKE A.P. and DECKER D.M., 1996** - Lipid compounds in secretions of fishing bat, *Noctilio leporinus* (Chiroptera: Noctilionidae). *Journal of Chemical Ecology*, 22, p. 1411-1428.
- BUTLER D.R., 1995** - *Zoogeomorphology: Animals as Geomorphic Agents*. Cambridge University Press, Cambridge, 231 p.
- CAILLAUD H., 2017** - *Zookarstologie: les chiroptères comme facteurs géomorphologiques des paysages souterrains*. Mémoire de master 2, Univ Paris 1 – Panthéon-Sorbonne, 65 p.
- CALASTRENC C., BRUXELLES L. et JARRY M., 2017** - Première expérience de perception des circulations d'air en grotte à l'aide d'une caméra thermique à haute résolution (Grotte du Mas d'Azil, Ariège). In: Jarry M., Pallier C., Bruxelles L., Lacombe S., Martin H. et Le Piat M., *Grotte du Mas d'Azil, Tranche 2.2: parcours de visite. Rapport final d'opération de diagnostic archéologique*, Inrap, p. 107-115.
- CLOTES J., ALTEIRAC A. et SERVELLE CH., 1981** - Art mobilier des anciennes collections du Mas d'Azil, *Bull. Soc. Prehist. Ariège*, XXXVI, p. 37-71.
- DELPORTE H., 1979** - Le Mas d'Azil: ses industries d'après la collection Piette. Étude préliminaire. In: Sonnevile-Bordes de (dir.), *La fin des temps glaciaires en Europe. Chronostratigraphie et écologie des cultures du Paléolithique final*, Colloque de Talence, 1977. Paris, CNRS, p. 615-621.
- DWYER P.D. and HAMILTON-SMITH E., 1975** - Breeding caves and maternity colonies of the Bent-wing bat in southeastern Australia. *Helictite*, 4, p. 3-21.
- FORD D.C. and WILLIAMS P.W., 2007** - *Karst hydrogeology and geomorphology*. 2<sup>nd</sup> Edition, Wiley, West Sussex, 576 p.
- GABROVŠEK F., DREYBRODT W. and 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.
- JARRY M., 2014** - Le Mas d'Azil, grotte: cartographie archéologique et géoarchéologie, prospection thématique. *Bilan Scientifique de la Région Midi-Pyrénées 2014*, Ministère de la Culture et de la Communication, D.R.A.C. S.R.A. de Midi-Pyrénées, p. 37-41.
- JARRY M., 2015** - Le Mas d'Azil, grotte: cartographie archéologique et géoarchéologie, prospection thématique. *Bilan Scientifique de la Région Midi-Pyrénées 2015*, Ministère de la Culture et de la Communication, D.R.A.C. S.R.A. de Midi-Pyrénées, p. 30-33.
- JARRY M., PALLIER C., BRUXELLES L., BON F., LEJAY M., ANDERSON L., LACOMBE S., LELOUVIER L.-A., MARTIN H., PETILLON J.-M., POTIN Y., RABANIT M., SIMONNET R., WATTEZ J., ARRIGHI V. et CALLÈDE F., 2017** - L'Aurignacien de la grotte du Mas d'Azil, résultats des opérations 2011-2015. Actualités, *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, t. 114, n° 3, p. 575-57
- JARRY M., PALLIER C., BRUXELLES L., BON F., ANDERSON L., ARRIGHI V., CAMUS H., COMELONGUE M., FRITZ C., GHALEB B., LEJAY M., MARTIN H., POTIN Y., RABANIT M., SALMON C. and TOSELLO G., à paraître** - The secret entrance of the « galerie Breuil » into the cave of The Mas d'Azil (Ariège, France). IFRAO Cacerès 2015, actes de la session "Conspicuous or hidden: the issue of visibility in the understanding of prehistoric Rock Art", Coord.: C. Bourdier, V. Feruglio, O. Fuentes, G. Pinçon, G. Robin.
- KING-WEBSTER W.A. and KENNY J.S., 1958** - Bat erosion as a factor in cave formation. *Nature*, 181, p. 1813.
- KLIMCHOUK A. B., 2007** - *Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective*. Special Paper n° 1, National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, NM, 106 p.
- LE GUILLOU Y., 2017** - Les galeries ornées de la grotte du Mas d'Azil. *Préhistoire, Art et Sociétés, Bulletin de la Société Préhistorique Ariège-Pyrénées*, t. LXIX, p. 5-30.
- LEROI-GOURHAN A., 1971** - *Préhistoire de l'art occidental*, Paris, éditions Mazenod, 400 p.
- LUNDBERG J. & MCFARLANE D.A., 2012** - Post-speleogenetic biogenic modification of Gomantong Caves, Sabah, Borneo. *Geomorphology*, vol. 157-158, p. 153-158.
- MILLER T., 2006** - *Bell holes and Bellbasins: biogenic (bat) features of Caribbean Caves*. GSA Annual Meeting, Philadelphia, 2006, Abstracts with Program, 63 p.
- PALLIER C., JARRY M., BON F., CAMUS H., RABANIT M. et BRUXELLES, L., à paraître (a)** - Évolution karstique et occupations humaines de la grotte du Mas d'Azil (Ariège, France); *Karstologia*, n° 68.
- PALLIER C., JARRY M., BRUXELLES L. et BON F., à paraître (b)** - La grotte du Mas d'Azil (Ariège, Pyrénées, France): nouveaux éléments sur les stratigraphies de la rive droite et corrélations géoarchéologiques. *Quaternary International*.
- PÉQUART S.-J. & PÉQUART M., 1960** - Grotte du Mas d'Azil (Ariège): une nouvelle galerie magdalénienne. *Annales de Paléontologie*, t. 46, p. 127-194.
- PÉQUART S.-J. & PÉQUART M., 1961a** - Grotte du Mas d'Azil (Ariège): une nouvelle galerie magdalénienne. *Annales de Paléontologie*, t. 47, p. 157-250.
- PÉQUART S.-J. & PÉQUART M., 1961b** - Grotte du Mas d'Azil (Ariège): une nouvelle galerie magdalénienne. *Annales de Paléontologie*, t. 48, p. 199-286.
- PIETTE E., 1889** - *Les subdivisions de l'époque magdalénienne et de l'époque néolithique*. Angers, 28 p.
- PIETTE E., 1895** - Hiatus et lacune. Vestiges de la période de transition dans la grotte du Mas d'Azil. *Bulletin de la Société d'anthropologie de Paris*, année 1895, vol. 6, n° 1, p. 235-267.
- PIETTE E., 1907** - *L'art pendant l'âge du renne*, Paris, Masson, 112 p. et 100 planches.
- RAMIS P., JARRY M., PALLIER C., BRUXELLES L., BON F., RABANIT M. et CAMUS H., 2016** - Géologies du Mas d'Azil, nouvelle histoire d'une grotte - *Les Carnets du Mas*, n° 2. 44 p.
- SCHWAB C., 2008** - *La collection Piette. Musée d'Archéologie nationale, Château de Saint-Germain-en-Laye*. RMN (éd.), p. 60-91.
- TARHULE-LIPS R.F.A. and FORD D.C., 1998a** - Condensation corrosion in caves on Cayman Brac and Isla de Mona. *Journal of Cave and Karst Studies*, 60, p. 84-95.
- TARHULE-LIPS R.F.A. and FORD D.C., 1998b** - Morphometric studies of bell hole development on Cayman Brac. *Cave and Karst Science*, 25, p. 19-130.
- VIALOU D., 1986** - *L'art des grottes en Ariège magdalénienne*, Paris, CNRS, Gallia-Préhistoire, XXII<sup>ème</sup> supplément, 425 p.
- WILFORD C.E., 1966** - "Bell holes" in Sarawak Caves. *Bulletin of the National Speleological Society*, 28, p. 179-182.