

**DIRECTION REGIONALE DES AFFAIRES CULTURELLES DE
NOUVELLE-AQUITAINE**

Représentant du pouvoir adjudicateur
54 rue Magendie
33074 BORDEAUX
Tél : 05 57 95 02 02 - Fax : 05 57 95 01 25

**DORDOGNE – MONTIGNAC
Grotte de Lascaux**

**Marché de prestations et de coordination
du programme de recherche
« Étude intégrée des dynamiques des zones sombres et des
taches noires de l'Abside de la grotte de Lascaux »
(4 ans)**

CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIERES (CCTP)

Article 1 - Le contexte

L'État est propriétaire de la grotte de Lascaux, située sur la commune de Montignac, en Dordogne, inscrite en 1979 sur la liste du patrimoine mondial parmi un ensemble de 15 « Sites préhistoriques et grottes ornées de la Vézère » appartenant à différentes périodes de la Préhistoire. Dès sa découverte en septembre 1940, la grotte de Lascaux est devenue un gisement préhistorique de référence internationale. Classée monument historique le 27 décembre de la même année, la grotte est très vite devenue aussi célèbre dans le monde pour la richesse de son décor pariétal, puis à partir de 1960, pour les dangers constants qui menacent sa conservation. Le succès de la grotte fut immédiat et le nombre de visiteurs sans cesse croissant, atteignant les 100 000 visiteurs en 1960.

Cette surfréquentation de la cavité eut pour effet de favoriser la formation sur les parois d'un voile de calcite lié à la condensation, la " maladie blanche ", et certaines surfaces peintes

commencèrent à se couvrir d'algues : la maladie " verte ". Au vu de ce double phénomène, André Malraux, ministre des Affaires culturelles, imposa au propriétaire privé de cette grotte, sa fermeture au public en avril 1963. Il crée alors la première commission d'études et de sauvegarde de la grotte de Lascaux qui se réunit jusqu'en 1976 et identifie des paramètres de conservation dont dépend l'équilibre climatique et microbiologique de la cavité.

En juin 2001, la grotte a subi une importante contamination fongique qui s'est manifestée par l'apparition de moisissures blanches. Les mesures d'urgence qui avaient alors été prises, conformément aux préconisations formulées par le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH), avaient consisté dans un premier temps à poser des compresses imbibées de fongicide sur les banquettes argileuses et concrétionnées de la partie inférieure des parois de la Salle des Taureaux et à pulvériser un produit biocide à base d'ammonium quaternaire sur les voûtes, les banquettes et les parois. Les premiers résultats n'ayant pas été jugés satisfaisants, il fut décidé en octobre 2001 de "stériliser" les sols par un épandage de chaux vive afin d'enrayer la prolifération des champignons.

Toutefois, les analyses microbiologiques ont montré que le principal champignon identifié, *Fusarium solani*, était associé à une bactérie, identifiée à l'époque comme un *Pseudomonas fluorescens*. Dans la mesure où cette bactérie se manifestait localement par la présence de mucus, un antibiotique (*polymyxine + streptomycine*) fut ponctuellement ajouté au traitement, pendant quelques semaines. Les grilles d'observation mises au point, ont permis de mettre en évidence un ralentissement du développement des moisissures blanches en 2003, ce qui a conduit le Comité Scientifique à préconiser l'arrêt des pulvérisations chimiques en janvier 2004.

Cependant, de nouvelles "taches noires" qui se manifestent visuellement par des altérations plus ou moins sombres de la paroi, sont apparues en mars 2006, dans la partie droite de la grotte. En juillet 2007, elles ont atteint, de manière très ponctuelle, le champ orné. Les prélèvements réalisés par le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH) et l'Institut National de la Recherche Agronomique de Dijon (INRA) ont montré qu'il s'agit d'une diversité de champignons à pigment de mélanine, parmi lesquels figurent *Scolecobasidium* et *Ulocladium*. Afin d'arrêter la progression de cette colonisation, le Comité Scientifique préconise, en novembre 2007, un traitement biocide sur les seules zones concernées. Ce traitement est effectué par des restaurateurs spécialisés, en janvier 2008. Depuis cette intervention, la grotte n'a fait l'objet d'aucun traitement biocide.

Si l'état sanitaire de la Salle des Taureaux et du Diverticule Axial demeure stable, le phénomène des "taches noires" affectant la partie droite de la grotte perdure. Dans ce secteur, notamment sur les plans inclinés de l'Abside, malgré les nettoyages réguliers, des microorganismes sont toujours présents. De rares nouvelles apparitions sur la voûte du Passage et sur la voûte de l'Abside ont été observées, mais avec un rythme de développement ralenti par rapport au phénomène des "taches noires" relevé entre décembre 2007 et juin 2008.

À la suite de ces deux crises microbiologiques, le comité scientifique a souhaité que des programmes de recherche soient initiés afin de mieux connaître le paysage biologique et climatique de la grotte :

- Programme de recherche "Microbiologie-Microclimat" (2007-2011)

Ce programme de recherche sur "l'impact des paramètres physiques de l'atmosphère et des substrats sur le développement des micro-organismes" a concerné cinq zones témoins.

Il s'agissait de suivre, de manière dynamique, l'évolution des contaminations microbiennes dans les zones concernées et de corrélérer ces évolutions avec les paramètres microclimatiques et physiques mesurés en continu à la surface et dans le substrat rocheux.

Ce programme d'étude pluridisciplinaire associait des spécialistes de la microbiologie (INRA de Dijon, LRMH), de la physique de l'atmosphère (CNR-ISAC de Padoue) et des propriétés de transport des roches (LRMH). Lors de l'évaluation du programme, en juin 2011, le conseil scientifique a relevé l'intérêt des résultats obtenus par les deux méthodes d'identification des microorganismes ainsi que la pertinence des objectifs de croiser les variations climatiques et microbiologiques.

Toutefois, fort heureusement la stabilité climatique de la grotte tout au long du programme n'a pas permis d'atteindre l'ensemble des objectifs initiaux.

- Programme de recherche "Écologie microbienne de la grotte de Lascaux" (2009-2011)

Conduit par l'Institut National de la Recherche Agronomique de Dijon et l'Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Séville, le programme "*Ecologie microbienne de la grotte de Lascaux*" avait pour ambition de mieux comprendre les micro-organismes responsables des contaminations à travers l'étude de leurs besoins métaboliques. La priorité actuelle pour la conservation des peintures et des gravures de la grotte est de tenter d'expliquer l'apparition des taches noires. Plutôt que d'éliminer les espèces apparemment dominantes, la démarche développée à travers ce programme de recherche vise à prendre en considération l'ensemble des communautés microbiennes et leurs équilibres pour pouvoir agir sur le biotope qui favorise l'apparition de déséquilibres. Selon cette étude, les communautés sont en perpétuelle évolution et les traitements pratiqués ont concouru à nourrir certains micro-organismes.

À la suite de l'évaluation du programme "écologie microbienne" en juin 2011, le nouveau conseil scientifique a souligné, à la fois, le caractère novateur des résultats et des perspectives de recherche et le réel souci d'intégrer l'écosystème souterrain dans son environnement global. Le conseil a souhaité qu'une étude fine de l'écosystème de la grotte soit poursuivie parallèlement aux actions de suivi hydro-climatique (T°C, CO₂, radon...) et à la poursuite des travaux sur le contexte physique et environnemental de la grotte (géophysique, suivi couverture végétale...)

Deux programmes de recherche ont été alors engagés : l'un sur les « vermiculations » et l'autre sur « l'écologie microbienne ».

Concernant ce second volet "Écologie microbienne de la grotte de Lascaux", deux programmes consécutifs ont été engagés compte tenu du besoin essentiel de connaissance et de compréhension des dynamiques souterraines en 2014-2017 puis 2019-2023.

Ce programme a été mené par deux unités du CNRS/Université Lyon 1 de Villeurbanne. Il visait à caractériser l'étendue de la diversité microbienne sur les parois de Lascaux (par des méthodes de séquençage de nouvelle génération à haut débit, NGS), les processus de dissémination microbienne dans la grotte, et la nature chimique des pigments synthétisés par les microorganismes isolés des taches. Le projet a permis de caractériser la biodiversité microbienne particulière de la grotte de Lascaux et l'importance relative des principaux facteurs structurant cette diversité (salle, substrat géologique, présence de certaines altérations sur les parois). De nombreux taxons d'arthropodes ont été mis en évidence dans le sol de grotte, et sur les parois le développement de nouvelles altérations (zones sombres) dans l'Abside est lié à la prolifération de collembolles *Folsomia candida* et à un déséquilibre de la communauté microbienne. Concernant les taches noires, il a été montré que les champignons pigmentés (présents aussi dans les zones sombres) synthétisaient un total of 7 types de

mélanines différentes, mais les processus de pigmentation et les moyens de les contrôler restent à identifier.

Sur proposition du Conseil Scientifique de la Grotte de Lascaux, la Direction régionale des affaires culturelles de Nouvelle Aquitaine vous invite à soumettre un projet de recherche « Étude intégrée du fonctionnement de l'Abside de la grotte de Lascaux : dynamique des zones sombres et des taches noires » d'une durée de quatre ans en tant que coordinateur, faisant appel à différentes compétences telles que précisées dans le document ci-joint.

Article 2 – Objectifs (voir descriptif précis à la fin de ce document)

De précédents programmes ont développé de nouvelles connaissances en écologie microbienne à l'échelle de la grotte entière, pour mieux connaître les dynamiques biotiques et appréhender les évolutions des taches noires et des zones sombres. D'autres programmes de recherche se sont attachés à la climatologie de la grotte, au suivi du CO₂ dans la cavité, à la dynamique des circulations épikarstiques (*via* la géophysique) et au calcul de l'évaporation liée au couvert forestier.

Ce nouveau programme vise à **prendre en compte les contributions et les interactions entre les processus biotiques et abiotiques dans l'écosystème souterrain de la grotte de Lascaux**. Il sera centré sur un espace restreint : **l'Abside pour les raisons suivantes** : secteur de la grotte où les zones sombres (ZS) évoluent rapidement avec des contraintes liées à la teneur en CO₂ élevée (2-4%) et un retour à l'équilibre plus long que dans les autres zones. De plus, cette zone a été particulièrement affecté par les traitements anciens et altéré par l'enlèvement de placages d'argile. Afin d'estimer le caractère généralisable des observations approfondies réalisées sur l'Abside, deux ou trois autres secteurs déjà étudiés pourront être poursuivis afin d'identifier les différences ou similarités d'évolution.

Article 3 – Description de l'objet patrimonial concerné par ce travail de suivi

Il s'agit d'une cavité dont le volume représente environ 3000 m³, composée d'environ 500 m² de parois ornées et de 1500 m² de parois non-ornées. A titre indicatif, la distance entre la Salle des Machines et le fond du Diverticule Axial est de 45 m, environ ; celle entre l'entrée du Passage et le fond du Cabinet des Félin est de 77 m, environ. La hauteur sous voûte varie selon les secteurs, avec un point culminant à 5 m dans la Salle des Taureaux et à 7 m dans la Nef.

Article 4 – Suivi du programme de recherche

Le titulaire sera chargé de piloter et de coordonner l'ensemble des volets du programme. A ce titre, il assurera la cohérence méthodologique et scientifique entre les différents acteurs et produira les livrables techniques et scientifiques conformément au calendrier prévu ;
Ce programme de recherche fera l'objet d'un suivi scientifique par les membres référents du Conseil scientifique de la grotte de Lascaux.

Article 5 - Comportement à l'intérieur du monument

Les interventions dans la grotte, tributaires des paramètres climatiques de celle-ci, se déroulent généralement entre janvier et mars, puis, selon les années, entre juin /juillet et

septembre. La durée maximale de chaque intervention est de 2 heures et un « repos » minimal de 36 heures est respecté entre 2 interventions pour permettre à la grotte de se remettre à l'équilibre.

Pour des raisons de conservation, l'accès à la grotte sera nécessairement restreint. Le calendrier des interventions pourra à tout moment être modifié par la conservatrice si la climatologie de la grotte le nécessite et selon les situations non prévisibles à l'avance mais imposant un accès prioritaire à la cavité (interventions de diagnostic / réparation en cas de défaillance des équipements électriques ou de suivi climatique). Le prestataire devra impérativement se conformer aux préconisations de la conservatrice de la grotte et mises en application par le personnel travaillant sur le site de Lascaux. Si la progression dans la cavité ne nécessite pas d'équipements techniques spécifiques – hormis ponctuellement des stations de travail en hauteur (position sur escabeau), les intervenants doivent être parfaitement à l'aise en milieu souterrain : pas de symptômes de claustrophobie, vision compatible avec l'utilisation d'éclairage portatif par lampe frontale, pas de pathologie pour laquelle l'exposition à un taux de CO₂, rarement inférieur à 1,5 %, variant souvent entre 2% et 2,5%, et pouvant atteindre 3%, constitue une contre-indication.

Ainsi, les particularismes présentés par le site (accès très limité à la grotte, milieu souterrain, taux de CO₂ élevé, interactions nécessaires avec les autres programmes de recherche en cours...) sont des points qui nécessitent une réflexion particulière.

Article 6 – Participation aux réunions

- Présentations d'étape effectuées devant le conseil scientifique de la grotte de Lascaux à Bordeaux (2 fois par an).
- Participation à des réunions organisées dans le cadre du programme de recherche en cours (2 fois par an).

Article 7 – Rapports et documentation

- Rédaction de bilans intermédiaires, tous les 6 mois. Ces bilans seront remis au maître d'ouvrage qui se chargera de les transmettre au Conseil scientifique (format papier et numérique).
- A l'issue du programme de recherche, rédaction d'un rapport final. Ce rapport sera adressé au maître d'ouvrage qui se chargera de le transmettre au Conseil scientifique (format papier et numérique).
- Versement de l'ensemble des données et documents au maître d'ouvrage – conservation régionale des monuments historiques, à l'issue du programme de recherche (format numérique).

Il conviendra de prévoir le versement des métadonnées pour tous les fichiers (auteur, date, méthode, paramètres techniques) ; l'interopérabilité des fichiers : Formats ouverts et documentés (ex : Shapefile pour la cartographie, OBJ pour les modèles 3D, GeoTIFF pour les images, CSV pour les données tabulaires).

Cession de la totalité des droits de propriété intellectuelle hors droits moraux, afin d'en permettre l'utilisation à des fins de recherche scientifique.

- Toute publication doit mentionner explicitement le soutien de la DRAC – CRMH de Nouvelle-Aquitaine ;
- Toute publication doit être validée par le Conseil scientifique et la conservatrice de la grotte de Lascaux avant diffusion ;

-Les données brutes sont propriété de l'État et ne peuvent être cédées ou exploitées commercialement.

Article 8 – Calendrier

Durée du marché : 42 mois à compter de la notification du marché

Article 9 – Pièces à fournir par le candidat

- *Curriculum vitae* du coordinateur avec la liste de ses publications
- Liste et profil des laboratoires et des personnes qui composeront l'équipe attributaire ainsi que leur CV, équipements disponibles, expérience en grotte
- Expérience avérée en **coordination de programmes pluridisciplinaires** ;
- **3 références professionnelles contactables par courriel ou téléphone**
- Expérience **minimale de 5 ans en écologie microbienne** et milieu patrimonial
- Projet de recherche détaillé
- Planning prévisionnel de l'étude
- Projet scientifique détaillé
- Modèle de plan de gestion des données répondant au principe FAIR
- Offre financière détaillée, décomposée en 4 tranches annuelles

Article 10 – Exigences environnementales minimales

Le titulaire s'engage à respecter les exigences minimales suivantes dans la réalisation de la prestation :

- Limitation de l'impression physique des documents et livrables, transmission dématérialisée privilégiée. Impression recto-verso systématique et sur papier recyclé lorsque l'impression reste nécessaire ;
- Le cas échéant, utilisation de matériels et consommables répondant à des normes environnementales reconnues (ex. écolabels, normes ISO 14001 pour les fournisseurs de matériel) ;
- Mise en place d'un tri à la source des déchets générés par la prestation : papier/carton, consommables informatiques (cartouches, toners), déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) en fin de vie (ordinateurs, imprimantes), déchets banals (emballages) ;
- Pour les déchets non valorisables, recours à des filières d'élimination autorisées (déchetteries, prestataires agréés) garantissant la traçabilité (bons d'enlèvement, certificats de destruction pour les données sensibles le cas échéant).

Le candidat justifie du respect de ces exigences dans son offre. Toute offre ne respectant pas ces exigences minimales sera déclarée irrégulière.

L’Abside de la grotte de Lascaux : Étude intégrée et interdisciplinaire des dynamiques souterraines

Budget prévisionnel 390 K€ HT en 4 tranches, 1 tranche ferme dont le montant sera au maximum de 60 K€ HT et 3 tranches optionnelles

A. Introduction : contexte de l’Abside

1- Position de l’Abside dans la grotte, spécificités archéologiques de l’Abside

L’**Abside** se situe dans la **galerie de droite de Lascaux, dans la partie haute de la Nef, immédiatement après le Passage** (Figure 1). Elle s’apparente à une galerie en coupole, de 4 m de hauteur, située au droit du Puits d’une dizaine de mètres de profondeur. La galerie de l’Abside est physiquement déconnectée du Puits par une plateforme installée au début des années 1960 ; celle-ci fait tampon entre l’atmosphère du Puits et celle de l’Abside et la Nef. Auparavant, cette zone de croisement était soumise à des circulations atmosphériques comme en témoignent l’érosion de la partie haute de la voûte du Passage et des représentations peintes et gravées qui s’y trouvaient.

Depuis la découverte en 1940, les sols de cette zone (Passage, Abside, haut de la Nef et Puits) ont été à plusieurs reprises soumis à d’importants aménagements qui ont modifié la morphologie des galeries. Dans la seule zone étroite du sommet de la Nef et du sol de l’Abside à la sortie du Passage, les banquettes argileuses ont été creusées afin de faciliter la circulation des visiteurs. Le sol de l’Abside a été abaissé de 1,50 m et sa composition initiale modifiée par l’aménagement des cheminements ; il est par ailleurs étayé par un mur maçonné avec un escalier d’accès cimenté. La base des parois ornées était auparavant recouverte par ce sédiment argileux en partie évacué pour le cheminement des touristes ; c’est dans ces zones que se situent des zones sombres.

Bien que de même nature lithologique, les parois de cette zone ne sont pas recouvertes de calcite, comme celles de la Salle des Taureaux, du Diverticule Axial ou des parties basses du Passage.

Moins hautes que la Salle des Taureaux et le Diverticule Axial, les plafonds et partie haute de la galerie du Passage, du haut de la Nef et de l’Abside ont été investis par les groupes humains passés pour réaliser des gravures fines et des peintures. **L’Abside est entièrement gravée et peinte**. Une partie des gravures est bien lisible mais certaines, comme celles présentes sur les plans inclinés parmi les zones sombres, ne sont pas facilement discernables. Environ 1200 entités graphiques ont été relevées en leur temps par l’abbé André Glory (1952 à 1963.) Un échafaudage en bois fut alors installé afin qu’il puisse, en compagnie d’un ou deux aides, stationner près des parois, observer les œuvres à la lumière électrique et les dessiner sur des feuilles de cellophane directement appliquées sur la paroi.

Il sera utile de **reconstituer la morphologie initiale de ce secteur pour en comprendre le fonctionnement passé** préciser l'ancienne surface du sol (à la découverte en 1940) et insérer les vestiges archéologiques (charbons de bois, faune et artefacts) dans l'environnement initial de la cavité. Les résultats du programme de recherche archéologique (sous la direction de M. Langlais -UMR PACEA- Univ. Bordeaux) seront mobilisés afin de mieux appréhender la géométrie des galeries au moment des fréquentations et de rendre compte des transformations depuis la réalisation des peintures et gravures. **Ces transformations topographiques de ce secteur de la grotte depuis les aménagements touristiques seront incluses dans le modèle 3D de la cavité. L'objectif est de mesurer les implications climatiques et dans la circulation de l'air.**

Le Conseil scientifique de Lascaux estime qu'il conviendrait dans le même temps de se référer aux nombreux écrits de Glory sur ce secteur mais aussi à l'ensemble des publications et rapports sur le secteur de l'Abside, afin d'établir un recueil des observations utiles relatives à l'étude de ces parois.

2- Extension des zones sombres dans l'Abside sur les zones altérées

- Historique des taches et des zones sombres (ZS) sur les parois de l'Abside depuis 2001.

Cette zone de la grotte cumule de nombreux phénomènes différents et parfois propres à l'Abside : taches rondes en 2002 et duvets noirs en 2007 sur la voûte, zones sombres, forte activité de collemboles, modification d'aspect de surface mais aussi évolution de la calcite.

- Lien avec les activités humaines passées :
 - Des échafaudages ont été montés pour réaliser les photos nécessaires au constat d'état, avec des éclairages puissants
 - Épandage et enlèvement de chaux, nettoyage avec la machine d'injection-extraction,
 - Apports de beaucoup d'eau lors des traitements biocides et évidemment les effets secondaires des traitements chimiques.
- Cette zone est particulière et permet de faire des hypothèses sur l'origine des taches et ZS. Toute la grotte était concernée par ces activités, mais la situation et la configuration de l'Abside est différente (peut-être aussi sa géologie et sa morphologie, le fonctionnement climatique, les altérations, etc...).

3- Écologie microbienne de l'Abside

Principales conclusions du programme « Écologie microbienne de la grotte de Lascaux » coordonné par Y. Moënné-Loccoz (Univ. Lyon)

Extraits des conclusions du Volet 1a du programme EM

- « Sur les plans inclinés hauts de l'Abside, les zones sombres se développent de manière linéaire dans le temps, indépendamment des fluctuations saisonnières.
- Le développement des zones sombres implique des proliférations microbiennes, sans doute liées à la disponibilité du carbone organique et de l'azote suite aux apports de biocides.

- La dynamique temporelle de ces proliférations indique qu'il ne s'agit pas d'une arrivée de microorganismes depuis l'extérieur, mais plutôt de la prolifération de bactéries et de champignons déjà installés (autochtones). Les conditions environnementales permettant cette prolifération sont d'abord apparues dans l'Abside, et ensuite dans d'autres salles plus proches de l'entrée. »

Extraits des conclusions du Volet 1b du programme EM

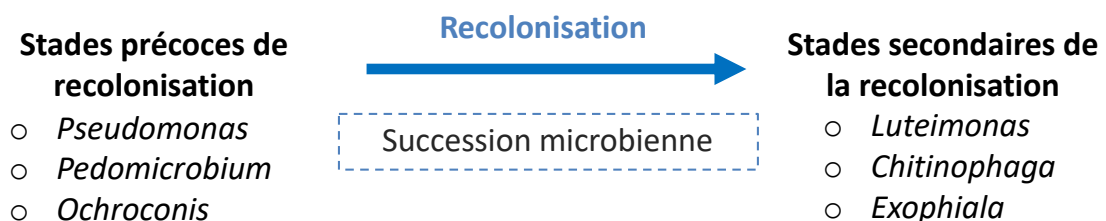
- « Le développement des zones sombres est associé à une transition des communautés microbiennes entre les surfaces non altérées et la zone sombre. Une fois la zone sombre établie, une autre transition intervient alors pour les bactéries et les champignons, entre la zone sombre nouvellement formée et les zones sombres intermédiaire/ancienne.
- Différentes espèces de *Pseudomonas* sont mises en évidence sur les surfaces altérées ou non altérées au niveau des plans inclinés hauts de l'Abside, et la contre-sélection du genre *Pseudomonas* dans les zones altérées concernerait l'espèce *P. grimontii*. »

4- Processus de recolonisation microbienne à la suite du nettoyage mécanique des taches noires de l'Abside

Le nettoyage manuel (mécanique) de certaines taches a permis d'établir une dynamique de recolonisation des zones nettoyées.

Extraits des conclusions du Volet 1c du programme Écologie Microbienne

- « Dans l'Absidiole, le nettoyage des taches noires par les restaurateurs en 2015 avait conduit à une reconstitution des taches en quelques mois. Répétée en 2022, cette opération a été suivie d'un semblant de reconstitution de tache (tache à peine visible, très localisée) sur les 2 ans de l'étude, peut-être parce que les populations de *Folsomia candida* (NDLR : espèce de collembole) dans l'Absidiole ont beaucoup régressé.
- Malgré cet effet visuel très peu marqué, les taches nettoyées ont connu des successions microbiennes, avec une recolonisation précoce par *Pseudomonas*, *Pedomicrobium*, *Ochroconis*, puis ultérieurement par *Chitinophaga*. »



5- Dynamique des populations de collemboles dans la zone de l'Abside

Extraits des conclusions du Volet 3d du programme Écologie Microbienne

- « Dans l’Abside (juin 2021 à février 2023, les communautés fongiques associées aux *Folsomia candida* provenant de taches noires ou de zones sombres sont globalement similaires, avec le même niveau de diversité fongique.
- Les différentes sous-populations géographiques de *F. candida* ne déterminent sans doute pas la nature des altérations (tache noire ou zone sombre) dont ils contribuent à la formation. »

6- Teneur en CO₂ et autres paramètres physico-chimiques spécifiques de l’Abside

« Les taux de CO₂ dans l’Abside sont majoritairement situés entre 2,5% et 3,5%. Les mois de décembre et janvier peuvent présenter des taux supérieurs à 3,5%. » (Delphine Lacanette et Philippe Malaurent, 2023)

« L’évolution des températures sur le mât de l’Abside permet d’observer, pendant les phases de convection de 2021 et 2022, un rapprochement des températures pendant ces périodes jusqu’à ce qu’elles semblent se confondre. Ce point précède l’arrêt des convections avec la dissociation brutale des courbes qui révèle une stratification dans cette zone jusqu’au mois de décembre. On retrouve cette période de stratification en 2020, de juin à novembre. Passée cette période, les températures tendent à s’homogénéiser le long du mât. L’amorce des convections est figurée par la diminution brutale des températures (de la sonde ABS178AIR), on ne retrouve pas ce phénomène en 2020. En 2023 ce phénomène ne dure que quelques jours, les températures ont été homogénéisées le long du mât sur une durée extrêmement courte. » (Delphine Lacanette et Philippe Malaurent, 2023)

B. Programme interdisciplinaire ‘Abside : dynamique des zones sombres et des taches noires’

Sur la base des résultats acquis lors des programmes précédents et des suivis de la grotte par les agents de la Conservation, l’Équipe de Restauration, le Conseil scientifique a défini **l’architecture d’un nouveau programme de recherche pluri-annuel centré sur le secteur de l’Abside. Il repose sur 3 WP d’acquisition de connaissances** sur les différents compartiments de l’écosystème souterrain et **d’un WP de coordination scientifique** et des résultats acquis.

WP1/Coordination et Synthèse des données et mises en relation/corrélation,

Tâche 1 : Pilotage

- Coordonner l’avancement des recherches et suivis et présenter un rapport annuel auprès du Conseil scientifique
- Coordonner les interventions des chercheurs en tenant compte des contraintes spécifiques de la grotte et des autres interventions devant s’y dérouler (conservation et scientifique)

Tâche 2 : Actions transversales

- Préciser les limites des zones étudiées pour les WP1, 2 et 3.
- Définir le pas de la résolution spatiale des différents supports

- Définir un langage et des regards communs (glossaire commun à définir)
- Coordonner la synthèse des données

Les attendus sur ce programme et une meilleure compréhension du fonctionnement de l'écosystème souterrain, des dynamiques interférant avec le développement des zones sombres et des taches noires, de leur géographie et de leur évolution repose sur la qualité et l'efficacité de ce premier WP.

WP2/Le contexte de l'abside et son fonctionnement physico-chimique et biologique

Tâche 1 : Cartographie et microtopographie

- Disposer d'un support topographique 2D-3D précis et commun aux différents WPs.
- Proposer des supports topographiques du secteur étudié depuis les modifications engendrées par la mise en tourisme et après celle-ci.
- Créer des supports topographiques et cartographiques à très haute résolution spatiale (microtopographie) pour croisement des données issues des différents WPs.
- Disposer de supports graphiques permettant d'appréhender les connexions potentielles avec l'extérieur.
- Poser les bases d'une cartographie intégrant les différentes informations pariétales (géomorphologiques, biologiques, secteur orné...).

Tâche 2 : Microclimat de l'Abside

Dans le milieu oligotrophe et minéral de la grotte de Lascaux, l'hypothèse suivante est posée : les paramètres clés de l'écologie microbienne sont l'humidité et la source d'énergie. L'objectif de ce WP est de suivre sur des phases clés du fonctionnement hydro-climatique de la grotte, la dynamique de l'évolution des zones sombres (ZS) et des taches noires (TN) même s'il est illusoire de viser à une compréhension fine du contrôle direct d'un seul paramètre sur la dynamique de ces taches

À partir des dispositifs de mesures déjà en place dans cette partie de la cavité, il s'agit d'identifier quelques grandes phases hydro-climatiques ayant un impact potentiel sur l'humidité des parois et le taux de CO₂ (source de matière et d'énergie, lien avec la minéralisation de la calcite ? => lien WP5).

- La première phase serait une étude reposant sur des données existantes des grands types de fonctionnements hydro-climatiques (deux à trois périodes sur l'année : période humide ou sèche avec convection ou pas). En particulier on s'attachera à corréliser les modifications de circulation de l'air dans l'abside avec le régime convectif éventuel dans la grotte.
- La seconde phase visera un suivi sur ces différentes phases afin de lier ces grandes périodes à des dynamiques d'évolution des ZC et taches noires (calage des autres WP sur le calendrier défini par ce WP)

Les paramètres à suivre seront l'humidité dans l'air (si possible son effet en paroi), la pCO₂, la température et le radon (dynamique des échanges entre la cavité et le karst). Bien entendu,

les variations de la pression atmosphérique et de la température extérieure et leurs conséquences dans la grotte en termes thermique et aéraulique seront prises en compte. Concernant l'humidité des parois, sa mesure constitue un véritable défi scientifique et technique qu'il faudrait entreprendre peut-être avec des co-financements dédiés (MITI, CNRS).

Tâche 3 : Évolutions des zones sombres (ZS) et des taches noires (TN)

- Suivre statistiquement les ZS et les TN (% occurrence/surface : zones peintes ou pas), vitesse de progression des zones et caractérisation du caractère « sombre » des taches par spectrorimétrie.
- Établir la co-occurrence des ZS, des modifications d'aspect de surface (remobilisation du substrat – boulettes), du mucus, des taches noires se formant sur certaines zones sombres
- Cartographier les ZS dans l'Abside : si les parties basses (banquettes et plans inclinés) sont l'objet d'un suivi précis reporté sur des images issues de la photogrammétrie, les parties hautes plus difficilement accessibles ne font pas actuellement l'objet de suivi précis. Or elles représentent une surface importante.

Il importe de définir les modes de suivi permettant d'appréhender leur évolution éventuelle et d'évaluer de manière plus exhaustive leur évolution le cas échéant.

Tâche 4 : Biodiversité : microbiote et collemboles

- Suivre la biodiversité microbienne des zones avant et après apparition des ZS par une approche de métagénomique (suite du programme 'Écologie microbienne'), permettant de caractériser les fonctions microbiennes en relation avec les activités d'altération des parois.
- Caractériser l'interaction 'microbiote-paroi' sur des échantillons de paroi et par imagerie en microscopie électronique (MET et MEB).
- Suivre la dynamique des populations des collemboles. Impact de la baisse des effectifs de collemboles sur l'évolution des TN et des ZS (piégeage vs aspiration)

WP3/ États des parois et trajectoires d'évolution

Des données archéologiques à la prise en compte des évolutions de la grotte depuis sa découverte (modifications de l'entrée, de sols, aménagements...)

Tâche 1 : État des connaissances archéologiques et historiques de l'Abside

- Période préhistorique
 - État de connaissance des sols
 - État de connaissance des parois

- Période historique
 - Aménagements
 - Traitements
 - Perturbations (ex. Constat d'état)

Tâche 2 : Caractérisation des états de parois

Cartographie et Imagerie à haute résolution (lien avec Tâche 1)

- Cartographier la dynamique des états de paroi
- Suivre un transect dans cette zone

Tâche 3 : État physico-chimique des parois (résidus des traitements chimiques) et calcite néoformée

Historique des traitements chimiques et physiques/décapages des argiles couvrant des peintures dans l'Abside (en quoi ont-ils été différents/ par rapport au reste de la grotte ?)

Sachant que l'Abside a subi les mêmes traitements chimiques que les autres parties de la grotte entre 2001 et début 2003 (6000 L de solution, dont environ 600 L de Vitalub pur pour toute la grotte). En janvier 2008, seule la partie droite de la cavité a été retraitée (Passage, Abside, Nef) avec le Dévor'mouss (chlorures et isothiazol, appliqué en 3 passages sur 3 jours, environ 90 L de solution).

Analyses *in situ* : méthodes non-invasives hyperspectrales :

Approche expérimentale dans un premier temps (s'assurer de la capacité à détecter les molécules cibles au laboratoire) et application sur quelques surfaces *in situ* pour discuter leur faisabilité (couplage caméra hyperspectrale (images) et détecteur SWIR, pourquoi pas fluorimétrie à tester (ponctuels).

Essai de reconstitution de l'évolution chimique de la paroi depuis les traitements.

Tâche 4 : Coordination et synthèse des trois tâches (qui doivent se nourrir mutuellement)

En particulier, tenter d'établir des corrélations entre la 'diversité' de la composition chimique des autour des ZS et des TN et la biodiversité microbienne.

WP4/ Évaluation du degré de généralisation possible des observations réalisées à l'Abside

L'évaluation de la généralisation des observations dans l'Abside pourra être réalisé dans la **Nef** avec un **dispositif plus léger**. La proposition de cette zone repose sur des résultats antérieurs (Volets 1a et 2a du Programme 'Écologie microbienne') montrant à la fois une proximité et des différences avec l'Abside sans oublier une accessibilité relativement bonne de cette partie de la grotte pour les intervenants.

« Sur les plans inclinés hauts de l'Abside, les zones sombres se développent de manière linéaire dans le temps, indépendamment des fluctuations saisonnières, et actuellement elles se développent aussi, et de manière très importante, dans plusieurs autres salles de Lascaux (notamment la **Nef**, le Passage, la Salle des Taureaux et le Sas-2) et sur différents types de surfaces minérales » (Volet 1a).

« Par comparaison avec les surfaces saines, les taches noires de la **Nef** présentent un potentiel génétique enrichi (i) en grandes catégories de fonctions liées à l'adaptation au milieu et à la

résistance aux composés antimicrobiens, et (ii) en gènes de dégradation des composés aromatiques. » (Volet 2a)

Tâche 1 : Identification des secteurs avec des dynamiques de colonisation différentes

Dans la zone sélectionnée, tenter d'identifier des secteurs permettant de tester des paramètres spécifiques, par exemple :

- Secteur avec une dynamique microbiologique équivalente et un autre substrat géologique
 - Secteur avec une dynamique microbiologique différente sur le même substrat géologique
 - Secteur avec une dynamique équivalente dans d'autres conditions microclimatiques
- *Il est peu probable qu'un tel « plan d'expérience » soit réalisable intégralement.*

Une des questions sous-jacentes est : l'extension des ZS correspond-elle à un retour à l'équilibre ?

Puis sur ces secteurs : reprise des méthodes et co-relations établies dans l'Abside

Tâche 2 : Analyse de la biodiversité : microbiote et collemboles

- Suivre la biodiversité microbienne des zones avant et après apparition des ZS par une approche de métagénomique, permettant de caractériser les fonctions microbiennes en relation avec les activités d'altération des parois.
- Caractériser l'interaction 'microbiote-paroi' sur des échantillons de paroi et par imagerie en microscopie électronique (MET et MEB).

Tâche 3 : Caractérisation des états de parois

Cartographier la dynamique des états de paroi

Suivre un transect dans cette zone

Tâche 4 : État physico-chimique de parois (résidus des traitements chimiques)

Historique des traitements chimiques et physiques/décapages des argiles couvrant de ces secteurs

Tâche 5 : Synthèse des éléments clés de ces différents écosystèmes microbiologiques