



HAL
open science

Grottes ornées paléolithiques : espaces naturels, espaces culturels, art et déterminisme. L'apport des modélisations, l'exemple de Lascaux et de Cussac

Armance Jouteau

► To cite this version:

Armance Jouteau. Grottes ornées paléolithiques : espaces naturels, espaces culturels, art et déterminisme. L'apport des modélisations, l'exemple de Lascaux et de Cussac. Archéologie et Préhistoire. Université de Bordeaux, 2021. Français. NNT : 2021BORD0088 . tel-03482473

HAL Id: tel-03482473

<https://theses.hal.science/tel-03482473>

Submitted on 16 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.

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR
DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET ENVIRONNEMENTS
SPÉCIALITÉ PRÉHISTOIRE

Par Armance Jouteau

Grottes ornées paléolithiques : espaces naturels, espaces culturels, art et déterminisme.

L'apport des modélisations, l'exemple de Lascaux et de Cussac

Sous la direction de Jacques Jaubert et Delphine Lacanette

Et sous l'encadrement de Valérie Feruglio

Soutenue le 26/03/2021

Membres du jury

Sophie A. de Beaune	Professeure, Université Lyon 3	Rapporteur
Vincent Gibiat	Professeur Emérite, Université Toulouse 3 – Paul Sabatier	Rapporteur
Pablo Arias	Profesor, Universidad de Cantabria	Président
Stéphane Jaillet	Ingénieur de recherche, Université Savoie Mont Blanc	Examinateur
Éric Robert	Maître de conférence, Muséum National d'Histoire Naturelle	Examinateur
Jacques Jaubert	Professeur, Université de Bordeaux – PACEA	Directeur
Delphine Lacanette	MdC - HDR, Bordeaux INP – I2M	Directrice
Valérie Feruglio	Université de Bordeaux – PACEA	Invitée

Grottes ornées paléolithiques : espaces naturels, espaces culturels, art et déterminisme. L'apport des modélisations, l'exemple de Lascaux et de Cussac

Résumé

Les grottes ornées sont des espaces naturels extrêmement stables qui ont nécessairement contraint les Préhistoriques à sélectionner et/ou adapter leurs activités souterraines aux caractéristiques du site élu. Comprendre la perception qu'ils avaient dudit site devient alors un élément clé pour en interpréter l'occupation paléolithique. Les simulations numériques sont apparues comme l'outil idéal pour investir la question de la perception paléolithique des cavités ornées. En effet, non seulement ils permettent de reproduire des phénomènes qui ne se conservent pas, tels le son ou la lumière, mais ils produisent, à partir de données entièrement calibrées, des résultats reproductibles. Il est aussi possible d'utiliser des modèles 3D reconstituant la morphologie considérée comme celle connue par les Paléolithiques, pourtant physiquement perdue depuis.

Nous nous sommes intéressés aux modalités de l'investissement du monde souterrain par les Hommes du Paléolithique au travers de deux exemples : les grottes ornées de Cussac et de Lascaux (Dordogne), aux contextes archéologiques complémentaires. À Cussac, nous ne bénéficions que d'une portion du modèle 3D et celui-ci reproduit uniquement la morphologie actuelle, mais la présence d'une équipe pluridisciplinaire (PCR Cussac, dir. J. Jaubert) et l'attention portée à sa préservation ont permis d'obtenir des données sur le contexte archéologique. À l'opposé, la grotte de Lascaux a vu une grande partie de ses sols détruits, rendant impossible la contextualisation de nombre de ses vestiges. Cependant, la grotte bénéficie d'une reconstitution 3D complète, retravaillée pour proposer plusieurs états : actuel, de la découverte (en 1940), et lors des incursions paléolithiques (projet MicroPaGO, dir. D. Lacanette).

Afin d'analyser l'appréhension du milieu souterrain par les Préhistoriques, nous avons choisi de mettre en place des outils de simulations numériques d'acoustique et d'éclairage. Encore peu utilisés dans l'analyse du contexte karstique, ces outils ont nécessité une approche fondamentalement innovante et rigoureuse avec l'enregistrement d'un maximum de paramètres physiques pour chacune des grottes étudiées. Des expérimentations ont été réalisées afin de reproduire des exemples d'éclairages préhistoriques et d'en mesurer les spectres et éclairages, tandis que pour connaître les facteurs de réflexion des parois et les coefficients d'absorption acoustique des matériaux en jeu, des mesures sur échantillons, et/ou dans des grottes ont été mises en place.

Ces paramètres ont ensuite été intégrés aux logiciels Phanie et Icare, permettant respectivement de simuler des éclairages et des sons dans un modèle 3D. Nous avons ainsi pu, par exemple, éprouver la complémentarité entre les lampes à graisse et les torches selon les situations : à Cussac, l'exploration de vastes espaces a pu davantage bénéficier de la forte puissance et de la mobilité des torches tandis qu'à Lascaux, où les parois sont plus réfléchissantes et les espaces moins étendus, l'utilisation de lampes à graisse semble plus efficace. Il a également été possible de montrer l'intérêt de l'écholocation dans ce contexte, ou encore d'analyser les qualités acoustiques de la grotte de Cussac qui semble être un lieu particulièrement adapté à la parole, avec une faible réverbérance mais une excellente intelligibilité. Ces quelques exemples, non exhaustifs, nous ont permis de valider l'intérêt des simulations numériques dans la compréhension de la perception, de l'appréhension et de l'occupation de l'espace souterrain par les sociétés préhistoriques.

Mots clés : Grottes ornées paléolithiques, Dispositif pariétal, Écholocation, Acoustique, Éclairage, Simulations numériques

Palaeolithic decorated caves: natural spaces, cultural spaces, art and determinism. Modeling contribution on the Lascaux and Cussac examples

Abstract

Decorated caves are extremely stable environments that have required Prehistoric People to select and/or to adapt their underground activities to the characteristics of the chosen site. Understanding their perception of the site then becomes a key element in interpreting its Palaeolithic occupation. Numerical simulations have emerged as the ideal tool to explore the question of the Palaeolithic perception of decorated caves. In fact, not only do they make it possible to reproduce phenomena that could not have been preserved, such as sound or light, but they also produce reproducible results from fully calibrated data. It is also possible to use 3D models reproducing a morphology considered to represent the one known by the Palaeolithic, although physically long lost.

We decided to investigate the ways in which Palaeolithic People invested the subterranean world in the decorated caves of Cussac and Lascaux (Dordogne), whose archaeological contexts are complementary. In Cussac cave, we only have a portion of the 3D model, and it only reproduces the current morphology, but the presence of a multidisciplinary team (PCR Cussac, dir. J. Jaubert) and the attention paid to its preservation have enabled us to obtain data for the archaeological context, while the Lascaux cave has seen a large part of its grounds destroyed, making it impossible to contextualise many of its artefacts. However, the cave benefits from a complete 3D reconstruction, reworked to offer several states: current, of the discovery (in 1940), and during the Palaeolithic incursions (MicroPaGO project, dir. D. Lacanette).

In order to analyse how the Prehistoric People understood the underground environment, we have chosen to set up numerical simulation tools for acoustics and lighting. These tools, still little used in the analysis of the karstic context, required a fundamentally innovative and rigorous approach with the recording of a maximum of physical parameters for each of the caves. Experiments were carried out in order to reproduce examples of prehistoric lighting and to measure its spectra and illuminances. To find out the wall reflection factors or the acoustic absorption coefficient of the materials involved, measurements on samples and/or in caves were carried out.

These parameters were incorporated into Phanie and Icare, two software which enable the simulation of lighting and sound in a 3D model, respectively. For example, we were able to test the complementarity between grease lamps and torches depending on the situation: in Cussac, the exploration of large spaces benefited more from the high power and mobility of the torches, while in Lascaux, where the walls are more reflective and the spaces are smaller, the use of grease lamps seemed more efficient. It was also possible to show the interest of echolocation in this context, or to analyse the acoustic qualities of the Cussac cave which seems to be a place particularly suited to speech, with low reverberation but excellent intelligibility. Without any claim of exhaustivity, these examples have enabled us to validate the interest of numerical simulations in understanding the perception, apprehension and occupation of underground space by prehistoric societies.

Keywords: Palaeolithic decorated caves, Parietal arrangement, Echolocation, Acoustic, Lighting, Numerical simulations

Remerciements

Parce qu'un travail de recherche est toujours le fruit de collaborations et d'échanges, je souhaite ici remercier ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont laissé leur empreinte sur ce projet.

Je souhaite commencer par remercier ceux qui ont suivi ce travail au plus près, mes directeurs de thèse Jacques Jaubert et Delphine Lacanette, ainsi que Valérie Feruglio. Merci à vous d'avoir monté, porté, puis encadré ce projet. Merci pour votre confiance, votre bienveillance, et vos conseils. Jacques, merci infiniment de m'avoir transmis ta passion pour la Préhistoire, merci aussi de m'avoir fait confiance et de m'avoir donné l'opportunité d'intégrer l'équipe de Cussac. Valérie, merci d'avoir accepté de monter et d'encadrer mon mémoire de Master 2, dans un premier temps, puis d'avoir eu envie de poursuivre avec moi ce sujet de thèse. Merci de l'intérêt que tu portes à mon travail, de ton suivi, et de tes conseils. Enfin, Delphine, merci d'avoir fait confiance à Jacques et Valérie et d'avoir accepté de porter ce travail, auquel tu as énormément apporté. Ta bienveillance, ton optimisme et ta présence ont été indispensables pour mener à bout ce projet.

J'exprime ma reconnaissance envers les professeurs Sophie Archambault de Beaune et Vincent Gibiat pour avoir accepté de rapporter ce travail, ainsi que Pr. Pablo Arias, Stéphane Jaillet et Éric Robert, pour leur participation au jury de cette thèse.

Je tiens à remercier l'ensemble du PCR Cussac pour leur accueil au sein de l'équipe. En particulier, mes pensées vont à Camille Bourdier pour avoir accompagné mes premiers pas sous terre et dans la recherche, à Jean-Christophe Portais et Patrice Buraud pour leur accompagnement, leur disponibilité, leurs conseils aussi, à Pascal Mora et Bruno Dutailly, qui se plient en quatre (littéralement) pour nous fournir des modèles 3D de qualité, à Nathalie Fourment et Lysianna Ledoux, c'est toujours un plaisir de parcourir la grotte avec vous, et enfin à Hubert Camus pour les cartes topographiques.

Merci à Delphine Lacanette pour m'avoir accueillie au sein du projet MicroPago et m'avoir proposé d'assister aux séances de travail. Merci également à l'ensemble des membres du projet de m'avoir intégrée à vos discussions.

J'exprime également toute ma gratitude envers Mathieu Langlais et Sylvain Ducasse pour m'avoir permis de participer au projet LAsCO.

Merci également au projet CarMoThaP et à la responsable et porteuse dudit projet, Catherine Ferrier, pour nous avoir ouvert l'accès à la grotte de Leye et à la carrière de Lugasson, et nous avoir autorisé à y réaliser toutes les manipulations dont nous avons besoin.

Toute ma gratitude va ensuite à Iégor Reznikoff, qui nous a accompagné sous terre, à Cussac, où nous avons pu bénéficier de son expertise pour l'étude acoustique de la grotte. I. Reznikoff nous a également joint à la Maison Bordes qu'il a fait vibrer de son timbre pour notre plus grand plaisir.

J'adresse ensuite mes remerciements envers toutes celles et ceux qui ont participé de près ou de loin à la mise en place des outils de simulations. Merci, en premier lieu, à Nicolas Noé et Samuel Carré pour m'avoir formé aux logiciels *ICARE* et *PHANIE*, pour avoir toujours répondu présent lorsqu'un problème se présentait, et de manière générale, pour leurs conseils, leur aide précieuse, leur disponibilité et leur patience ! Sans vous ce projet n'aurait jamais pu aboutir. Merci aussi à tous ceux qui ont apporté leur expertise, leur matériel, leurs compétences et leur temps : à Dominique Lafon et Stéphane Konik pour les prises de mesures au spectroradiomètre, à Thibaut Blinet pour les mesures au tube de Kundt, à Pascal Mora pour les photographies, à Eugène Morin pour ses conseils sur la graisse à utiliser, à Mathieu Langlais et l'équipe de chasse de Jumilhac le grand (24) pour la graisse de cerf, à Éric Vigoureux pour la graisse de cheval et à Jean Claude Leblanc et Catherine Ferrier pour l'apport des autres matières premières ainsi que la mise à disposition d'un local où préparer nos expérimentations. Un grand merci également à Juliette, Jennifer et Océane, pour m'avoir aidé dans la reproduction de luminaires paléolithiques.

Je souhaite ensuite remercier les institutions et les femmes et les hommes derrière elles qui ont rendu ce projet possible :

L'Université de Bordeaux, qui m'a accueillie et soutenue financièrement.

L'École Doctorale Sciences et Environnement, qui a su nous soutenir et répondre à nos questionnements, y compris en période de crise sanitaire. En particulier, mes remerciements vont à Frédéric Garabettian et Brigitte Bordes.

Les membres de mon comité de suivi de thèse individuel, Bruno Bousquet, Catherine Ferrier et Marc Groenen pour vos conseils et votre intérêt envers ce projet.

Le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) pour avoir accepté de me former et de me laisser utiliser des outils de simulations développés dans leur centre. Je souhaite notamment remercier Alexandre Jolibois pour avoir été notre premier interlocuteur.

Enfin, je souhaite remercier M. André Barbé, Directeur Général de la Sémitour pour avoir accepté de nous ouvrir ponctuellement les portes du fac-similé Lascaux IV, Centre

International de l'Art Pariétal, en-dehors des horaires des visites, ainsi que Denis Tauxe pour nous avoir accompagnés sur le site.

Bien entendu, le laboratoire PACEA et l'ensemble de ses membres ont aussi toute ma gratitude. Je pense en particulier à la direction, Anne Delagnes, Christine Couture et Catherine Morel-Chevillet, mais aussi aux gestionnaires Nathalie Kellay, Graziella Chaminaud, Audrey Laborde et Régine Wortmann. Je souhaite également remercier Arnaud Robin pour m'avoir fait un super pc :P , Éric Pubert pour son aide constante et sa bonne humeur, ainsi que Frédéric Santos pour son aide précieuse avec l'outil statistique... Et merci à tous les chercheurs dont j'ai pu croiser la route et qui, d'une manière ou d'une autre, m'ont aidé à grandir, en tant que chercheuse et en tant qu'être humain.

Je remercie à présent l'ensemble de mes collègues enseignants à l'UF STE qui ont accompagné mes premiers pas dans l'enseignement à l'Université. Mes pensées vont à Antoine Marache qui a toujours été à l'écoute de mes besoins et possibilités, à Hervé Gillet et Alexandra Coynel pour leurs conseils et leur accueil au sein de l'UE 104, à Nadia Sénéchal, Catherine Ferrier et Jacques Jaubert pour avoir eu suffisamment confiance pour me déléguer des enseignements, et à Antoine, pour ses conseils et son humour.

Je tiens à présent à saluer mes collègues doctorants, post-docs et autres précaires de l'ESR : Lysianna, Mathieu, Daniela, Camille, Marion, Monica, Erwan, Aline, Quentin, Anaïs, Alexander, Fabien, Jack, Aitor, Luc, Eline, Laura, Flora, Claire-Élise, Corentin. Merci d'avoir été là. Évoluer dans un cadre bienveillant, comme je crois nous avons réussi à créer, est tellement important pour surmonter les périodes de doute et de peine.

À mes amis, Benoit, Coralie, Eugène, Flavie et Valentin, Geneviève et Théo, Jérémy et Olivia, Jules, Juliette, Madeleine, Mathilde et Axel, Marine, Noémie et Nicolas, Poulpy, Samantha, Smourbiff, Thomas, et à tous ceux que je n'ai pas cités car faire une liste exhaustive aurait pris toute la page, Merci. Merci pour votre soutien, vos encouragements, merci d'y avoir cru, et merci de m'avoir changé les idées ! Et mention spéciale à celle qui m'a aidé à me lever le matin (Geneviève), à celle qui a partagé mes pauses repas (Noémie) et à celui qui a partagé mes moments d'errance (Benoit) pour votre soutien sans faille.

Enfin, mes pensées vont à ma famille, qui m'a toujours encouragée et sur qui j'ai pu me (re)poser. Votre soutien, toutes ces années durant, a été un facteur indispensable au bon déroulement de cette thèse. Je ne vais pas tous vous citer, mais tout d'abord, merci à Liliane d'avoir balisé le chemin. Merci à ma « très chère sœur » d'être partie à la chasse aux virgules

mal placées et autres s manquants, à Rayan, Éléa et Armel pour les « bichonades », à Christine et Manu pour les pauses thé et les bons repas, à Mamie pour les gâteaux et à Papy pour les œufs, à Louise pour la déco de mon bureau (je suis sûre d'avoir fait des jaloux) et à Arthur pour ses sourires. Maman, Papa, je pense bien sûr à vous aussi, mais je ne sais pas comment vous dire merci. Merci de m'avoir transmis votre amour de l'Histoire, votre esprit critique, votre ouverture d'esprit ? Merci pour votre bienveillance et vos encouragements ? Ces mots paraissent bien faibles comparés à ce que vous m'avez apporté...

Enfin, Déthié, merci pour tout.

Louise, Arthur, Aéllys, c'est pour vous, et pour ceux qui ne sont pas encore là.

L'important n'est pas de savoir lire mais de savoir ce qu'on lit, de raisonner sur ce qu'on lit, d'exercer un esprit critique sur la lecture. En dehors de cela, la lecture n'a aucun sens.

Jacques Ellul

Table des matières

~ Introduction ~	1
Origine du projet	3
Objectifs	5
Structure du manuscrit	6
~ Partie 1 ~ Fondements de l'étude	9
Chapitre 1 – État de l'art	11
A. Historique.....	12
1. Les premières études	12
2. Découverte d'un espace structuré	14
3. Des approches multiples	16
a) Le rapport entre l'œuvre et son support.....	17
b) La perception du monde souterrain	19
c) Destinataire(s) de la construction graphique	23
B. État actuel des recherches	25
1. L'essor des études sur l'organisation spatiale.....	26
2. Nouveaux outils.....	28
3. L'apport des simulations	31
Chapitre 2 – Le corpus de sites	35
A. La grotte de Cussac	36
1. Description physique de la cavité.....	37
2. Contexte archéologique	40
3. Moyens et outils d'études.....	44
B. La grotte de Lascaux.....	46
1. Description géologique de la cavité	46
2. Contexte archéologique	48
3. Problématique conservatoire et recherches actuelles	52
C. La grotte de Leye.....	54
1. Description physique de la cavité.....	54
2. Une grotte laboratoire	56
3. Une grotte entièrement modélisée et partiellement texturée	57
D. Le site expérimental de Lugasson	59
1. Description de la carrière	59
2. Un site expérimental	60
3. Modèles 3D	61
Chapitre 3 – Matériel et méthode	65
A. Méthode de travail	66
1. Problématique.....	66
2. Méthode.....	67
a) Sélection des sites	67
b) Outils de simulation numérique	68
3. Terminologie	69
a) L'Art	69
b) L'Œuvre	70
c) De l'entité graphique au dispositif pariétal	70

d)	Dispositif pariétal ou dispositif iconographique	72
B.	Documents de travail	73
1.	Modèles 3D	73
a)	Cussac	73
b)	Lascaux	75
c)	Leye	76
2.	Configuration informatique	76
3.	Accès aux sites	77
a)	Cussac	77
b)	Lascaux	77
c)	La grotte de Leye et la carrière de Lugasson	78
~ Partie 2 ~ Mise en place des outils de simulation		81
Chapitre 1 – Phanie, logiciel de simulation d’Éclairage		83
A.	Phénomènes impliqués	84
1.	La lumière	84
a)	La direction de propagation	84
b)	La répartition spectrale	85
c)	Unités de puissance	86
2.	Le récepteur : l’œil humain	87
B.	Le logiciel <i>Phanie</i>	89
1.	Besoins initiaux	89
2.	Données d’entrée	90
a)	Les sources d’éclairage	90
b)	Les matériaux	91
c)	L’écran	92
3.	Fonctionnement du logiciel	93
a)	Le modèle d’illumination élémentaire	94
b)	Le suivi de chemin avec cache	95
c)	La carte de photons	96
d)	La radiosité	96
e)	Conclusions	97
4.	Données de sortie	99
5.	Conclusion	100
C.	Caractérisation spectrale des matériaux	102
1.	Protocoles des mesures	102
a)	Mesures en laboratoire	102
b)	Mesures in situ	105
2.	Résultats des mesures	111
a)	Directivité des matériaux	111
b)	Mesures en laboratoire	111
c)	Mesures à Cussac	113
d)	Mesures à Lugasson	114
3.	Discussion	115
a)	Correction spectrale du modèle 3D de Cussac	115
b)	Correction spectrale du modèle 3D de Lascaux	115
D.	Les sources d’éclairages mobiles paléolithiques : expérimentations	117
1.	Protocole de fabrication des lampes à graisse	118
a)	Analyse des vestiges archéologiques	118
b)	Expérimentations précédentes	120
c)	Récolte des matières premières	122
d)	Creusement des cuvettes	128
e)	Procédé d’allumage et d’entretien	130

f)	Comparaison et sélection des mèches pour les mesures.....	133
g)	Dimensions des mèches	136
h)	Comparaison et sélection des graisses pour les mesures	137
i)	Présentation des lampes mesurées.....	139
j)	Discussion	139
2.	Protocole de fabrication des torches	141
a)	Revue de la littérature	141
b)	Choix et récolte des matières premières.....	144
c)	Modalités générales de fabrication	147
d)	Dimension des brins	148
e)	Dimension des torches	149
f)	Présentation des torches mesurées	152
g)	Discussion	153
3.	Reproductions en milieu souterrain.....	154
a)	Déplacement	154
b)	Stationnement.....	156
c)	Discussion	158
4.	Perspectives	158
E.	Les sources d'éclairages mobiles paléolithiques : mesures	161
1.	Protocole des mesures.....	161
a)	Installation du matériel	161
b)	Mesures réalisées	165
2.	Mesures d'éclairage sur lampes à graisse	166
a)	Mesures ponctuelles	166
b)	Mesures continues	168
c)	Discussion	169
3.	Mesures d'éclairage sur torches	169
a)	Mesures ponctuelles	169
b)	Mesures continues	171
c)	Discussion	174
4.	Données spectrales	175
a)	Lampes à graisse.....	175
b)	Spectres des torches.....	178
5.	Discussion.....	180
a)	Les lampes à graisse	180
b)	Les torches.....	180
c)	Conclusion	181
F.	Choix des luminaires intégrés dans <i>Phanie</i>	182
1.	Comparaison des matériaux.....	182
a)	Cussac.....	182
b)	Lascaux	185
c)	Conclusion	187
2.	Influence du spectre de l'éclairage	187
a)	Résultats	188
b)	Conclusion	190
3.	Éclairages intégrés à <i>Phanie</i>	190
a)	Lampes à graisse.....	190
b)	Torches	191
4.	Conclusion	192
Chapitre 2 - <i>Icare</i>, logiciel de simulation acoustique		195
A.	Phénomènes impliqués.....	196
1.	Le son	196

2.	Propriétés du son	197
3.	Fonctionnement de l'oreille humaine	199
4.	L'acoustique architecturale	201
B.	Le logiciel <i>Icare</i>	202
1.	Besoins initiaux	202
2.	Données d'entrée	203
3.	Fonctionnement du logiciel	204
4.	Données de sortie	206
C.	Choix et méthode d'obtention des données d'entrée	207
1.	Enregistrements anéchoïques	207
2.	Le récepteur	208
3.	Propriétés acoustiques des matériaux	209
D.	Mesures des propriétés acoustiques des matériaux	210
1.	Mesures au tube de Kundt	210
a)	Fonctionnement du tube de Kundt	210
b)	Description des éprouvettes	211
c)	Mise en place des mesures	214
d)	Résultats	215
e)	Observations	216
2.	Mesures des Réponses Impulsionnelles (RI) et des Temps de Réverbération (TR)	218
a)	Matériel utilisé	220
b)	Localisation des mesures	220
c)	Résultats des mesures – grotte de Leye	226
d)	Résultats des mesures – grotte de Cussac	229
e)	Discussion	237
E.	Calibration du logiciel	238
1.	Sélection des secteurs étudiés	238
2.	Intégration des coefficients d'absorption	238
3.	Comparaison des TR simulés et des TR de terrain	239
4.	Ajustement des coefficients d'absorption	240
5.	Coefficient d'absorption pour Lascaux	242
6.	Discussion	243

~ Partie 3 ~ Envisager l'humain dans son contexte, L'apport des simulations247

Chapitre 1 – La grotte de Cussac249

A.	Fondements archéologiques	249
1.	Historique des interventions	249
a)	La découverte	249
b)	Mise en place des mesures conservatoires	250
c)	Projets actuels	251
2.	Projet personnel	252
a)	Organisation du dispositif pariétal	252
b)	Problématique	254
B.	Cussac au Gravettien	256
1.	Contexte actuel	256
a)	Structuration du réseau	259
b)	Géologie	260
c)	Répartition des zones graphiques et vestiges archéologiques	261
2.	Évolution de la cavité	262
a)	L'entrée de la grotte	262
b)	Évolution des sols	264
c)	Évolution des parois	265
d)	Présence des spéléothèmes	265

e)	Conclusions.....	266
3.	Détail du secteur modélisé.....	266
C.	Se déplacer.....	271
1.	Traces paléolithiques anthropiques et cheminement actuel.....	272
a)	Amont du Panneau de la Découverte.....	272
b)	Autour du Panneau du Pont d'Argile.....	274
c)	Le méandre inférieur 5Av.....	275
d)	Locus 1-2, By-pass, et piste des ours.....	276
e)	Conclusions.....	277
2.	Simulations d'éclairages.....	277
a)	Secteur du Panneau de la Découverte.....	278
b)	Secteur du Panneau du Pont d'Argile.....	283
c)	La Mezzanine.....	285
d)	Galerie vers les locus.....	287
e)	Discussion.....	289
3.	Écholocalisation.....	293
a)	Méthode.....	294
b)	Résultats.....	295
c)	Interprétation.....	297
d)	Conclusion.....	300
D.	L'observation du monde souterrain.....	301
1.	Le Panneau de la Découverte (2D1).....	301
a)	Champs de visibilité du Panneau de la Découverte (2D1).....	303
b)	Observation du panneau.....	310
c)	Création du panneau.....	311
E.	Propriétés acoustiques de la grotte de Cussac.....	314
1.	Invitation de Iégor Reznikoff.....	315
a)	Méthode.....	315
b)	Résultats.....	315
c)	Conclusions.....	317
2.	Mesures sur le terrain.....	318
a)	Méthode.....	318
b)	Mesures du Temps de Réverbération.....	319
c)	Mesures du D50.....	321
d)	Mesures du C80.....	322
e)	Conclusions.....	324
3.	Simulations.....	326
a)	Comparaison entre C80 et D50 mesurés et simulés.....	326
b)	Calculs des TR, D50 et C80 dans le modèle 3D.....	329
4.	Discussion.....	334
Chapitre 2 - La grotte de Lascaux		337
A.	Historique des recherches et problématiques.....	337
1.	Les temps de la découverte (1940-1948).....	337
a)	Modifications du site.....	337
2.	Quand visites touristiques et relevés se côtoyaient (1948-1963).....	338
a)	Travaux d'aménagements.....	338
b)	Le travail de l'abbé Glory.....	339
3.	Protéger Lascaux.....	340
4.	Étudier Lascaux.....	341
5.	Questions de recherche.....	342
B.	Lascaux, le contexte physique.....	344
1.	Considérations générales.....	344

2.	L'Entrée	346
3.	La Salle des Taureaux	349
4.	Le Diverticule Axial	350
5.	Le Passage	352
6.	La Nef	354
7.	L'Abside	356
8.	Le Puits	357
	a) L'accès	357
	b) Les sols.....	357
9.	Conclusion	359
C.	Influence de l'éclairage sur la distinction des couleurs	360
1.	Méthode.....	361
2.	Résultats.....	362
	a) Panneau des Chevaux Chinois – Vache Rouge à Tête Noire et Troisième Cheval Chinois	362
	a) Panneau de la Vache Tombant – Vache Rouge et Noire et Frise de Chevaux.....	365
	b) Panneau de la Vache Tombant – diptyque des Bouquetins Affrontés.....	368
	c) Panneau du Grand Taureau Noir –Taureau Noir, Vaches Rouges et Protomés d'Aurochs Jaunes	371
3.	Discussion.....	374
D.	L'accès au Puits	377
1.	Méthode.....	377
2.	Simulations à l'extrémité distale de l'Abside	380
	a) Simulations d'éclairages	380
	b) Auralisations	381
3.	Simulations à l'entrée du conduit	381
	a) Simulations d'éclairages	381
	b) Auralisations.....	382
4.	Simulations au bord du décrochement.....	382
	a) Simulations d'éclairages	382
	b) Auralisations.....	383
5.	Conclusions	384
E.	Étude acoustique de Lascaux	385
1.	Influence de l'évolution de la morphologie sur l'acoustique	386
	a) Méthodologie	386
	b) Temps de Réverbération (TR).....	387
	c) Clarté (C80) et Définition (D50) du son	389
	d) Conclusion	390
	e) Perspectives.....	391
2.	Analyse des qualités acoustiques de quelques secteurs de Lascaux	391
	a) Méthodologie	391
	a) Temps de réverbération (TR)	394
	b) Clarté du son (C80)	395
	c) Définition du son (D50)	396
	d) Conclusion	398
	e) Perspectives.....	398

~ Synthèse et discussion ~401

Apports méthodologiques405

A.	Étapes nécessaires à la validation des modèles.....	405
1.	Sources d'éclairages et de sons.....	405
2.	Caractérisation des matériaux	406
	a) Mesures spectrales pour Phanie	407
	b) Mesures d'absorption acoustique.....	407

3.	Nécessité de la validation du modèle	408
4.	La réception des simulations.....	408
B.	L'apport de l'expérimentation	410
C.	Potentiels et limites des outils de simulations numériques	411
1.	Potentialités	411
2.	Moyens nécessaires	411
3.	Limites	412
D.	Perspectives	414
Perception et investissement du milieu souterrain, l'apport des simulations numériques,		
l'exemple de Lascaux et de Cussac		417
A.	Comment se déplacer sous terre ?	417
1.	Utilisation de l'éclairage	417
2.	Apport de l'écholocalisation	418
3.	Perspectives	419
B.	Éclairage et choix graphiques	420
1.	Le cas du Panneau de la Découverte.....	420
2.	Les couleurs de Lascaux	421
3.	Perspectives	422
C.	Acoustique des sites.....	423
1.	Considérations méthodologiques	423
2.	Deux cavités à l'effet sonore différent	424
3.	Perspectives	425
D.	Deux grottes, deux mondes	426
1.	Un usage différent des lampes à graisse et des torches	427
2.	La grotte « sanctuaire » de Cussac.....	428
3.	Le cas Lascaux	429
Perspectives.....		431
Conclusion		432
~ Bibliographie ~		435
~ Annexes ~		463
Annexe 1 – Calibration des dimensions des brins des torches		465
Annexe 2 : Présentation des torches utilisées dans la carrière de Lugasson		468
A.	Organisation des torches	468
B.	Description et dimensions des torches.....	468
1.	T 9.....	468
2.	T 10.....	468
3.	T 11.....	469
Annexe 3 : Influence du spectre des lampes à graisse sur la perception visuelle		470
Annexe 4 : Photographies des échantillons envoyés pour carottage puis mesures au tube de kundt		471
A.	Échantillons de Lascaux	471
B.	Échantillons de Cussac	474
C.	Échantillons de Leye.....	476
D.	Échantillons de calcite.....	478
E.	Échantillons d'argile	480
Annexe 5 : Mesures au tube de Kundt complètes		481
A.	Mesures sur calcaires de Lascaux	481

B.	Mesures sur calcaires de Cussac	483
C.	Mesures sur calcaires de Leye	484
D.	Mesures sur l'argile	485
Annexe 6 : Fiches d'identité des réponses impulsionnelles de la grotte de Leye		486
Annexe 7 : Temps de réverbération T30 par tiers d'octave des mesures réalisées À Cussac.....		488
A.	Première campagne de mesures (Tableaux 39 et 40).....	488
B.	Seconde campagne de mesures (Tableaux 41, 42 et 43).....	490
Annexe 8 : Simulations de sons dans le modèle 3D de la grotte de Lascaux selon trois hypothèses de coefficients d'absorption acoustique		493
Annexe 9 : Articles publiés en premier auteur		494
Annexe 10 : Simulations d'images pour l'analyse des déplacements dans Cussac		495
Annexe 11 : Auralisations de l'expérience d'écholocation.....		496
Annexe 12 : Résultats de l'expérience d'écholocation.....		497
Annexe 13 : Simulations d'images dans le cadre de l'Observation du Panneau de la Découverte (Cussac)		498
Annexe 14 : Simulations d'images dans le Diverticule Axial (lascaux)		499
Annexe 15 : Simulations d'images pour l'analyse de la Visibilité de l'accès au Puits (Lascaux) ..		500
Annexe 16 : Auralisations pour l'accès au Puits (Lascaux)		501

Sauf mention contraire, les figures sont de l'auteur

~ Introduction ~

Salle d'exposition, atelier d'artiste, lieu de culte ou de rituels, la grotte ornée a pu, au fil du temps, remplir ces différentes fonctions. C'est à nous qu'il revient de mettre en place la méthode appropriée pour comprendre comment les Préhistoriques ont appréhendé ce milieu si particulier.

Introduction

Les grottes ornées paléolithiques sont des espaces que l'on peut simultanément qualifier de naturels et de culturels, où l'Homme dialogue avec son environnement et le fait participer aux activités humaines (sacrées et/ou profanes). Nous retenons ce dialogue notamment pour son rôle dans la création du dispositif pariétal. De par sa nature immuable dans l'espace et dans le temps (à l'échelle humaine), l'espace interne des grottes a nécessairement imposé à l'Homme préhistorique une réflexion sur le choix des surfaces et des lieux investis, que ce soit dans le cadre de la réalisation d'œuvres pariétales ou du dépôt d'objets. Comprendre ces choix nous permettrait de mieux appréhender l'interaction entre l'Homme et le milieu souterrain : quels sont les termes de l'interface naturel/culturel ? Les Hommes préhistoriques ont-ils imposé leur monde plastique ou ont-ils souhaité traduire leur ressenti de cet espace ? La localisation des graphismes a-t-elle été pensée pour marquer le lieu, se l'approprier, le sanctuariser ou pour le présenter aux autres ?

Ces questions ont guidé notre réflexion et ont été le moteur de notre travail. Nous n'avons pas la prétention d'y répondre, mais souhaitons y contribuer à travers de nouvelles hypothèses et de nouveaux outils.

Origine du projet

Notre projet est le point de rencontre entre deux problématiques actuellement rencontrées dans l'étude de l'art pariétal.

La première approche qui nous intéresse porte sur la relation de l'Homme préhistorique avec le contexte interne des grottes ornées, dont l'intérêt, s'il n'est pas nouveau (p. ex. Rouzard, 1978, 1997), connaît une recrudescence depuis le début des années 2000. L'une des raisons pouvant être invoquée étant qu'une telle étude nécessite une approche interdisciplinaire par le croisement de méthodes et données de plusieurs domaines (paléospéléologie, éclairage, acoustique, art pariétal, traces d'activités, géologie et topographie). Or, la découverte dans les années 1990 et 2000 de sites majeurs (Chauvet-Pont d'Arc, Cussac) a permis de rassembler des équipes pluridisciplinaires – du moins sous d'autres formats et protocoles –, et donc les compétences nécessaires à ce type de recherche. En particulier, nos travaux trouvent leur origine dans l'étude de l'organisation du dispositif pariétal de la grotte de Cussac (Jouteau, 2016).

Introduction

La seconde concerne les contraintes conservatoires de ces milieux fragiles, qui peuvent sembler freiner le travail sur site. En effet, les vestiges préhistoriques sont extrêmement sensibles et peuvent être conservés dans les grottes profondes lorsque les conditions environnementales (température, humidité, taux de CO₂, ou encore configuration des courants d'air) sont suffisamment stables pour le permettre. Cependant, à chaque entrée dans une grotte, nous perturbons cet équilibre et pouvons accélérer leur inévitable disparition. À cela s'ajoute le risque d'effacer mécaniquement ces vestiges (par des frottements ou des écrasements par exemple). Ainsi, depuis le milieu du XX^{ème} siècle, et en particulier depuis la fermeture de la grotte de Lascaux en 1963, causée par des altérations liées à la trop importante fréquentation humaine, les entrées dans les grottes ornées sont de plus en plus limitées. Ces restrictions d'accès aux sites, à la fois dans le temps (pour maintenir l'équilibre de la cavité, les visites sont limitées à un certain nombre d'heures de présence par an) et dans l'espace (des cheminements balisés sont souvent mis en place afin d'éviter de piétiner les sols paléolithiques et les potentielles traces qui s'y trouvent) ont amené les préhistoriens à développer des méthodes d'étude qui soient non invasives, ou le moins possible. Récemment (depuis les années 90), des modèles 3D des grottes ornées sont réalisés, dans un premier temps dans un but conservatoire (en archivant l'aspect de la grotte à un instant T) ou de transmission au public (par la création de fac-similés), ils ont dans le même temps ou par la suite été réinvestis par les chercheurs. Désormais, ces trois objectifs sont couplés. Ces modèles 3D étant récents, nous manquons encore d'outils pour les exploiter à leur juste potentiel. C'est pourquoi l'une des vocations de ce projet est d'adapter des outils de simulations aux cadres naturels et conservatoires particulièrement exigeant des grottes ornées. Par conséquent, nous avons souhaité montrer l'intérêt des simulations dans le cadre de l'étude de la relation entre l'espace naturel et le dispositif pariétal (Aujoulat, 2002 ; Bourdier, 2013 ; Sadier, 2013).

Notre travail s'inscrit donc dans le prolongement de ces deux tendances actuelles de la recherche de l'art pariétal, à savoir, la compréhension de la relation des Hommes du Paléolithique supérieur avec le milieu souterrain et la mise en place et l'application de nouveaux outils permettant d'utiliser les modèles 3D comme un complément à l'exploration *in situ* des sites ornés. Parmi les champs d'étude nécessaires à l'analyse du contexte naturel et culturel des grottes ornées, l'investigation de l'influence de l'éclairage paléolithique (p. ex. Rouzaud, 1978 ; Pastoors et Weniger, 2011 ; Hoffmeister, 2017) et de l'acoustique du milieu karstique (p. ex. Reznikoff et Dauvois, 1988 ; Jiménez Gonzáles *et al.*, 2008) restent largement sous-étudiée

Introduction

comparée à l'étude du dispositif pariétal ou de la géologie, par exemple. C'est pourquoi nous avons précisément choisi cet angle d'approche.

En intégrant les grottes de Cussac (grotte ornée et sépulcrale du Gravettien moyen, env. 30 000 cal BP, Jaubert *et al.*, 2017) et de Lascaux (grotte probablement ornée lors de la phase de transition entre le Badegoulien et le Magdalénien, env. 21 000 cal BP, Ducasse et Langlais, 2019) à notre projet, nous nous plaçons dans la logique de l'avancée des recherches qui y sont menées. En effet, la grotte de Cussac, découverte en 2000, est étudiée depuis plus de dix ans par un Projet Collectif de Recherche (PCR Cussac, dir. J. Jaubert, 2008) et les différentes équipes qui y travaillent commencent à élaborer des projets innovants sur le plan méthodologique, notamment en investissant les modèles 3D qui y sont réalisés (Feruglio *et al.*, 2015). À Lascaux, ces dernières années ont vu la mobilisation d'équipes pluridisciplinaires dans l'objectif de mieux comprendre le contexte interne paléolithique de cette grotte ornée (projet MicroPaGO, 2014-2021, dir. D. Lacanette et PCR LAsCO, 2018-2021, dir. S. Ducasse et M. Langlais ; Lacanette *et al.*, 2018 ; Ducasse et Langlais, 2019) en s'appuyant sur le modèle 3D complet de la cavité (cabinet Perazio, 2012).

Objectifs

Notre ambition pour ce projet pourrait être résumée par la question suivante : **Comment les outils de simulations numériques de son et d'éclairage peuvent-ils nous aider à mieux comprendre le rôle joué par la caverne dans la construction du dispositif pariétal ?**

En particulier, cette question suggère deux champs d'action qui peuvent eux-mêmes se décliner en plusieurs volets.

Le premier consiste à mettre en place des outils de simulations adaptés au contexte karstique en s'appuyant sur une méthode de travail scientifique et rigoureuse. La problématique associée serait alors : **Comment adapter des outils de simulations d'acoustique et d'éclairage aux grottes ornées ?** Par la suite, il sera indispensable de réaliser un bilan : **Quelles sont les potentialités et limites de ces outils ? Quels sont les moyens (scientifiques, techniques, conservatoires, humains) nécessaires à leur mise en place ?** En effet, si aujourd'hui les phénomènes d'éclairage ou d'acoustique sont bien connus du point de vue de la physique, les

reproduire virtuellement dans un espace complexe reste un défi. De plus, nous manquons de données physiques à l'époque paléolithique concernant le milieu karstique d'une part, et les éclairages utilisés d'autre part, sans parler de l'acuité visuelle ou auditive des Hommes de ce temps.

Le second objectif est d'apporter des éléments quant au rôle joué par la cavité, l'acoustique des lieux, et l'éclairage dans les choix opérés par les Paléolithiques. La problématique, résumée par la question : « **Quelle est l'influence de la perception dans l'investissement du milieu souterrain ?** » peut être explorée à travers l'influence de l'éclairage (nature, nombre et localisation), de l'acoustique (réverbération et écholocalisation) et des contraintes topographiques sur les déplacements humains, les choix de localisation des ensembles graphiques, l'occupation et l'organisation générale des lieux.

Structure du manuscrit

Afin de répondre à nos problématiques, nous proposons d'articuler ce travail en trois parties.

La première est constituée par les **fondements de l'étude**. Le premier chapitre permettra de revenir sur *l'État de l'art*, nécessaire à la contextualisation de nos travaux. Le second chapitre sera dédié à la description de notre *Corpus de sites*. Enfin, le troisième et dernier chapitre de cette partie, *Matériel et méthode*, sera l'occasion de présenter notre approche, notre méthode, et nos documents de travail.

La seconde partie décrit toutes les étapes nécessaires à la **mise en place des outils de simulations**, avec un premier chapitre dédié à *Phanie*, logiciel de simulation d'éclairage, et un second dédié à *Icare*, logiciel de simulation acoustique. Ces outils, développés au CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), sont habituellement utilisés dans le cadre de simulations physiques de l'acoustique ou de l'éclairage dans des environnements modernes en fonction de nombreux paramètres (architecture, sources lumineuses ou sonores, climat, nature des matériaux). Les phénomènes physiques impliqués, une description du fonctionnement des logiciels, ainsi que toutes les étapes d'enregistrement et de calibration des données nécessaires à leur bon fonctionnement y seront développés.

Introduction

La troisième et dernière partie permet d'**envisager l'humain dans son contexte à l'aide des simulations**. Dans cette partie, un premier chapitre se focalisera sur l'étude de *la grotte de Cussac*. La description des questionnements archéologiques actuels et de l'aspect de la cavité au Gravettien permettront d'aborder, à l'aide des simulations, des problématiques abordant les cheminements empruntés par les Paléolithiques, la visibilité des panneaux ornés, ou encore les propriétés acoustiques des lieux. Le second chapitre est dédié à l'analyse *de la grotte de Lascaux*. Comme pour la grotte de Cussac, une remise en contexte, tant actuelle que paléolithique, sera nécessaire avant d'aborder l'influence de l'éclairage sur la perception des couleurs des peintures, l'accès au secteur du Puits ou encore l'influence des travaux sur l'acoustique de la grotte.

Enfin, avant de conclure, une discussion sera proposée autour de ces résultats et de l'apport des simulations numériques.

~ Partie I ~
Fondements de l'étude

CHAPITRE 1 – ÉTAT DE L'ART

Depuis sa découverte jusqu'à nos jours, l'attitude des préhistoriens envers l'art pariétal n'a eu de cesse d'évoluer. Les temps de la découverte sont d'abord marqués par l'incompréhension et le scepticisme, mais aussi par la curiosité. Puis, alors que les découvertes s'enchaînent, une longue phase de rassemblement des données, notamment sous la forme de relevé des entités graphiques voit le jour. Celle-ci s'accompagne d'interprétations simples, les auteurs s'inspirant souvent d'écrits ethnologiques et de leurs propres idées reçues. La seconde moitié du XX^{ème} siècle voit les techniques, méthodes et outils scientifiques se multiplier et s'améliorer. Celles-ci vont progressivement aider le préhistorien à se détacher de la recherche de la signification de l'art pariétal pour se concentrer sur son contexte naturel, social et culturel. Ils tentent de retrouver la place qu'occupait l'art pariétal dans la vie et la pensée des Paléolithiques, et par là, de préciser sa valeur sinon sa signification.

A. Historique

1. Les premières études¹

La découverte d'œuvres pariétales paléolithiques et leur attribution comme telle revient à Marcelino Sanz de Sautuola, érudit espagnol fouillant à la grotte d'Altamira. Si l'on en croit l'histoire, sa fille Maria les aurait aperçues dans un moment de désœuvrement, alors que son père l'avait emmenée avec lui dans la grotte de sa propriété. M. Sanz de Sautuola publia cette découverte en 1880, accompagnée d'un dessin des figures observées, dessin sur lequel il reproduisit d'ailleurs aussi bien les représentations que les grandes lignes de leur support, et notamment les fissures présentes dans la roche (Sanz de Sautuola, 1880 ; Figure 1).

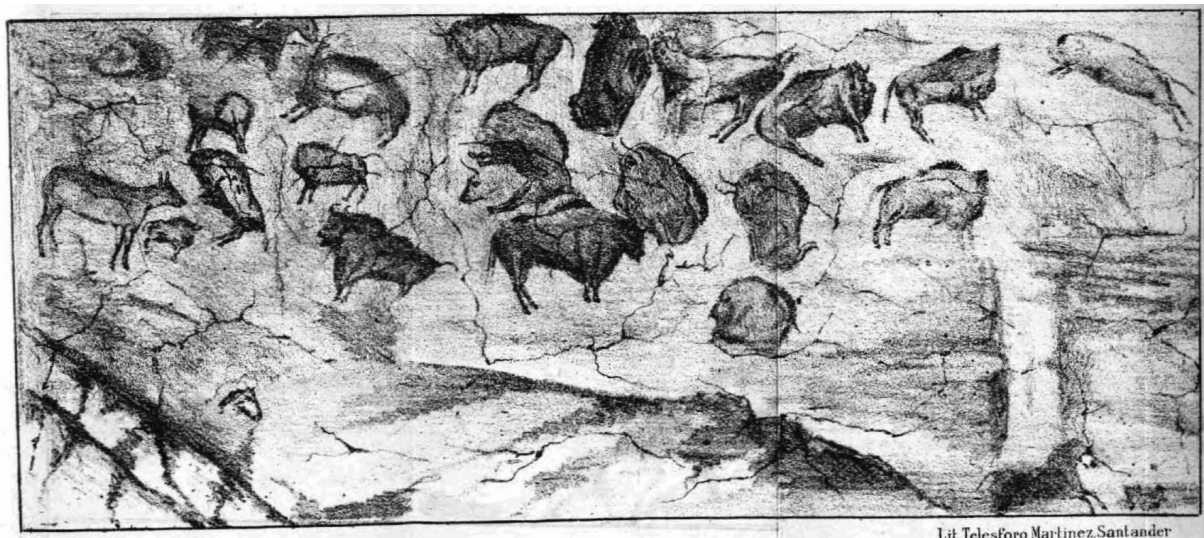


Figure 1 : Relevé des taureaux du plafond de la grotte d'Altamira par M. Sanz de Sautuola (op. cit.).

Malheureusement, cette découverte se heurta au mieux à du scepticisme et, au pire, à une violente critique (pour un résumé de cette affaire, se reporter à : Leroi-Gourhan, 1965 ; Lorblanchet, 1995 ; Paillet, 2018). Il faudra attendre de nouvelles découvertes pour qu'enfin la communauté des préhistoriens admette l'existence d'un art pariétal paléolithique, par la voix d'Émile Cartailhac publiant en 1902 son désormais célèbre « Mea culpa d'un sceptique » (Cartailhac, 1902).

¹ Pour un développement des événements résumés ici, se référer à : Groenen, 1994 ; Clottes, 2003.

Force est de constater que, dès lors, les publications de ces premières observations seront pour la plupart dénuées de contexte faisant la part belle aux seules figurations.

Durant toute la première moitié du XX^{ème} siècle, le travail des préhistoriens “pariétalistes” a principalement consisté à effectuer des relevés. Ces derniers ont la particularité de ne représenter que ce qui a été créé par la main de l'Homme (représentations figuratives ou non), comme si elles étaient déconnectées de leur support (e.g. Cartailhac et Breuil, 1906 ; Breuil et Bégouën, 1958), même lorsque celui-ci a été remarqué comme faisant partie intégrante de l'œuvre. C'est par exemple le cas du bison associé à des tectiformes de Font-de-Gaume, où l'abbé Breuil remarqua que le relief de la paroi complète la figure, mais sur le relevé final de la peinture, seule cette dernière est représentée (Capitan *et al.*, 1910). Ou à Altamira, où le lien entre les bosses rocheuses et les bisons fut remarqué mais non relevé (Cartailhac et Breuil, 1906). Quelques exceptions, souvent dues à des cas remarquables peuvent cependant être notées. C'est par exemple le cas des chevaux ponctués du Pech-Merle, où l'abbé Lemozi reproduit l'extrémité de la roche ressemblant à une tête d'équidé (Lemozi, 1929).

Les auteurs de ces premiers temps de la recherche se sont donc appliqués à ne représenter que les traces anthropiques, comme si la structure d'accueil n'avait eu aucun impact sur la création artistique. Le support, aussi bien que la cavité dans son ensemble, n'est pour ainsi dire jamais mis en relation avec les œuvres, bien que des plans des grottes existent et que la géologie de la cavité soit parfois étudiée (p. ex. Lemozi, 1929). Cela s'explique d'une part par la tradition occidentale qui donne à l'œuvre humaine et au tableau dans lequel elle s'inscrit une place centrale, et d'autre part par les aprioris de l'époque sur l'Homme du Paléolithique. En effet, au début du XX^{ème} siècle, conduits par l'image romantique de l'artiste qui peint plutôt par plaisir, et par l'idée que l'Homme préhistorique était incapable de religion (soit car trop primitif, soit car trop jeune pour être corrompu par la société ; de Mortillet et de Mortillet, 1900), les préhistoriens pensent que celui-ci profite de ses temps libres pour peindre, dessiner, et graver les parois des cavités. C'est la théorie de « L'art pour l'art » proposée par J. Lubbock (Clottes, 2003). Une seconde interprétation supplantera la première après que ses postulats ont été ébranlés : de plus en plus de représentations sont découvertes dans des secteurs particulièrement difficile d'accès, voire dangereux, et des études ethnologiques ont démontré que même les peuples « primitifs » possèdent une religion (Frazer, 1906-1915). L'art « religieux » (Th. Mainage et G. H. Luquet) devient une piste déclinée selon le totémisme de Salomon Reinach, l'animal étant un symbole de clan (1899, p. 478 ; 1903), ou la magie de la chasse diffusée par Henri Bégouën (1939) puis l'abbé Breuil (Breuil, 1952). Ils proposent que les animaux aient

été placés sur les parois par les Paléolithiques afin de s'assurer un gibier abondant et une bonne chasse, elle est principalement inspirée d'observations ethnographiques et de leurs connaissances de terrain.

Il est donc naturel qu'avec de telles considérations, la position des motifs au sein de la cavité, et leur lien avec l'encaissant, soient considérés comme le fruit du hasard ou n'ayant qu'un rôle très secondaire par rapport aux entités graphiques elles-mêmes.

Cependant, cette théorie sera à son tour critiquée, car selon ce postulat, ce sont les espèces consommées qui devraient être majoritairement représentées, or ce n'est pas le cas. De plus, les animaux ne sont jamais clairement ou majoritairement représentés comme chassés, piégés, ou dans des postures de reproduction.

2. Découverte d'un espace structuré

Après la seconde guerre mondiale, une nouvelle approche se développe à la faveur du courant de pensée du moment : le structuralisme. Max Raphaël en est le premier tenant, bien que ses travaux n'aient été découverts qu'assez tardivement par l'ensemble de la communauté scientifique. Il défend l'idée que l'art paléolithique reflète l'organisation sociale des sociétés qui l'ont construit (Raphaël, 1945, 1986). Ce faisant, il s'intéressa au totémisme et associa les animaux avec des clans. Mais l'intérêt de ses réflexions réside surtout dans l'idée que les images proches les unes des autres ne sont pas des figures isolées apposées au même endroit, comme l'abbé Breuil le pensait, mais bien des compositions organisées (Raphaël, 1945, 1986). Il est également le premier à proposer une dualité sexuelle structurant ces compositions.

Malgré des interprétations souvent subjectives, ses travaux vont par la suite ouvrir la porte à ceux d'Annette Laming-Emperaire et André Leroi-Gourhan, qui auront un impact plus décisif sur la recherche de leur époque.

A. Laming-Emperaire est surtout connue pour avoir travaillé sur la dualité sexuelle des espèces animales, mais aussi pour la méthodologie qu'elle employa, en utilisant des inventaires, et en étudiant la position des œuvres dans la grotte, l'association entre la localisation, le contenu des représentations et les vestiges archéologiques, et en refusant d'utiliser le comparatisme ethnographique (Laming-Emperaire, 1962). Pour elle, « le modelé de la paroi a guidé la main et l'imagination des artistes quaternaires », mais aucun relevé, dessin, ni photographie, à fortiori

seulement en 2D, ne pourrait rendre compte de cet impact qu'a eu la troisième dimension et les volumes ainsi générés dans la création paléolithique, c'est pourquoi elle n'a que très peu utilisé de relevés dans ses travaux. Elle influencera les méthodes d'étude de l'art pariétal pour les décennies à venir et auront un impact sur ceux d'A. Leroi-Gourhan son directeur de thèse. L'idée que les œuvres et leurs supports sont intimement liés continuera à se développer dans l'esprit des pariétalistes.

L'école structuraliste atteint son apogée avec les travaux d'A. Leroi-Gourhan. Il utilisa une méthode ne partant que des vestiges pariétaux, grâce à la mise en place d'inventaires, de décomptes, et de statistiques, se refusant avec encore plus de vigueur qu'A. Laming-Emperaire à utiliser des comparatismes ethnographiques et l'influence des relevés manuels. Avec cette méthode, il put constater que les motifs ne sont pas distribués de façon homogène au sein des cavités, et érigea un certain nombre de règles concernant leur répartition. Par exemple, il associa les figures animales avec l'espace : les bisons, aurochs, chevaux et mammoths étant plus présents dans la partie centrale de la grotte, les bouquetins et les cerfs dans les lieux de passage, les marges des compositions centrales et les zones d'entrée et de fond, tandis que les animaux dangereux, comme le lion, l'ours ou le rhinocéros se trouveraient dans le fond ou dans des espaces isolés (Leroi-Gourhan, 1965). En poursuivant sa réflexion en parallèle de celle d'A. Laming-Emperaire, ils remarquèrent que bison et cheval étaient souvent associés, de même que bison et figures féminines (Leroi-Gourhan, 1965). Dans le même temps, il entama un important travail sur les signes jusqu'à présent peu étudiés et leur attribua des valeurs féminines (pour les signes dits pleins : les triangles, rectangles, ovales, grilles, tectiformes, claviformes...) ou masculines (pour les lignes de points, barbelés, bâtonnets...). En étudiant les associations entre figures féminines et masculines, signes dits féminins ou masculins, et les figures animales, il en arrive à proposer que les chevaux soient associés au symbolisme masculin, tandis que les bisons et aurochs soient associés au féminin. Cette stricte dualité a été fortement critiquée depuis, notamment par le fait qu'avec les mêmes données de départ A. Laming-Emperaire arrive à la conclusion inverse (les chevaux sont associés au féminin et les bovidés au masculin) ! A. Leroi-Gourhan lui-même nuancera : « L'hypothèse d'entités masculines et féminines, régentes des domaines mâle et femelle, est certainement simpliste et incomplète, celle du bison et du cheval comme symboles animaux de ces mêmes domaines est sûrement aussi déficiente et nous sommes probablement en présence d'un système (qui n'était peut-être pas rationnellement formulé) de correspondance, d'équivalence, d'échange, de complémentarité entre toutes les figures. » (Leroi-Gourhan, 1965).

Cependant, même si ce modèle de structuration très précis et rigide a été nuancé depuis (Vialou, 1986), il a permis de mettre en évidence une répartition inégale des figures au sein des panneaux, et de ceux-ci au sein de la cavité, suivant, entre autres facteurs, la topographie du sanctuaire. L'expression « caverne participante » utilisée par A. Leroi-Gourhan illustre cette approche, qui donne à la grotte un rôle actif au cœur de la création artistique et qui l'étudie comme un espace structuré et pensé.

Les critiques de ce système ayant été mises en avant appuient sur la diversité des morphologies souterraines, et l'impossibilité de proposer un système aussi rigide que celui d'A. Leroi-Gourhan, avec une pérennité sur vingt millénaires (Vialou, 1986 ; Lorblanchet, 1995). Ces auteurs proposent plutôt d'étudier les cavités en s'adaptant à chacune : « les Magdaléniens n'ont pas appliqué un modèle de « sanctuarisation » aux grottes choisies ; ils ont fait de chacune un modèle original ayant des analogies avec d'autres sites, ayant plus rarement des points de ressemblance affirmée. » (Vialou, 1986). L'autre principale critique concerne plutôt la méthode d'analyse : A. Leroi-Gourhan faisait des études sur plan, ce qui ferait presque oublier que les grottes sont des espaces en trois dimensions. Ainsi, seuls les thèmes et l'emplacement sur plan des figures sont étudiés, négligeant d'autres critères, par exemple la volumétrie.

L'approche structuraliste entretient l'ambition d'une interprétation symbolique des cavernes ornées, interprétations qui seront par la suite réfutées. Délaissant ces théories qui tentent d'approcher le symbolisme des groupes préhistoriques tout en conservant et en adaptant les outils conçus par leurs prédécesseurs, les pariétalistes vont par la suite développer une approche plus anthropologique et plus sociale de l'art paléolithique : quelle était sa fonction dans la société, et quel était le statut social de l'« artiste » ?

3. Des approches multiples

À la suite du structuralisme, un changement de paradigme s'opère dans la recherche en archéologie. Les préhistoriens ne vont plus chercher à interpréter l'art pariétal ni à proposer des modèles globaux, mais, influencés par la « *New Archeology* », ils vont plutôt s'intéresser à son rôle culturel et à son utilité sociale (Lorblanchet, 1995, 1999 ; Clottes, 1998). En effet, il est alors admis que les Hommes préhistoriques ont effectué des activités rituelles au sein des grottes profondes (Leroi-Gourhan, 1964 ; Bahn, 2003 ; Arias, 2009) dont l'apposition de figures sur

les parois en est la manifestation la plus saisissante. Cela s’est traduit par l’essor de questionnements sur la place et le rôle de l’artiste au sein de sa société (Feruglio, 2006 ; Feruglio *et al.*, 2011) : quels étaient sa place et son rôle dans la société ? L’artiste travaillait-il seul ou s’agissait-il d’une œuvre collective ? Comment ce savoir-faire était-il transmis ? (Fritz, 1999 ; Rivero 2016). Et sur les modalités de création du dispositif pariétal : origine et mode d’utilisation des pigments, modalités de l’éclairage, durée nécessaire à la mise en place d’un ou plusieurs graphèmes (Lorblanchet, 2010). Ou encore quant à la volonté sous-jacente à la création : crée-t-on pour montrer, et à combien de personnes, ou au contraire cherche-t-on simplement à marquer la paroi, la cavité, le lieu ?

La première datation au Carbone 14 d’un charbon issu d’une peinture pariétale en France a eu lieu en 1990 (Lorblanchet, 1990). Par la suite, le développement d’outils de mesure de plus en plus performants, empruntés à l’archéométrie et adaptés au domaine des abris et grottes ornés (Paillet, dir., 2014), a permis des avancées concernant la compréhension du cadre naturel de l’art pariétal, avec parfois le piège de s’éloigner des questionnements principaux.

La nécessité se fait alors sentir, pour accompagner ces profonds changements tant dans les questionnements que sur l’apport des nouvelles technologies, d’harmoniser le vocabulaire et les méthodes d’étude au sein de la profession en France. Cela se fera grâce à la création du Groupe de Réflexion sur l’Art Pariétal Paléolithique (G.R.A.P.P., 1993).

Dans cette recherche de la fonction sociale de l’art pariétal et du contexte naturel dans lequel il s’inscrit, plusieurs axes de réflexion ont alors émergé.

a) Le rapport entre l’œuvre et son support

Le premier axe concerne le lien qui existe entre l’œuvre et son support. En effet, il a rapidement été remarqué que les Hommes préhistoriques ont souvent utilisé des reliefs préexistants dans la roche pour construire leurs figures, ou que des fissures ou accidents naturels servent d’encadrement aux motifs. C’est ainsi que M. Lorblanchet déclarera « L’art, la roche et le lieu ne sont pas des concepts séparables », en s’appuyant notamment sur la pensée des Aborigènes australiens, pour qui « l’importance du site et des formes rocheuses créées par les ancêtres mythiques et imprégnées de leur esprit, dépasse souvent celle des figurations elles-mêmes... » (Lorblanchet, 1993).

Le premier niveau d'adéquation entre le graphisme et son support concerne la technique employée. On observe souvent une adéquation entre celle-ci et la nature du support : lorsque la surface est tendre, la gravure a tendance à s'imposer, alors que lorsque le support est très induré, la peinture domine (Aujoulat *et al.*, 2001a, Aujoulat, 2002, Ferrier *et al.*, 2017a).

Le second niveau correspond à l'intégration de reliefs, de fissures, d'accidents rocheux, dans des figures. Il ne s'agit pas d'un phénomène constant, mais suffisamment présent pour que les pariétalistes soient amenés à se demander si ces formes sont activement recherchées, voire le point de départ et la raison d'être d'une figure, s'il s'agit d'une technique de construction permettant la mise en valeur de l'entité graphique (Brot, 2005), ou s'il s'agit plutôt d'un comportement opportuniste. Certains auteurs ont même proposé qu'ils soient la preuve d'une préexistence de l'animal dans la roche dans la pensée paléolithique (Lejeune, 1985 ; Testart, 2016), et M. Lorblanchet (2010) ira même plus loin en affirmant que « Le terme « support » du vocabulaire technique des préhistoriens est la projection erronée d'une notion moderne. La roche ne « supporte » pas l'œuvre paléolithique, elle y participe intimement. », on retrouve là aussi l'idée de J. Clottes et D. Lewis-Williams « [...] c'est la caverne elle-même qui a donné naissance à des catégories d'images particulières » (Clottes et Lewis-Williams, 2001, p. 102), les amenant à proposer une interprétation de l'art pariétal paléolithique en partie liée au chamanisme, où « Parois, voûtes et sols n'étaient que de fines membranes qui les séparaient des créatures et des événements du monde inférieur. » (Clottes et Lewis-Williams, 2001, p. 100).

Le troisième niveau concerne l'encadrement d'une figure ou d'un panneau, et est particulièrement présent dans le cas des signes (Robert, 2006). Il est en effet possible qu'un motif, figuratif ou non, ait été placé au sein d'un ensemble rocheux qui évoque déjà sa forme. C'est par exemple le cas des célèbres Chevaux Ponctués du Pech-Merle. Parfois, un joint de stratification ou une fissure semble avoir été utilisé pour jouer le rôle du sol ou pour délimiter un espace investi graphiquement, qui pourra être considéré comme un panneau (González García, 1987, 1996, 2001).

Enfin, le dernier niveau d'intégration concerne l'« Architecture rocheuse », selon les termes de D. Vialou (1987) : l'architecture de l'espace souterrain (c'est-à-dire sa forme, s'il y a continuité ou discontinuité entre les espaces, s'il y a des obstacles topographiques) a joué un rôle dans la présence et la forme des dispositifs pariétaux. Cela est particulièrement le cas pour de grandes compositions, où la forme des salles et des galeries a influencé la répartition des figures. Parmi bien d'autres, un des exemples le plus connu est certainement celui de la Rotonde de Lascaux,

où une bande de calcaire recouverte de calcite en forme d’hémicycle accueille une vaste frise circulaire comprenant animaux et signes (Lorblanchet, 1995).

L’étude géologique du support des motifs, en plus de révéler d’éventuels liens entre les entités graphiques et la roche sur laquelle elles reposent, permet d’étudier l’intégrité du support, son état de conservation et son évolution depuis les temps paléolithiques. Ainsi, il est désormais parfois possible de vérifier si une figure est incomplète pour des raisons de mauvaise conservation du support, ou s’il s’agit d’un acte volontaire (Kervazo *et al.*, 2010 ; Ferrier *et al.*, 2017a).

Tous ces exemples montrent bien qu’un lien s’est établi entre la main et la matière, et que la paroi, sa nature, son aspect, et sa configuration, ont tour à tour motivé ou contraint la forme, la technique, et peut-être même l’absence ou la présence de “décor”². Cependant, ces observations montrent aussi que ce dialogue entre le décor et la paroi n’est pas systématique, ce qui indique que d’autres facteurs interviennent dans ce choix.

b) La perception du monde souterrain

L’autre volet qui a été exploré concerne la perception du monde souterrain. En effet, il s’agit d’un milieu qui n’est pas naturellement investi par l’Homme, et qui nécessite des savoir-faire particuliers (Rouzaud, 1997).

Éclairage

La première question à s’être imposée concerne l’éclairage utilisé. En effet, c’est parce qu’ils pensaient l’Homme préhistorique incapable de produire un éclairage artificiel mobile que les scientifiques du XX^{ème} siècle réfutaient l’ancienneté de l’art pariétal. Cependant, en 1899, dans la grotte de La Mouthe (Dordogne), une lampe à graisse, découverte dans le niveau archéologique, et comportant une gravure qui a pu être rapprochée d’une gravure pariétale, a mis fin au débat : les Hommes préhistoriques savaient s’éclairer de manière artificielle (Rivière, 1899).

² Même si nous doutons qu’il ne s’agit pas au sens contemporain du terme d’un “décor”, nous continuons à utiliser par commodité des termes comme “décor”, “art”, “ornementation”.

La seconde étape a donc été de caractériser cet éclairage. Pour cela, les auteurs ont tenté des reconstitutions (Peyrony, 1918), dressé des inventaires des lampes découvertes (p. ex. Viré, 1934), et décrit les stigmates liés à leur utilisation comme luminaire (Allain, 1965). Cependant, il faudra attendre les travaux de B. et G. Delluc (Delluc et Delluc, 1979a) puis ceux d'A. Aubourg (Aubourg, 1983) et, enfin, de S. de Beaune (de Beaune, 1987a ; 1987b ; 2000) pour qu'un véritable examen scientifique et systématique soit mené à ce sujet. Les premiers se sont en particulier intéressés à l'exceptionnelle série de lampes découvertes dans la grotte de Lascaux. En effet, ce sont au moins 36 lampes en grès et en calcaire qui ont été retrouvées dans ce site (Delluc et Delluc, 1979a). A. Aubourg a essentiellement réalisé des expérimentations de lampes à graisse, mais aussi de torches, donnant de précieuses indications quant au fonctionnement de ces différents luminaires en fonction des matériaux sélectionnés (Aubourg, 1983). S. De Beaune s'est quant à elle intéressée à l'ensemble des lampes à graisse retrouvées sur le territoire français, soit 302 lampes au moment de la publication (de Beaune, 1987a). Après avoir testé des allumages et éclairages avec différentes matières premières, il semblerait que le genévrier, le bois blanc séché en lanière, le lichen, la mousse, l'amadouvier et le bois pourri soient les mèches qui donnent le meilleur résultat, tandis que la graisse de cheval, la graisse de phoque gris et le suif de bœuf sont les graisses les plus efficaces parmi celles que les auteurs ont pu tester (Delluc et Delluc, 1979a ; Aubourg, 1983 ; de Beaune, 1983, 1987a). L'éclairage ainsi obtenu serait semblable à celui d'une bougie moderne (0,12 à 0,15 lx), efficace pendant environ une heure avec entre 20 et 30 g de graisse (de Beaune, 1983, 1987a).

Après avoir caractérisé cet éclairage dans les grandes lignes, certains ont cherché à l'utiliser afin de mieux comprendre comment il a pu influencer le comportement des Hommes du Paléolithique. On peut notamment citer l'expérience de J. Plassard (de Beaune, 1983, p. 293), qui a parcouru la grotte de Rouffignac, de l'Entrée au Plafond orné, soit entre 600 et 800 m avec une lampe de « type Lascaux » pour seul éclairage, ou encore celle de M. Lorblanchet qui a dessiné la Frise Noire du Pech-Merle avec pour seul éclairage une lampe à graisse. L'auteur précise d'ailleurs que la réalisation de cette frise a duré entre 1h et 1h30, dont quelques minutes nécessaires à l'entretien de la lampe. Si dans de telles conditions on imagine facilement qu'une lampe unique avec peu de matériel ait suffi, cela est très différent par exemple pour le panneau des Chevaux Ponctués dont la réalisation a nécessité 5 journées de travail (32 h cumulées) et l'utilisation des deux mains pour contrôler les jets de colorant. Un assistant était donc nécessaire pour tenir la lampe près de la paroi (Lorblanchet, 2010) ou fallait-il trouver un support adapté pour que la lumière irradie suffisamment.

Enfin, le témoignage de Jacques Marsal, guide et co-inventeur de la grotte de Lascaux, permet de confirmer l’adéquation d’un éclairage paléolithique aux décors : « On voit très bien avec très peu de lumière, c’est une question d’adaptation. Moi, j’ai fait l’expérience avec trois bougies posées sur le sol de la Salle des Taureaux. Au bout d’une heure d’obscurité totale, on voit toute la composition générale, tous les détails, sans aucun problème. On voit très bien la gravure avec une bougie. C’est même beaucoup plus impressionnant avec une bougie, parce que la flamme bouge et fait bouger l’animal. À Lascaux, moins il y a d’éclairage, plus les animaux sont impressionnants, plus contrastés. » (Delluc et Delluc, 2003, p. 305).

Des lampes fixes ont également été retrouvées en milieu souterrain. Celles-ci ont la particularité de fonctionner comme les lampes à graisse mobiles, mais leur support (p. ex. partie sommitale d’une stalagmite) est fixe, ce qui sous-entend une utilisation différente (Medina-Alcaide *et al.*, 2012).

Malgré une abondante recherche des qualités éclairantes des lampes à graisse, la littérature offre peu d’information concernant celles des torches préhistoriques, dont l’existence est pourtant démontrée par la présence de mouchages dans de nombreuses grottes ornées. À ce titre, seules les expérimentations d’A. Aubourg (Aubourg, 1983) et de P. Galant (Galant *et al.*, 2007) ont permis d’améliorer nos connaissances sur le fonctionnement de ces luminaires. Il en est de même pour les foyers fixes, alors que des restes de foyers (Bégouën *et al.*, 2014) et des traces de chauffe sur des parois ont été retrouvés en contexte orné profond (Ferrier *et al.*, 2017b).

Acoustique

Cependant, si nous percevons l’essentiel des informations de notre environnement à travers nos yeux, dans l’obscurité totale, nos autres sens deviennent hyper réceptifs. Cette considération a amené I. Reznikoff à proposer que les Hommes préhistoriques aient également pu s’orienter grâce à l’écholocalisation (Reznikoff, 2008, 2010, 2012). L’acoustique des cavités et son influence sur l’appropriation de ce milieu, voire sur la position des motifs au sein des cavités, a pour la première fois été évoquée par I. Reznikoff et M. Dauvois en 1988 (Reznikoff et Dauvois, 1988). Leurs résultats, bien que dépendants d’une méthode non reproductible (sons émis à la voix et entendus à l’oreille humaine), semblent montrer qu’un lien existe effectivement entre la position des motifs – surtout en ce qui concerne les signes rouges – et les qualités acoustiques ou le nombre d’échos présents dans un même lieu, pour les cavernes de

Niaux, de Fontanet et du Portel (Ariège). D'autres cavités (p. ex. les grottes d'Arcy-sur-Cure, Kapova, Oxocelhaya) ont été investiguées par I. Reznikoff, avec des résultats associant localisation des peintures préhistoriques et/ou des taches d'ocre avec l'intensité de la réverbération et/ou le nombre d'échos (Reznikoff, 2006, 2012, 2014, à paraître). Cela a conduit d'autres auteurs (S. J. Waller, J. Héту, B. Fazenda) à explorer cette dimension, avec des résultats parfois concordants (Waller, 1993), mais parfois discordants ou nuancés (Dauvois, 2005 ; Fazenda *et al.*, 2017). Mais ce qui marque la progression des travaux, c'est la recherche d'objectivité et de répétabilité dans la méthode utilisée : en 1994 l'étude de la grotte du Portel continue, avec des mesures prises à l'aide d'un bruit blanc au spectre large et dense de fréquence (Dauvois et Boutillon, 1994), puis en 2017, les sons et les mesures sont effectués à l'aide de haut-parleurs et d'un microphone. Un balayage sinus logarithmique a ainsi été généré en format numérique, dans une gamme comprise entre 20 Hz et 20 kHz et ont ainsi pu extraire des mesures acoustiques de la réponse impulsionnelle. Le contexte archéologique de chaque espace a également été pris en compte, afin de pouvoir effectuer des analyses statistiques (Fazenda *et al.*, 2017).

Paléospéléologie

Enfin, en se basant sur un déplacement effectué à l'aide d'un éclairage mobile (dont nous avons la preuve physique de son existence), François Rouzaud a développé le concept de paléospéléologie. C'est-à-dire l'examen des dynamiques de progression dans le domaine des grottes profondes. D'après lui, la portée de l'éclairage de l'époque était réduite (avec une visibilité suffisante jusqu'à 4 m de distance), ce qui obligeait les Paléolithiques à se déplacer près d'une paroi pour pouvoir se repérer (Rouzaud, 1997).

Pour se repérer et avancer dans l'espace sans crainte, outre l'écholocalisation et la proximité des parois, des éléments de repérage ont pu être utilisés par les Préhistoriques. L'étude d'un balisage potentiel, en renseignant les cheminements possiblement empruntés par les Paléolithiques, nous renseigne aussi sur l'utilisation de la cavité, et sur les destinataires potentiels des graphismes : leur nombre, et leur connaissance (ou non) de la cavité. Mais que ce soient des éléments graphiques ou des spéléothèmes brisés puis déplacés (Groenen, 2013), ou le placement, parfois près du cheminement ou à des intersections, de lampes à graisse permettant un balisage lumineux du cheminement emprunté par les Paléolithiques (de Beaune, 2000), il est toujours délicat aujourd'hui de les interpréter avec certitude.

Ce qui est certain en revanche, c’est qu’à défaut de nombreux vestiges retrouvés dans les grottes ornées (une lampe peut resservir : elle n’a aucune raison d’être laissée sur place), les Préhistoriques avaient de nombreux outils à leur disposition, et qu’ils ont pu, qu’ils ont dû les adapter à leurs besoins et aux particularités des cavités explorées.

c) Destinataire(s) de la construction graphique

Comportant à la fois des compositions ostensibles et d’autres cachées, le destinataire de l’art pariétal est le dernier axe à être exploré : les motifs ont-ils été réalisés pour être vus, et si oui, par qui ? Plusieurs travaux ont ainsi exploré les concepts de *visibilité* et de *lisibilité*, en association avec l’espace disponible.

L’un des premiers éléments a été apporté par Fortea Perez (1994), qui distingue les sites ornés de plein air, à l’instar des abris-sous-roche, qui sont des lieux accessibles à tous et sont donc publics, des cavités qui ne peuvent accueillir qu’un nombre limité d’individus (même si cette limite peut parfois être importante). Les cavités sont, de plus, des lieux à l’entrée parfois discrète et qui nécessitent une préparation à la visite, en particulier en ce qui concerne l’équipement et notamment l’éclairage : la quantité de sources, de mèches et de combustibles nécessaires dépend de la localisation et de la profondeur des locus ornés. Cette condition impose une connaissance de la grotte qui ne peut se faire que par initiation, collective ou privée.

À l’intérieur de ces cavernes, la présence d’ensembles « secrets » et « publics » a été maintes fois suggérée (Lorblanchet, 2001 ; Villeneuve et Hayden, 2007 ; Villeneuve, 2008), puis affinée en trois catégories de publics : collectif, c’est-à-dire comportant au moins une vingtaine de personnes (Gamble, 1998), restreint, concernant quelques individus (Gamble, 1998), et enfin individuel (Villeneuve, 2008 ; Bourdier *et al.*, 2017). Ces différences sont à la fois dues à la géomorphologie de l’espace (la disposition de motifs dans des espaces difficilement accessibles provoque *de facto* une sélection des individus capables ou autorisés à y accéder), à l’espace disponible (les lieux étroits limitant le nombre d’individus à un ou deux, alors que des espaces dégagés permettent la présence d’un groupe) et à la technique employée (la gravure fine, plus difficile à déchiffrer et nécessitant un éclairage correctement orienté, correspondrait à une apposition plutôt intime, alors que la peinture, souvent visible de loin, aurait été utilisée pour des compositions publiques ; Lorblanchet, 1995).

Il faut attendre les années 2000, voire 2010, pour que de premiers travaux entièrement dédiés à cette question voient le jour dans le contexte de l'étude de l'art souterrain. Les différents auteurs qui se sont impliqués dans cette question ont développé des outils et mis en place des méthodes d'analyse pour pouvoir y répondre. Ce sont principalement des données concernant l'espace physique (p. ex. espace disponible au sol), les motifs (dimensions, technique employée, couleur, finition et détail du sujet), et la visibilité des entités graphiques (avec entre autres la détermination de l'aire d'observation optimale) qui sont renseignées. L'éclairage paléolithique ainsi que les qualités acoustiques de l'espace sont souvent mentionnés mais rarement intégrés à ces études (Villeneuve et Hayden, 2007 ; Villeneuve, 2008 ; Bourdier, 2013 ; Bourdier *et al.*, 2017). La problématique liée à la destination de l'art pariétal verra un développement plus important à partir des années 2010, puisqu'elle nécessite souvent la prise en compte de multiples facteurs, comme, outre les différents critères précédemment cités, l'éclairage paléolithique, les accès possibles, ainsi que le croisement des données avec celles issues d'autres disciplines comme la localisation des vestiges archéologiques ou les traces laissées par les Hommes préhistoriques (ichnologie).

Outre la question de l'assistance présente face à des panneaux, des chercheurs ont proposé que certains motifs, souvent simples et difficilement distingués des traces laissées par inadvertance, soient des points de repères. Ce serait par exemple le cas des disques rouges d'El Castillo (Groenen, 2013). Ces motifs seraient alors destinés à être remarqués et compris par un éventuel visiteur. D'autres signes ont pu servir à annoncer ou délimiter un espace orné, comme le Salon Noir de Niaux et le Panneau Indicateur qui le précède (Robert, 2007, 2011 ; Clottes, 2010), mais s'agissait-il d'une délimitation symbolique, destinée à la roche, ou physique, et destinée à avertir un éventuel visiteur de l'approche d'une zone densément ornée ?

Il est évident que l'ensemble des différents facteurs qui intègrent ces trois axes sont rentrés en jeu, mais leur lien n'est pas encore bien compris : l'un était-il plus important qu'un autre, sont-ils complémentaires ou hiérarchiquement différents ?

Dans cette recherche de l'utilisation des grottes ornées et des modalités de l'appropriation du milieu souterrain, la compréhension globale du site orné est désormais indispensable. Il s'agit alors de mettre en lien ces différents axes. Alors que l'archéologie est une science avec des spécialisations de plus en plus pointues, certains domaines d'étude nécessitent de faire se croiser différents champs disciplinaires.

B. État actuel des recherches

À force de vouloir retrouver l'auteur et ses gestes, l'archéologue a tendance à parfois négliger l'espace dans lequel le geste, l'action, et l'humain étaient présents. Cela n'est pas réservé au domaine de l'art pariétal, mais une tendance plus générale en archéologie, où traditionnellement la réflexion part de l'objet pour retrouver l'Homme créateur ou utilisateur (Gorgue *et al.*, 2017). Pourtant ce dont dispose l'archéologue, c'est d'un espace. Certes modifié, mais toujours plus présent que l'Homme et son geste. Le premier à avoir investi puis "diffusé" une analyse de l'espace en archéologie paléolithique est A. Leroi-Gourhan, d'abord en plein air sur le site de Pincevent, puis en grotte. Cependant, bien qu'il s'agisse d'environnements propices à la conservation des vestiges et de leur organisation spatiale, faciles à délimiter dans l'espace, et qui sont porteurs de nombreuses questions, il faudra attendre quelques décennies après lui pour que débute l'étude de l'espace en lui-même, de la perception et de l'occupation du milieu souterrain (Lorblanchet, 1993 ; Rouzaud, 1993). Il s'agit alors souvent d'observations certes précurseurs mais encore incomplètes, où tous les facteurs ne sont pas pris en compte, mais qui ont le mérite de poser les bases pour les recherches qui vont suivre.

Cette prise de conscience a été accompagnée, depuis deux décennies, de la découverte de sites majeurs (Chauvet, Cussac) qui ont, de par leur importance patrimoniale et scientifique, conduit les études de sites ornés à être menées désormais par une équipe résolument pluridisciplinaire, sur le modèle d'autres sites archéologiques, ce qui permet d'apporter un regard plus global sur ces cavités. Dans le même temps, l'amélioration constante des outils et des méthodes d'études permettent d'affiner ce regard.

C'est ainsi que, même si les travaux portant sur les trois axes précédemment définis, à savoir : le rapport entre l'œuvre et son support (Kervazo *et al.*, 2010 ; Ferrier *et al.*, 2017a), sur l'occupation du milieu souterrain (Ledoux *et al.*, 2017) et sur les objectifs sociaux de la construction graphique (Bourdier *et al.*, 2017 ; Feruglio *et al.*, 2019) continuent à être menées, des réflexions intégrant ces données dans le but de mieux comprendre l'organisation spatiale des sites ornés voient le jour.

1. L'essor des études sur l'organisation spatiale

Depuis les études d'A. Leroi-Gourhan, qui ne prenaient en compte que les thèmes présents sur chaque panneau et leur localisation au sein du panneau et de la cavité, on trouve peu de recherches entièrement dédiés à la question de l'appropriation de l'espace souterrain. Il faut néanmoins citer J. Clottes, qui proposera le terme de « contexte archéologique interne » (1993, p. 49) dans le cadre des traces laissées par les Hommes et les animaux. Il faudra cependant attendre le XXI^{ème} siècle pour assister à un renouveau de la discipline et la mise en place de méthodes dédiées à son exploration (Medina-Alcaide *et al.*, 2018).

Avec ses travaux, R. Gonzalès García établit une synthèse relative à l'organisation spatiale des panneaux dans près de 15 cavités de Cantabrie. Il y intègre les caractéristiques de réalisation de chaque figure, l'aspect du support (p. ex. s'il est concave, plan ou convexe), le secteur où le panneau se situe ainsi que la morphologie supposée être celle du Paléolithique. Contrairement à A. Leroi-Gourhan, il indique par des photographies et des coupes l'emplacement en 3D des figures, et non pas uniquement sur plan « 2D » horizontal (González García, 1987, 2001).

En 2005, Y. Le Guillou s'intéresse à l'appréhension de l'espace souterrain dans la grotte Chauvet-Pont d'Arc (Ardèche). Pour cela, il s'appuie sur les méthodes déjà existantes (prise en compte de l'évolution de l'espace depuis le Paléolithique et de la localisation des figures par exemple), mais il y ajoute la question des champs visuels et des cheminements empruntés et de leurs conséquences en termes de comportements des Paléolithiques. Cela lui permet notamment d'aborder la question de l'éclairage : puisqu'à la grotte Chauvet un certain nombre de panneaux ont nécessité l'appui d'une main lors du dessin, alors la présence d'un éclairagiste en plus de l'artiste devait être nécessaire (Le Guillou, 2005).

En 2011, A. Pastoors et G. C. Weniger, proposent une étude très interdisciplinaire, où ils donnent quelques clés pour aborder la question de l'organisation spatiale des grottes ornées. Pour ce faire, ils combinent des données physiques et physiologiques, surtout en ce qui concerne la perception de la lumière et des couleurs, à des données de l'analyse spatiale : taille des salles, nombre de personnes pouvant y stationner, type de salle en fonction de l'éclairage possible au Paléolithique, type de vestiges retrouvés dans cet espace (liés plutôt à des activités « artistiques » ou de subsistance), mode de mouvement nécessaire pour se mouvoir dans cet espace, ou encore liens entre cet espace et les autres espaces de la grotte ; Pastoors et Weniger, 2011). Avec cette méthode, ils placent l'art au même niveau d'intérêt que les autres vestiges et

traces, et cela leur a permis d’en apprendre plus sur l’occupation et l’appropriation de l’espace. Ils montrent ainsi que les trois cavités étudiées (Bèdeilhac, Fontanet et Le Portel) sont partagées en zones d’expression graphique, d’approvisionnement, d’expression graphique avec approvisionnement et d’expression graphique avec consommation.

M. et M.-C. Groenen, à travers l’étude de quatre grottes du Mont Castillo, expliquent que l’espace y a été inégalement orné et que les différents thèmes et techniques ont été placés dans des secteurs bien définis, soutenant la thèse d’espaces qui leur sont dédiés (Groenen, 2013, Groenen et Groenen, 2019). Les différences observées dans l’organisation des dispositifs pariétaux de ces grottes, en particulier entre La Pasiega et El Castillo, leur permet de proposer l’hypothèse que les modalités de l’organisation varient d’une grotte à l’autre, et parfois même au sein d’une même grotte, selon la structure architectonique des lieux. Ils abordent également la question de l’éclairage et de son influence sur la perception de l’espace et des entités graphiques. Ils proposent ainsi que la forme des ombres projetées par les lampes à graisse peuvent définir des secteurs et que le décor doit se découvrir au fil du cheminement (Groenen, 2013).

On observe qu’au fil du temps, l’humain est replacé dans cet espace souterrain, bien que ce ne soit pas systématique. C’est par exemple le cas des travaux de thèse de A. Ruiz-Redondo, qui portent sur l’activité graphique dans la grotte d’Altzerri (Espagne), et où un chapitre entier est dédié à l’analyse de l’espace : distribution spatiale des entités graphiques, modalités de leur intégration dans leur support, voies de cheminements paléolithiques, détermination des lieux d’observation optimaux avec le nombre d’individus pouvant y stationner, conditions d’accès aux entités graphiques et aux lieux d’observation. Cela montre encore une fois l’importance d’intégrer ces données lors de l’examen global d’un site (Ruiz-Redondo, 2014).

En 2018, B. Ochoa et M. García-Diez proposent une étude de l’occupation et de l’appropriation de l’espace à travers trois niveaux : l’unité topographique, le panneau et l’unité graphique. L’analyse spatiale est effectuée en intégrant les vestiges archéologiques, la visibilité des panneaux, la capacité d’accueil à leur niveau, leur éclairage, entre éclairage naturel et artificiel, les accès des différents espaces et le transit au sein de ces espaces. Appliquée à la grotte Chufín (Cantabrie, Espagne), cette méthode a permis de montrer deux usages différents de la grotte, avec les panneaux profondément gravés ou dessinés aux pigments rouges localisés sur les surfaces les plus visibles, dans de larges espaces, alors que les autres panneaux, constitués de

gravures fines, sont situés dans des zones de faible visibilité et d'accès plus délicat (Ochoa et García-Diez, 2018).

Enfin, un projet pluridisciplinaire portant sur la grotte de Cussac (Jouteau, 2016 ; Jouteau *et al.*, 2019) propose d'étudier les choix qui ont guidé les Préhistoriques lors de la construction du dispositif pariétal de la grotte. Pour cela de nombreux critères ont été étudiés, en particulier les caractéristiques géologiques des supports, l'environnement et le contexte physique proche des panneaux, leur accès et leur visibilité pour le graveur d'une part et pour une éventuelle assistance d'autre part, leur répartition au sein de la cavité, ainsi que leurs champs de visibilité. Cela a permis de donner un point de vue plus général sur la construction du dispositif pariétal de la cavité, avec notamment la mise en évidence de trois groupes de panneaux, qui se distinguent par leurs caractéristiques intrinsèques (taille, nombre d'entités graphiques) mais aussi par leur rapport à leur support et à leur localisation au sein de la cavité. Cette catégorisation était pressentie (Aujoulat *et al.*, 2013), mais ce travail a permis de la formaliser, chiffrer et préciser.

On note donc que, selon leur(s) objectif(s), les auteurs choisissent de croiser des critères d'analyse différents, parfois plus impliqués dans la localisation des œuvres, dans l'intégration potentielle d'une assistance, dans les comportements impliqués, etc. Cependant, les qualités acoustiques de l'espace ne sont jamais intégrées, malgré les études d'I. Reznikoff et M. Dauvois, qui ont montré leur intérêt. Les caractéristiques graphiques sont également rarement mentionnées (parfois la technique ou le thème est étudié, ainsi que la disposition et le nombre d'entités graphiques). De plus, les champs de visibilité, lorsqu'ils sont étudiés, s'effectuent la plupart du temps avec un éclairage moderne, puissant, à la lumière blanche et dirigée. Il s'agit donc d'un biais important dans l'analyse, qui est toujours précisé par les différents auteurs, mais non résolu.

2. Nouveaux outils

Cette augmentation du nombre de recherches relatives à l'organisation spatiale des grottes ornées s'est accompagnée de l'apport d'outils scientifiques. Ces travaux sont aussi de plus en plus guidés par une approche scientifique rigoureuse : les panneaux sont tous étudiés selon les

mêmes critères, de plus en plus nombreux, et qui dépassent parfois le champ des disciplines traditionnellement liées à l'étude des cavités ornées (géoarchéologie, taphonomie de la paroi ornée) et pouvant nécessiter la mise en œuvre de nouveaux outils, notamment informatiques.

L'essor des systèmes d'informations géographiques (ou SIG) a conduit à leur utilisation dans le cadre de l'étude de sites ornés. En particulier, c'est leur capacité à pouvoir étudier la visibilité entre deux points qui a permis, par exemple, l'exploration de la visibilité à l'abri-sous-roche du Roc-aux-Sorciers (Angles-sur-l'Anglin, Vienne ; Bourdier *et al.*, 2017). Sur ce site du Magdalénien moyen qui présente des bas-reliefs et de la gravure de plein air, le SIG a ainsi permis d'aider à identifier trois niveaux de lecture des œuvres. Mais son utilisation en grotte est plus difficile, puisque ce logiciel est adapté à l'examen de documents en 2D, alors que les champs de visibilité en grotte sont dépendants d'une morphologie en trois dimensions (Ortega Martínez, 2012). Le développement de SIG 3D en est encore à ses débuts mais semble prometteur concernant l'analyse des champs de visibilité des panneaux (Intxaurbe *et al.*, 2020).

Cette question de la visibilité a également été posée concernant l'impact des paléo-reliefs et paléo-paysages proches des sites ornés, et a notamment pu être investigué à Chauvet grâce à l'essor des méthodes de modélisation (Genuite *et al.*, 2016 ; Genuite, 2019).

L'amélioration des sciences statistiques permet une utilisation de plus en plus complexe de celles-ci. Ainsi, les données peuvent être variées (à la fois quantitatives et qualitatives par exemple) et parfois absentes et être tout de même analysées par des outils statistiques (Jouteau *et al.* 2019, Fazenda *et al.*, 2017). Cela permet d'étudier des milieux complexes où les données peuvent manquer (Josse et Husson, 2016 ; Audigier *et al.*, 2016), où elles sont peu nombreuses (Pages, 2004) et d'intégrer des variables diverses dont on ne sait pas à l'avance si elles sont impliquées ou non dans le phénomène étudié.

La question de l'éclairage paléolithique a été peu réinvestie depuis S. de Beaune sur les lampes à graisse paléolithiques (de Beaune, 1987a, 2000), c'est pourquoi l'intégration des données de l'éclairage, souvent issues de ses travaux, sont limitées aux lampes à graisse (Groenen, 2013, 2016 ; Jouteau *et al.*, 2019 ; Ortega Martínez, 2012 ; Pastoors et Weniger, 2011). Cependant, de récentes analyses apportent un renouveau et de nouvelles données sur ce sujet (Asiain et Saura, 2018 ; Medina Alcaide *et al.*, 2019). En effet, les instruments de mesure actuels sont plus précis et peuvent s'accompagner de logiciel permettant une analyse plus poussée.

L'exploration de l'acoustique en contexte souterrain a elle aussi été quelque peu délaissée au début des années 2000, bien que celle des instruments de musique préhistoriques (Buisson, 1990 ; Caussé, 1996 ; Dauvois, 2005 ; Wyatt, 2009) se soit poursuivie, de même que l'analyse des qualités acoustiques de sites archéologiques, mais adaptés à d'autres contextes, protohistoriques ou historiques (Murphy, 2006 ; Martellotta *et al.*, 2009 ; Díaz-Andreu et García Benito, 2012 ; Mattioli *et al.*, 2017 ; Díaz-Andreu *et al.*, 2019). Ici aussi, une récente étude permet d'espérer un renouveau de la discipline (Fazenda *et al.*, 2017). Elle tentait de vérifier si un lien existait entre la position des entités graphiques et les qualités acoustiques de l'espace contigu dans les grottes de La Garma, El Castillo, La Pasiega, Las Chimeneas et Tito Bustillo. Pour cela, des sons produits à l'aide d'un haut-parleur et enregistrés par un microphone ont été combinés à d'autres critères (présence de motifs, type et thème des motifs) et compilées dans une analyse statistique. De manière quelque peu décevante, les résultats n'aboutissent qu'à une faible probabilité de l'existence d'un lien entre les motifs et les qualités acoustiques de l'espace dans ces grottes.

Enfin, ces deux dernières notions sont indissociables du domaine de la perception. Or plusieurs paramètres rentrent en compte dans cette perception, c'est-à-dire dans l'interprétation qu'effectue le cerveau d'un phénomène d'abord physique. Celui-ci est en effet influencé par les capacités physiques de, l'individu, mais aussi modelé par son environnement naturel culturel, et par son apprentissage. Et puisque des différences existent au sein de la population humaine actuelle, alors il est inévitable que des différences de perception existent entre la nôtre et celle des Hommes préhistoriques, et de même au sein de la population préhistorique. Cette discipline, demandant à la fois des compétences dans les domaines de la Préhistoire, de la neurologie et de la psychologie, fut longtemps éludée par les chercheurs, mais de récentes recherches en proposent une nouvelle approche (de Beaune, 2018 ; Boudier-Blet, 2018 ; Fritz, 2020). La première (de Beaune, 2018), a travaillé, à partir d'indices directs et indirects empruntant à la Préhistoire, mais aussi à l'ethnographie ou à l'anthropologie biologique, sur les perceptions sensorielles des *Homo sapiens* du Paléolithique. La seconde (Boudier-Blet, 2018) met en avant l'importance de l'éclairage dans la reconnaissance des motifs pariétaux, en particulier en ce qui concerne les dessins noirs (plus visibles avec un éclairage naturel zénithal) et les gravures (nettement plus lisibles avec un éclairage artificiel de type lampe à graisse), alors que les figures bichromes semblent être les plus remarquables, quel que soit l'éclairage. La dernière (Fritz, 2020), apporte entre autre des éléments de compréhension sur les mécanismes de la représentation de l'espace ou de la mémoire.

3. L'apport des simulations

Dès les années 90 des modèles tridimensionnels de cavités ou d'abris préhistoriques ornés sont réalisés par photogrammétrie et/ou enregistrement laser tridimensionnel (Thibault, 2001). Le but premier est bien sûr d'acquérir et d'archiver l'information. La demande ayant été particulièrement évidente dans le cas de la grotte Cosquer (Bouches-du-Rhône), la première grotte ornée en France à avoir bénéficié d'un enregistrement laser tridimensionnel à l'initiative de Norbert Aujoulat (Aujoulat et Perazio, 2005), puisque les œuvres y sont menacées à court terme par la montée des eaux. Rapidement cependant, son utilisation pour la restitution de sites ornés (fac-similés) fut intégrée puis appliquée. En effet, en reproduisant la cavité ou l'abri au plus proche de l'original, on peut déplacer le flux de visiteurs depuis le site original, souvent fragile, parfois même fermé au public, vers une reproduction moins sensible (Pinçon *et al.*, 2010a ; Lasheras Corruchaga et de las Heras, 2010 ; Malgat *et al.*, 2015).

Son utilisation par les pariétalistes à des fins scientifiques fut également rapide, et de plus en plus d'études de parois, voire de sites entiers, se font en grande partie sur modèle 3D, en complément et parfois en même temps que les observations sur le terrain. Son principal atout réside dans sa capacité à révéler un espace en trois dimensions sans déformation, contrairement aux photographies. Elle permet également de comparer deux motifs spatialement éloignés, ou encore de modifier artificiellement l'éclairage afin de faire ressortir les ombres des gravures et reliefs (Pinçon *et al.*, 2010b ; Jaubert *et al.*, 2012).

Dans le même temps, des simulations effectuées dans ces modèles furent utilisées à des fins conservatoires, en particulier pour la grotte de Lascaux (Lacanette et Malaurent, 2010 ; Lacanette *et al.*, 2007, 2009), mais aussi sur des questions de taphonomie comme à la grotte Chauvet-Pont d'Arc (Lacanette *et al.*, 2017). Une simulation d'éclairage de site orné a eu lieu sur le site du Cap Blanc (Dordogne, France), où un éclairage à la lampe à graisse fut simulé avec le logiciel *Radiance* (Devlin *et al.*, 2002). Cette simulation conforte la possibilité (sans la prouver) qu'un éclairage paléolithique, à la flamme nue et vacillante, a pu provoquer l'animation des sculptures qui compose la frise ornée de cet abri.

Mais alors que les logiciels se sont sans cesse améliorés depuis et ont été utilisés sur de nombreux sites historiques (Devlin *et al.*, 2002 ; Masuda *et al.*, 2008 ; Happa *et al.*, 2010), la seule autre simulation d'éclairage dans un site préhistorique est celle de la grotte Ardales (Hoffmeister *et al.*, 2016 ; Hoffmeister, 2017). Pour simuler un éclairage naturel rentrant dans

la grotte, les auteurs modélisèrent la trajectoire des rayons du soleil, ce qui leur permit de déterminer jusqu'où ceux-ci pouvaient pénétrer lorsque la cavité ne disposait pas encore d'une entrée artificielle fermée. Pour simuler un éclairage artificiel, ils utilisèrent le logiciel *Blender*, où des points lumineux ont été calibrés pour disposer de caractéristiques semblables à celles de bougies modernes, considérées comme proches des lampes à graisses paléolithiques (de Beaune, 1987a) : 1 500 K pour la chaleur (ou couleur), une intensité de 12 W (soit environ 1 cd ou 12,6 lm), et une taille de la source lumineuse de 40 mm. Leurs résultats confirment les investigations de A. Pastoors et G. C. Weniger (2011) : cet éclairage est suffisant pour s'orienter dans l'obscurité complète, cependant pour pouvoir observer les figures, en particulier lorsque la couleur joue un rôle important dans leur perception, il est nécessaire de disposer de plusieurs de ces sources lumineuses.

Cependant, il est difficile d'aller plus loin en termes d'interprétation, car il s'agit ici d'un rendu. Ce rendu, s'il est réaliste, n'est pas réel. Comme les auteurs le précisent (Hoffmeister, 2017), il faudrait incorporer des informations concernant le comportement réflecteur des matériaux présents dans la grotte (calcaire, argiles, concrétions, etc.) et pouvoir prendre en compte l'adaptation de l'œil à son environnement et à la luminosité de nos écrans.

En ce qui concerne les simulations acoustiques, elles se font rares elles aussi. On peut notamment citer les simulations réalisées à la grotte du Parpalló (Jiménez Gonzáles *et al.*, 2008), où les simulations ont permis de comparer les qualités acoustiques des lieux selon plusieurs hypothèses de remplissage, correspondant aux niveaux du sol aux différentes époques d'occupation du site (Gravettien, Magdalénien et actuel). Là encore, l'un des biais fondamentaux réside dans l'absence de mesure d'absorption sur les matériaux du site (celle-ci est calibrée, dans l'étude, à l'aide de mesures sur des matériaux pré-mesurés tels que du sable).

Aujourd'hui, nous disposons des outils informatiques et mathématiques suffisants pour pouvoir simuler de nombreux phénomènes naturels ou anthropiques (p. ex. production de lumière ou de son). Pourtant, s'il s'agit d'outils quotidiennement employés dans certains domaines, comme le bâtiment, ils sont encore peu employés en archéologie.

CHAPITRE 2 – LE CORPUS DE SITES

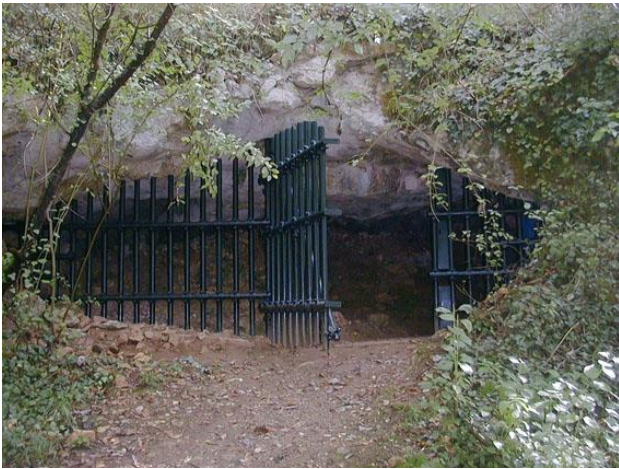
La méthodologie mise en œuvre dans notre étude nécessitant un investissement en temps considérable pour l'investigation de chaque site, nous ne nous appuyerons pas sur des données statistiques qui mettraient en jeu de nombreuses cavités, mais sur un corpus très restreint qui permettra le déploiement précis des outils choisis, leur vérification et la confirmation de leur pertinence dans le contexte des grottes ornées.

Notre sujet tirant ses origines des problématiques de recherche actuellement en cours à la grotte de Cussac (organisation du dispositif pariétal, visibilité des panneaux, accessibilité aux parois, etc.) et nos travaux (Jouteau *et al.*, 2019, 2020) étant intégrés à ceux menés par le PCR Cussac (Projet Collectif de Recherche, dir. J. Jaubert), ce fut naturellement la première cavité intégrée à notre corpus. Actuellement, seule une soixantaine de mètres (sur environ 1,6 km de galerie unique) sont modélisés, c'est pourquoi nous avons choisi d'intégrer une seconde grotte ornée, au modèle 3D texturé complet. Nous avons choisi une cavité complémentaire de Cussac sur plusieurs aspects afin d'appliquer nos outils à des morphologies naturelles différentes (comme la présence de plusieurs galeries), à des contraintes conservatoires variées, et à divers questionnements archéologiques. La grotte de Lascaux remplissant l'ensemble de ces conditions, nous avons souhaité l'intégrer comme le second site de notre corpus. La grotte de Lascaux bénéficie, en outre, d'une reprise de son étude sur laquelle nos travaux ont pu s'adosser (projet MicroPaGO, dir. D. Lacanette, et PCR LAsCO, dirs. M. Langlais et S. Ducasse).

Ces deux cavités à haute valeur patrimoniale voient leur accessibilité fortement (à Cussac), voire extrêmement (à Lascaux) limitée pour des raisons conservatoires. De plus, il est impossible d'y réaliser des prélèvements ou autre action invasive. C'est pourquoi nous avons décidé de compléter notre corpus par une grotte non ornée et dédié aux recherches : la grotte laboratoire de Leye et une carrière souterraine (Lugasson) pour lesquelles nous avons physiquement accès aux lieux mais aussi à leur modèle 3D (encadrement pour ces deux sites C. Ferrier, UMR PACEA). Cela nous a permis d'affiner et/ou de vérifier nos modèles numériques avant de les appliquer sur les sites ornés.

Nous proposons au lecteur de poursuivre par la (re)découverte de ces cavités et de leur histoire sous la forme d'un résumé, une description plus détaillée des grottes de Cussac et de Lascaux est proposée en 3.1.B. *Cussac au Gravettien* et 3.2.B. *Lascaux, le contexte physique*).

A. La grotte de Cussac



Découverte en septembre 2000 par Marc Delluc, la grotte de Cussac (Figure 2) est une grotte ornée et sépulcrale située sur la commune du Buisson-de-Cadouin, au sud de la Dordogne. Elle est située à proximité du hameau de Cussac, qui lui a donné son nom (Figure 3).

Figure 2 : Entrée actuelle de la grotte de Cussac (CC-BY-SA-C. Lamaison).

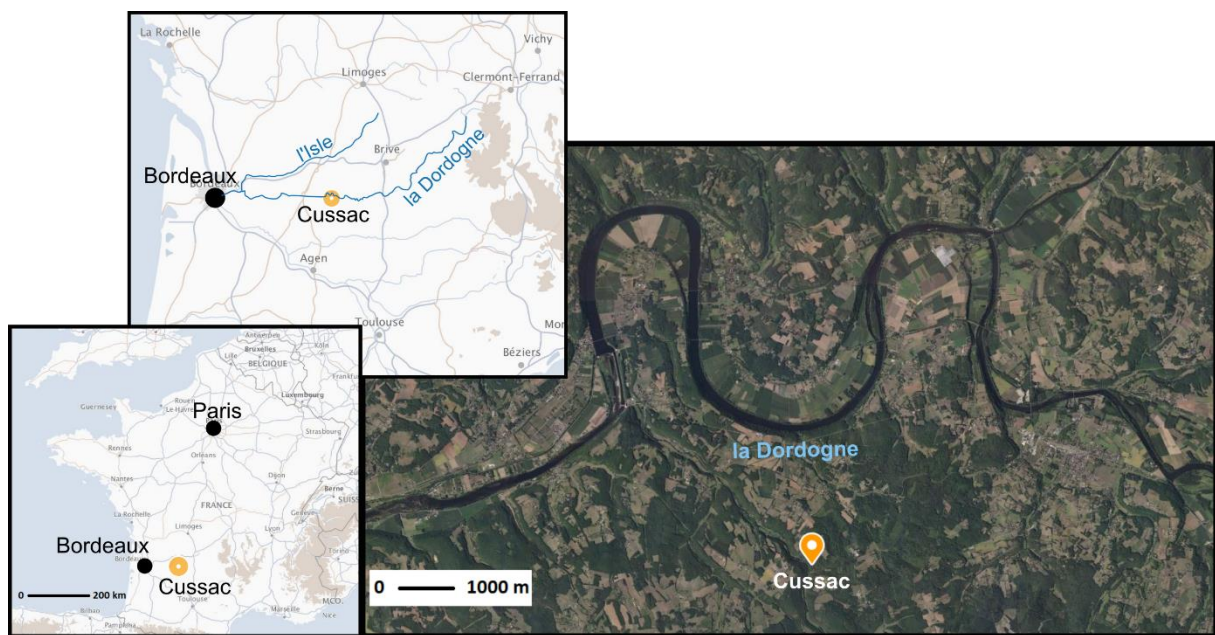


Figure 3 : Situation géographique de la grotte de Cussac (doc. Géoportail.gouv, modifié).

Une carte topographique complète et grand format est disponible Sous-chapitre 3.1.B. *Cussac au Gravettien* (Figure 114), mais nous proposons ici au lecteur de découvrir la grotte avec un plan résumant la localisation des principaux panneaux et secteurs de la cavité (Figure 4).

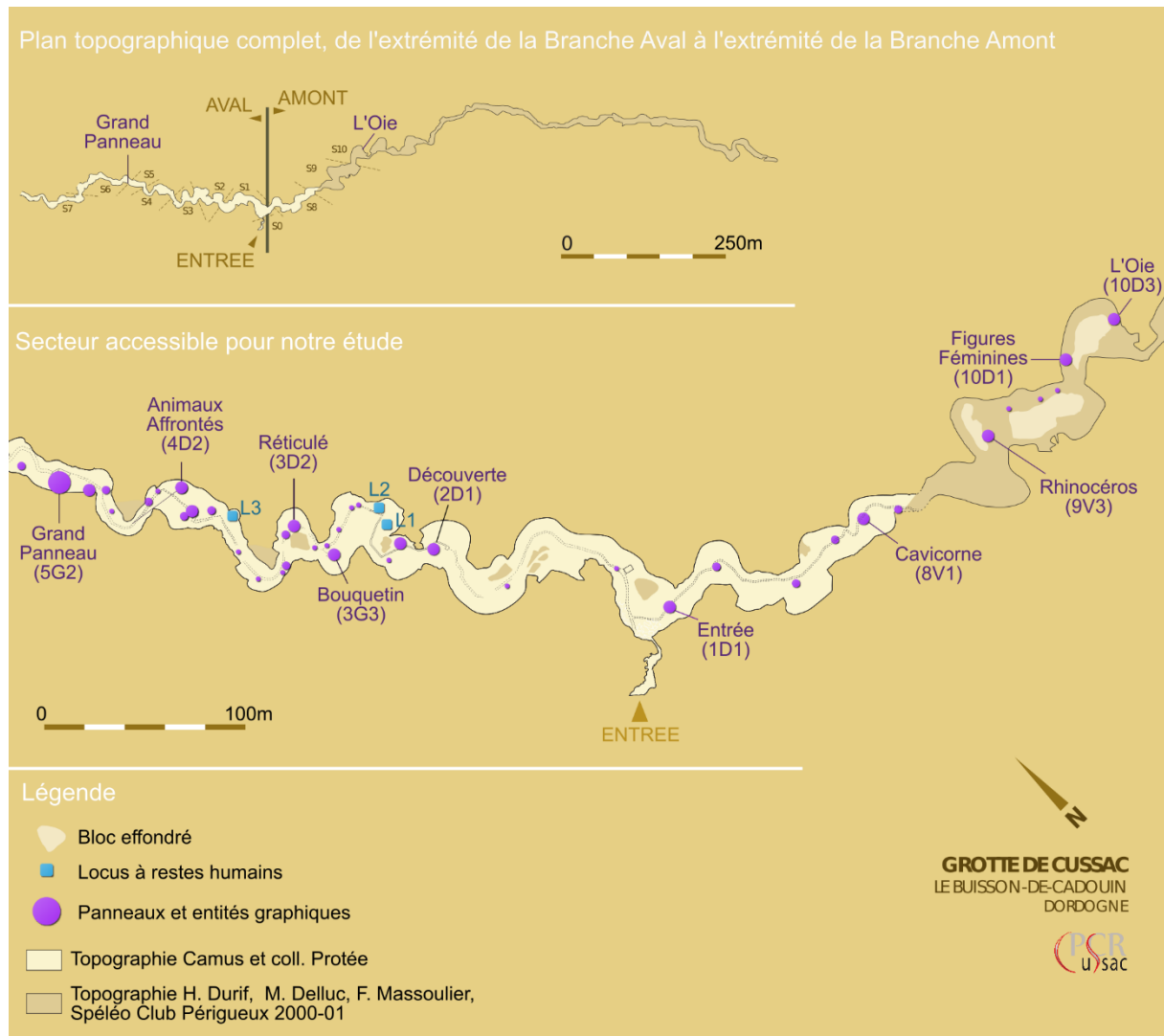


Figure 4 : Plan topographique résumé de la grotte de Cussac (topographie H. Camus et coll. Protée, DAO Archéosphère).

1. Description physique de la cavité

La grotte de Cussac est constituée d'une unique galerie (Figure 4) qui se développe sur environ 1 600 mètres et qui peut être subdivisée en deux parties depuis l'entrée actuelle : la Branche Amont, longue de près d'un kilomètre et d'orientation pyrénéenne (N110), et la Branche Aval, d'environ 600 m de long et d'orientation hercynienne (N140). À la jointure de ces deux galeries s'ouvre l'Entrée matérialisée par un éboulis qui obstruait l'accès jusqu'à la découverte. Un conduit, aujourd'hui artificialisé, débouche sur un porche qui a jadis été fouillé par É Peyrony qui y trouva des vestiges tardiglaciaires. Les extrémités amont et aval sont obstruées par des concrétionnements encore actifs ou des bouchons d'argile. L'accès à la cavité se fait donc par

un tunnel bétonné traversant la zone d'éboulis située entre le porche et la grotte. La Branche Amont se développe sur la droite et la Branche Aval sur la gauche, depuis l'entrée actuelle et probablement paléolithique (Aujoulat *et al.*, 2001a, 2001b, 2002).

La galerie a été creusée par un réseau souterrain, ce qui lui donne un tracé méandrique (Figure 4Figure 5), et une section étagée selon quatre niveaux (Figure 5, Jaubert *et al.*, 2017 ; Camus, 2020) :

- Le niveau supérieur +3 correspond à un canyon paragenétique qui suit l'axe de la fracturation dominante. Ce niveau, sous la forme d'un chenal de voûte, constitue la partie supérieure visible de la galerie.
- Le niveau médian est caractérisé par une morphologie en méandres. Au fur et à mesure du creusement de la galerie, ces niveaux s'éloignent de l'axe principal de la fracturation. Il peut être subdivisé en deux niveaux :
 - Le niveau +2, qui forme le plafond des méandres et de l'ensemble des galeries qui s'éloignent de l'axe du chenal de voûte.
 - Le niveau +1, qui correspond au niveau inférieur des méandres. C'est à ce niveau-là que nous nous déplaçons actuellement.
- Le niveau inférieur -1 se développe sous la galerie accessible. Il n'est visible que depuis quelques puits et canyons et est encore parcouru par des circulations actives.

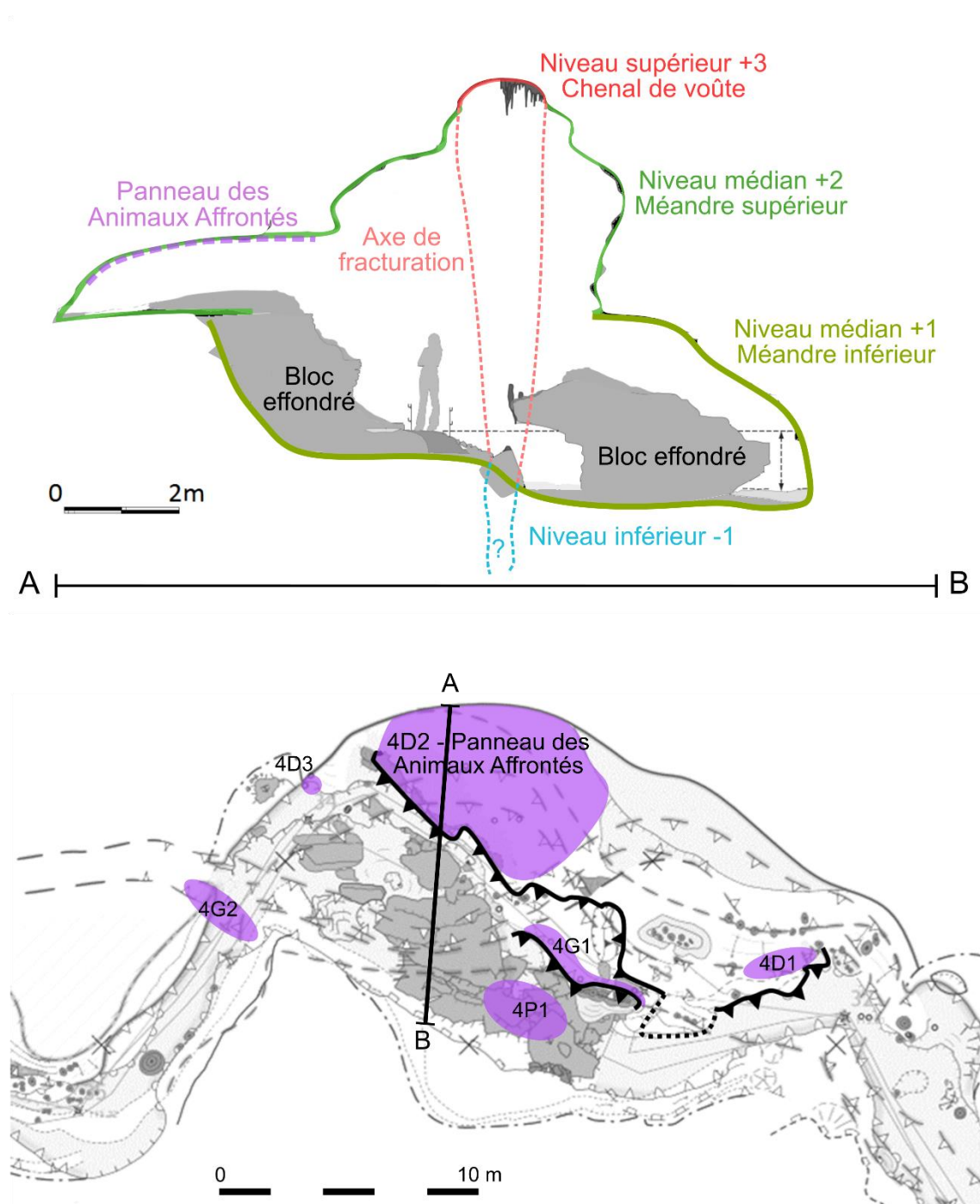


Figure 5 : Profil d'une section de la galerie de la grotte – Panneau des Animaux Affrontés (coupe H. Camus, modifié).

La grotte est entièrement creusée dans l'horizon supérieur du Campanien, plus précisément dans les formations de Journiac (c5JoG) et/ou de la Couze (c5Cz), constituées de calcaires grossiers jaunes à roux (Karnay *et al.*, 1999). Dans la grotte, cinq macrofaciès peuvent être distingués à l'œil nu (Platel *et al.*, 2020b). Une première formation, appelée « litée » car formée de plusieurs bancs, forme la partie basse de la galerie accessible et peut être subdivisée en trois

faciès : la strate inférieure est hautement irrégulière et bioturbée (faciès 1), la strate médiane est composée de larges sillons obliques de quelques mètres de long (faciès 2) et la strate supérieure correspond à des bancs plus discontinus allant du centimètre au décimètre (faciès 3). Ces bancs sont surmontés du faciès 4, dit « massif », qui constitue la partie haute de la galerie actuellement accessible. Ce faciès est composé de bancs métriques à la surface beaucoup plus régulière que les bancs précédents, offrant de larges surfaces continues (Ferrier *et al.*, 2017a). Enfin, au sommet de la grotte, le faciès 5 correspond à un calcaire bioclastique dans lequel s'est creusé le chenal de voûte.

Ces calcaires ont subi une dissolution partielle de leur surface, sur 2 à 3 mm de profondeur. Celle-ci provoque un enrichissement en fer de la surface du calcaire (phénomène qui est probablement à l'origine de sa couleur ocrée), qui devient également plus poreuse, et donc plus tendre (Ferrier *et al.*, 2017a). Cette altération est inégalement répartie puisque le faciès massif semble plus atteint que les autres, et que sur l'ensemble des faciès les parties saillantes sont plus poreuses que les parties concaves. Or, dans les parties moins altérées, les lignes sont plus fines et les bordures des traits gravés plus nettes, tandis que dans les zones plus altérées, les traits gravés sont plus larges, plus blancs, mais moins nets, ce qui a pu influencer les préhistoriques lors de la construction du dispositif pariétal (Ferrier *et al.*, 2017a).

2. Contexte archéologique

La grotte de Cussac compte parmi les grottes ornées exceptionnelles du patrimoine français, tant par l'importance de son dispositif pariétal que par l'originalité de son contexte archéologique, en particulier funéraire.

En effet, le fonds iconographique de la cavité est constitué de plus de 825³ entités graphiques réparties en au moins 72¹ panneaux, ce décompte augmentant à chaque campagne de terrain (Feruglio *et al.*, 2020a). Cependant, les entités graphiques se répartissent de manière très inégale entre les panneaux, de 1 à plus de 127 motifs dans le cas du Grand Panneau (Feruglio *et al.*, 2019), tandis que la répartition des panneaux au sein de la cavité est elle aussi inéquitable, puisque les trois-quarts des panneaux découverts jusqu'à présents – dont ceux de grande dimension et possédant le plus d'entités graphiques – se concentrent dans les 600 mètres de

³ Décompte de la mission 2020

Chapitre 2 – Le corpus de sites

galerie de la Branche Aval, tandis que la Branche Amont, longue d'environ un kilomètre, ne contient qu'environ un quart des panneaux.

La quasi-totalité des motifs sont gravés, y compris les figures de grandes dimensions (la plus grande étant un bison de 3,50 m de long, ce qui avoisine les dimensions des grands taureaux de Lascaux), chose assez inhabituelle dans l'art paléolithique pour des gravures. Cela peut être lié à la tendreté du support calcaire qui est aisément gravé, mais dont le grain ne supporterait pas la gravure fine, de plus le contraste du fond de trait clair sur la surface patinée ocre du calcaire rend les sujets très visibles (Figure 6).

Les motifs appartiennent au registre thématique classique de l'art pariétal paléolithique (bisons, chevaux et mammouths représentant l'essentiel du bestiaire), avec des conventions graphiques qui les rapprochent en particulier du Gravettien moyen (absence de perspective, détails corporels peu fréquents voire absents, et profils dessinés selon un style « fil de fer »). Cependant, quelques motifs originaux (oie, rhinocéros) ou, au contraire, l'absence de motifs récurrents de cette période (mains négatives), mettent en évidence la singularité de Cussac (Feruglio *et al.*, 2020a ; Feruglio et Bourdier, 2020).

Les restes humains – tous situés en Branche Aval – sont sans conteste les vestiges archéologiques les plus impressionnants de la grotte. Déposés dans des bauges d'ours localisées dans trois locus à proximité immédiate du cheminement, ils contiennent les restes d'au moins six individus, adolescents et adultes (Kacki *et al.*, 2020).

Les autres vestiges matériels découverts sont peu nombreux : trois pièces lithiques en Branche Aval, et une baguette en bois de renne ainsi que deux lampes à graisse en Branche Amont. Aucun de ces objets n'a une facture suffisamment spécifique pour pouvoir attribuer leur fabrication à une période précise du Paléolithique supérieur, mais ils demeurent compatibles avec le Gravettien moyen (Jaubert *et al.*, 2017).

Enfin, les traces d'activité (TrAcs) sont le dernier type de vestiges étudié à Cussac. Il s'agit des traces laissées par les Hommes ou les animaux (en particulier les ours) lors de leur fréquentation de la cavité. Celles-ci regroupent les traces ou marques colorées laissées sur les parois, les charbons ou leurs traces laissées par le passage d'une torche, les empreintes de pas, de glissades, d'appuis corporels, de marques de doigts, etc. laissées sur l'argile des sols et des parois, ou encore les déplacements de spéléothèmes et de roches (Ledoux *et al.*, 2017).

Partie 1 - Fondements de l'étude

Trois datations ont pu être réalisées au carbone 14 : deux sur des charbons récoltés en paroi ou au sol, et un sur un os humain, tous donnant des résultats concordants avec une unique période d'occupation humaine autour de 29 000 ans cal BP, ce qui correspondrait à une incursion lors du Gravettien moyen, en accord avec les conventions graphiques du dispositif pariétal (Jaubert *et al.*, 2017).

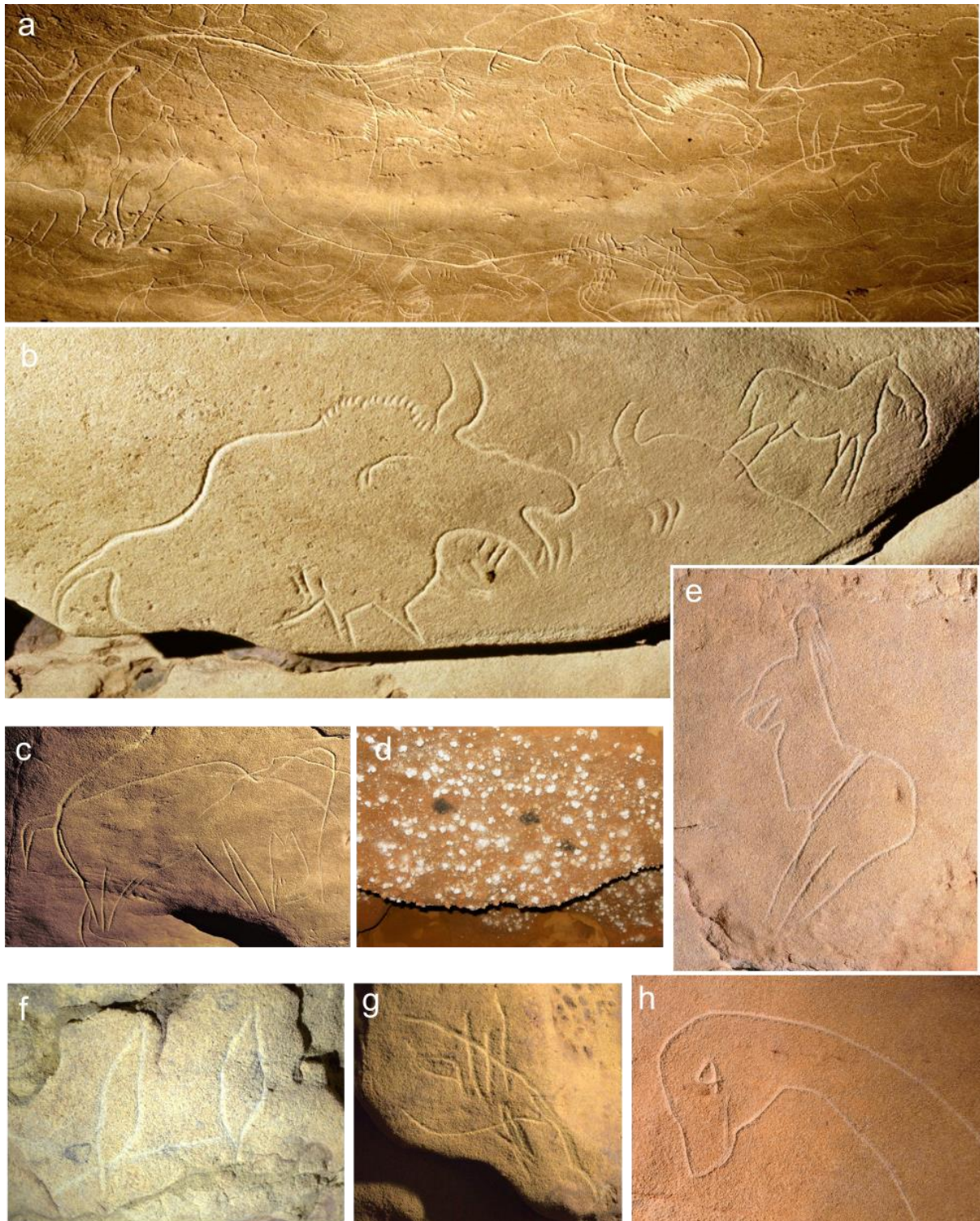


Figure 6 : Sélection de quelques motifs de la grotte de Cussac. a : Grand Bison du Grand Panneau (cl. N. Aujoulat), b : bison et cheval du Panneau des Animaux Affrontés (cl. N. Aujoulat), c : Petit Mammouth du Panneau du Bouquetin (cl. N. Aujoulat), d : Panneau des Trois Points Noirs (cl. M. Peyroux), e : figure féminine du Panneau des Figures Féminines (cl. V. Feruglio, C. Bourdier), f : Panneau des Fusiformes (cl. V. Feruglio), g : Panneau de la Tête à l'Œil Ovalaire (cl. V. Feruglio), h : tête de l'Oie du Panneau de l'Oie (cl. V. Feruglio).

3. Moyens et outils d'études

Cussac bénéficie d'une conservation naturelle exceptionnelle et d'une découverte suffisamment récente pour que tout ait été mis en œuvre pour préserver au maximum cet état. Dès sa découverte, l'inventeur fit très attention à préserver les sols, par exemple en marchant sur ses pas à son retour. Par la suite, toutes les interventions ont été menées dans un cadre conservatoire extrêmement strict. La première décennie ayant suivi la découverte fut consacrée à l'acquisition des parcelles de la grotte par l'État, aux travaux d'aménagement, en particulier concernant l'accès à la grotte, celui-ci se faisant à travers l'éboulis d'entrée, au balisage du cheminement, aux premiers suivis climatiques et environnementaux, à la mise en place des conditions d'accès au site et aux premiers inventaires d'évaluation du potentiel archéologique (Fourment *et al.*, 2012). Depuis 2008, un PCR (dir. J. Jaubert) a été mis en place afin de coordonner les recherches scientifiques.

Aujourd'hui, l'accès à la grotte pour les recherches est doublement limité, à la fois dans le temps et dans l'espace. En effet, la cavité n'est accessible que lorsque le taux de CO₂ est suffisamment bas, soit entre le début de l'hiver et le début du printemps. En particulier, une campagne de terrain de quatre semaines a lieu chaque année entre janvier et février. Au sein de la grotte, un seul cheminement est possible, large d'environ 50 cm et balisé par des piquets et filins en inox ou par une passerelle métallique dans les secteurs les plus difficiles d'accès mais fréquemment franchis. Actuellement⁴, la grotte est balisée sans interruption depuis le fond de la Branche Aval jusqu'à 800 m en amont, au-delà du Panneau de l'Oie en Branche Amont. De fait, ce cheminement contraint ne passe pas toujours au meilleur endroit pour étudier les différents objets listés précédemment.

Pour surmonter les limitations d'accès au site et à ses sujets, plusieurs campagnes de numérisations 3D au laser-scan ou par photogrammétrie ont eu lieu (Figure 7). Un premier relevé 3D-laser a été réalisé en 2012 par le cabinet Perazio depuis quelques mètres en amont du Panneau de la Découverte jusqu'à quelques mètres en aval du Locus 2. Un second relevé 3D-laser a été réalisé par Patrimonio e Industria en 2015. Celui-ci couvre de l'entrée de la grotte jusqu'au début du relevé Perazio puis il reprend après le relevé Perazio, jusqu'au Panneau de l'Animal Acéphale compris. Malheureusement, contrairement au relevé Perazio, le relevé Patrimonio n'a pas pu être opérationnel pour notre étude, un travail sur les données brutes étant

⁴ À la fin de la mission de terrain de janvier 2021.

Chapitre 2 - Le corpus de sites

encore nécessaire pour fermer le modèle (prérequis pour notre étude). Enfin, depuis 2015, des commandes de couvertures photogrammétriques sont réalisées sur des secteurs précis par P. Mora (Archéovision Production), comme par exemple le secteur du Grand Panneau, le Panneau du Triptyque, ou encore des empreintes de pas.

Ces modèles, au-delà d'être une aide pour la recherche scientifique, permettent de conserver un aperçu de l'état de la cavité lors de sa numérisation (Feruglio *et al.*, 2015).

La mise en place d'un Système d'Information Géographique (SIG) en trois dimensions, à l'aide de ces modèles 3D, est en cours de conception. Cela permettra, à terme, de regrouper la documentation (topographie, bases de données, photographies, etc.), et d'effectuer des requêtes et des croisements de données, ce qui en fera un outil fédérateur indispensable pour les futures études interdisciplinaires (Aujoulat *et al.*, 2013). En attendant la mise en place de cet outil, les informations des différentes équipes sont placées sur un fond topographique de précision fournit par H. Camus (*Protée*), disponible du Panneau du Fond, en Branche Aval, jusqu'au Panneau de l'Oie, en Branche Amont.

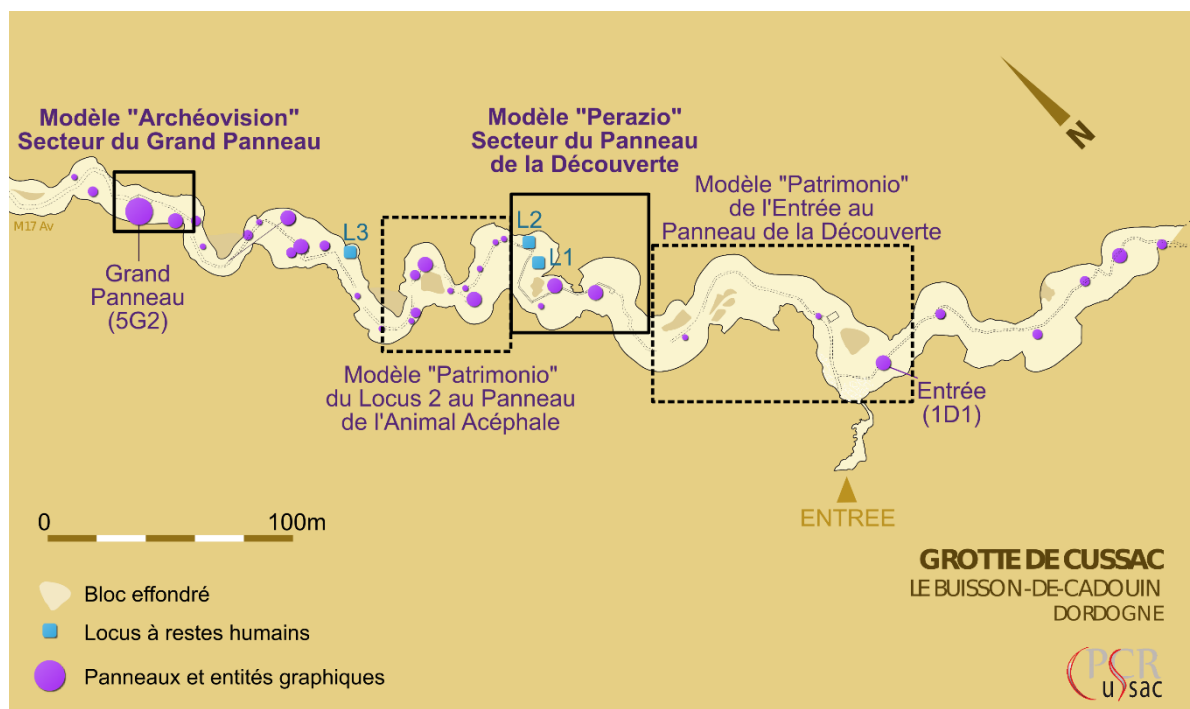


Figure 7 : Emprise des modèles 3D réalisés par Perazio Engineering « Perazio », Patrimonio e Industria « Patrimonio » et Archéovision Production. (Fond topographique Camus et coll. Protée).

B. La grotte de Lascaux

La grotte de Lascaux est l'une des grottes ornées majeures du patrimoine préhistorique mondial. À ce titre, elle sera inscrite en 1979 au patrimoine mondial de l'humanité par l'Unesco. La cavité, découverte en 1940, est située en Dordogne (Figure 8), sur la commune de Montignac.

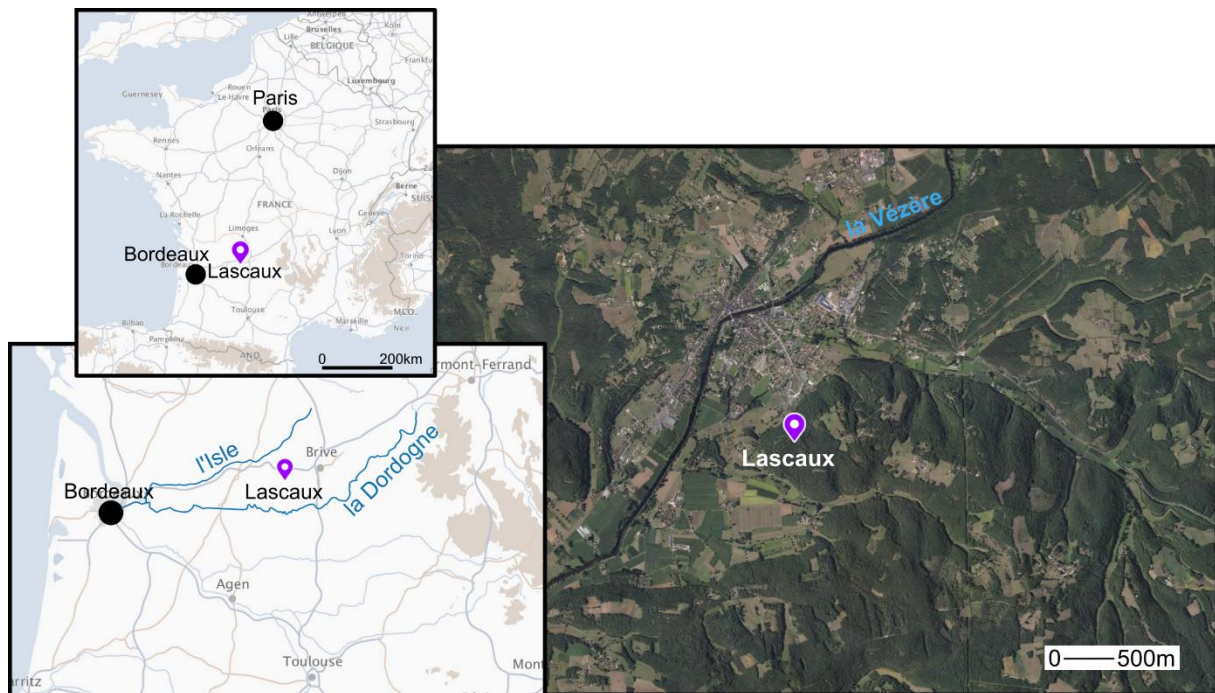


Figure 8 : Situation géographique de la grotte de Lascaux (doc. Géoportail.gov, modifié).

1. Description géologique de la cavité

La grotte de Lascaux se situe dans la partie sommitale de la colline éponyme. Elle fait partie d'un réseau karstique en partie comblé par un remplissage argilo-sableux actuellement accessible sur environ 235 m mais qui se poursuit au moins au-delà du Cabinet des Félin et de la Salle Ensablée. De plus, il semble y avoir un réseau inférieur, comme en témoignent la présence d'un avaloir dans la Salle des Taureaux et la présence de CO₂ au fond du Puits (Aujoulat, 2002).

Le réseau accessible, qui constitue la grotte de Lascaux *stricto sensu*, regroupe plusieurs galeries d'orientations différentes (Figure 10) creusées dans des horizons du Coniacien

supérieur. Les galeries se sont développées aux dépens d'une diaclase, ce qui leur donne un profil beaucoup plus haut que large, dont les spécificités dépendent des modalités du creusement de ces diaclases par un réseau souterrain. La partie sommitale des galeries est dominée par la forme en coupole, particulièrement remarquable dans la Salle des Taureaux (Figure 9) mais également présente dans les zones vestibulaires, le Diverticule Axial, l'Abside, la Nef, le Puits, et une grande partie du Cabinet des Félines. Seuls le Passage, le Conduit final et la Salle Ensablée, au tracé plus méandrique, ne montrent pas de forme en coupole. Les voûtes et parois présentent également une découpe particulière, qu'on pourra qualifier de « trou de serrure » (Aujoulat, 2002).

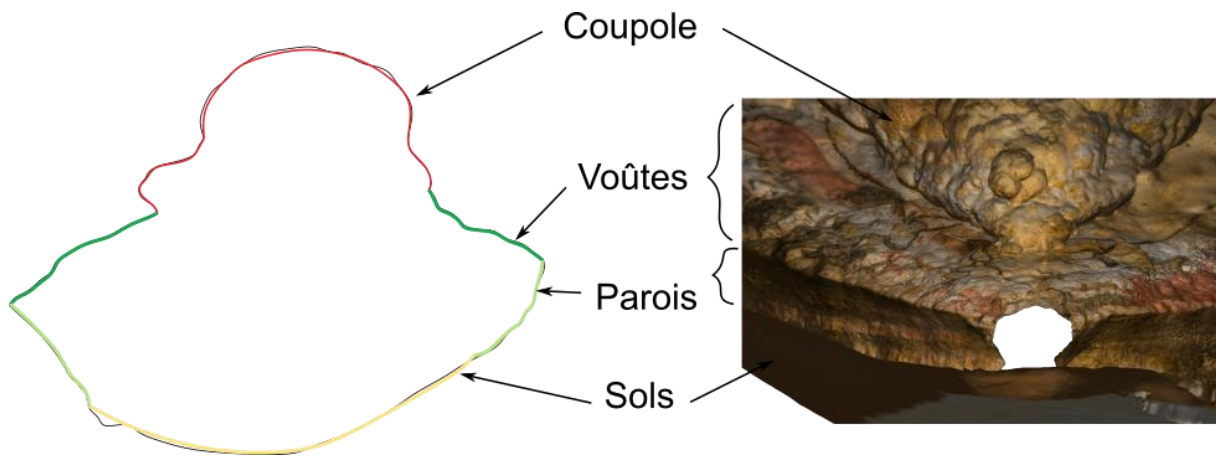


Figure 9 : Formes des coupoles, voûtes et parois à Lascaux, exemple de la Salle des Taureaux (3D Perazio Engineering 2012).

Des percolations et entrées d'eau ont provoqué la formation de dépôts carbonatés au cours du temps sur les parois et sols : dépôts de calcite, formation de gours et évolution en mondmilch. Les premiers se sont déposés antérieurement à l'incursion paléolithique sur les voûtes et parois, ce qui offre, en certains endroits, un support particulièrement blanc et propice à la peinture. Les seconds se sont édifiés à l'Holocène et ont donc recouvert une partie des sols paléolithiques. Le mondmilch, principalement présents dans la Galerie du Mondmilch, n'est pas daté et on ne sait pas s'il constitue une destruction d'un support préalablement orné ou, si, déjà mis en place, il ne permettait pas l'ornementation au Paléolithique.

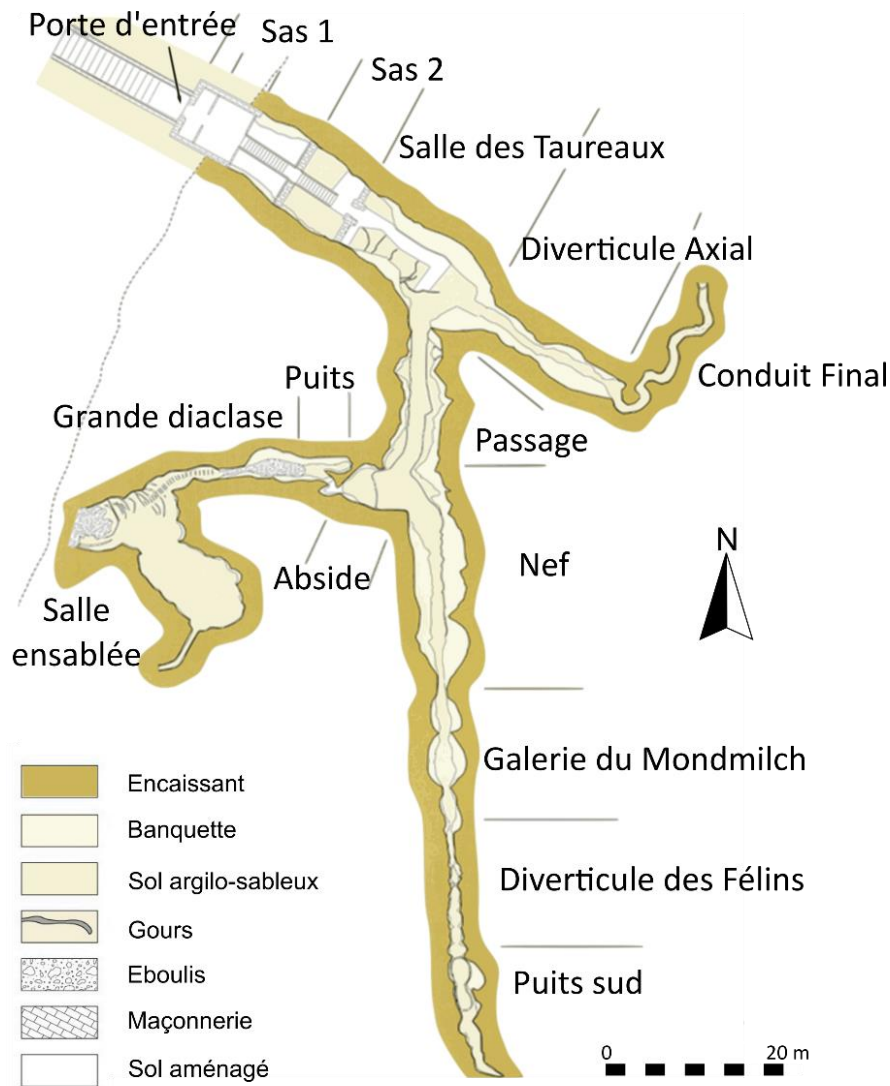


Figure 10 : Plan topographique de la grotte de Lascaux, d'après doc. N. Aujoulat, fond topographique C. Bassier.

2. Contexte archéologique

La découverte de la grotte de Lascaux, monumentale à plus d'un titre, fut un choc, comme en témoignent les surnoms qui ont pu être lui attribués : « chapelle Sixtine de l'art pariétal », « Versailles de la Préhistoire » ou encore « Altamira française ». En effet, outre la force des éléments figuratifs par le choix de la peinture polychrome générant un contraste fort avec le support blanc, leur taille, parmi les plus grandes de l'art pariétal (jusqu'à près de 5,60 m de long pour le Quatrième taureau de la Salle des Taureaux), s'ajoute au nombre et à la densité des entités graphiques (plus de 1760 motifs découverts à ce jour, dont près de 1000 dans l'Abside, Aujoulat, 2002). En outre, la fraîcheur des pigments (en particulier dans la Salle des Taureaux

et le Diverticule Axial), la présence d'une scène (Scène du Puits), ou encore la présence de palimpsestes (Abside) ont également contribué à sa célébrité.

Les figures (Figure 11) comprennent à la fois un bestiaire dit « classique » pour l'art préhistorique (cheval, bovinés, cerfs, bouquetins), bien qu'orienté vers une faune plutôt tempérée, et un bestiaire original, avec des animaux rarement représentés dans l'art pariétal (félins, rhinocéros, oiseau, ours), et imaginaires (la « Licorne »). Ce bestiaire, qui représente plus de 40% du fond iconographique, ne doit pas faire oublier les signes (environ 28%), les motifs indéterminés (environ 29%) et le seul anthropomorphe clairement établi (l'homme à tête d'oiseau de la Scène du Puits). Les entités graphiques ont parfois été peintes, dessinées, gravées, voire ont été gravées et peintes. Malgré une bonne conservation de nombreuses œuvres, certaines peintures ont pu être effacées avec le temps, et des gravures érodées, le décompte précédent n'est donc pas absolu (Aujoulat, 2002, 2004).

Outre son dispositif pariétal, Lascaux est aussi connue pour l'importance du matériel archéologique qui était présent dans ou sur les sols au moment de sa découverte : outils en silex, os d'animaux, sagaies, lampes à graisses, palettes et colorants, charbons de bois, etc. (Leroi-Gourhan et Allain dir., 1979). Malheureusement, ces sols ont été en grande partie détruits lors de travaux d'aménagements et une part importante de ce patrimoine a disparu. On sait cependant qu'une partie d'entre eux est décorée par des motifs similaires à ceux présents sur les parois (Leroi-Gourhan, 1979a).

Depuis sa découverte, et compte tenu de l'impossibilité de directement dater les pigments (aucune matière organique n'est présente dans les peintures), les spécialistes de l'art ou des vestiges ont proposé plusieurs estimations sur l'époque de fréquentation de la grotte. Les conventions graphiques, les thèmes du bestiaire et des signes sont assez originaux, ni caractéristiques du Gravettien (environ 35 000-25 000 cal BP), ni caractéristiques du Magdalénien classique (19 000-14 000 cal BP) – les deux chrono-cultures les mieux documentées de l'art pariétal. Les études les plus récentes placent plutôt cet art entre la fin du Solutréen et le début du Magdalénien (24 000-20 000 cal BP ; Leroi-Gourhan, 1979b ; Aujoulat, 2002). L'analyse du matériel archéologique récemment reprise dans le cadre du PCR LAsCO (dirs. M. Langlais et S. Ducasse) fait davantage consensus : il daterait de la phase initiale du Magdalénien (22 000-19 000 cal BP). Enfin, cinq échantillons d'os de renne découverts dans le niveau archéologique ont été datés autour de 21 000 cal BP, à l'orée de la phase la plus ancienne du Magdalénien, faisant de Lascaux un site clef de la transition entre

Partie 1 - Fondements de l'étude

Badegoulien et Magdalénien initial (Ducasse et Langlais, 2019). En l'absence de la possibilité d'attribuer une appartenance chrono-culturelle directe à l'art de Lascaux, il est toutefois possible de poser l'hypothèse qu'une partie au moins des vestiges au sol sont contemporains des manifestations artistiques pariétales. On peut alors poser l'hypothèse d'une fréquentation de la cavité entre 24 000 et 18 000 cal BP, et peut-être resserrée autour de 21 000 cal BP.



Figure 11 : Sélection de quelques entités graphiques de la grotte de Lascaux. a : Cheval flottant (Salle des Taureaux), b : la Licorne (Salle des Taureaux), c : Cheval Chinois (Diverticule Axial), d : Bisons Adossés (Nef), e : Scène du Puits (Puits), f : chevaux affrontés (Cabinet des Félines), g : la Vache Noire (Nef), h : Frise des Cerfs (Nef), 3D Perazio Engineering 2012.

3. Problématique conservatoire et recherches actuelles

Dès sa découverte, le 12 septembre 1940, les sols de Lascaux furent foulés par les quatre adolescents inventeurs de la grotte. Très rapidement Léon Laval, puis l'abbé Breuil visitent la cavité et reconnaissent l'ancienneté de ses œuvres, permettant son classement au titre des Monuments Historiques en décembre 1940.

Cependant, ces deux personnalités ne sont pas les seuls à visiter la cavité, puisque dès 1940 badauds et curieux peuvent entrer dans la grotte. Afin de permettre son accès à tous, l'entrée est dégagée, les gours de la Salle des Taureaux percés, provoquant l'effondrement des sols dans cette partie de la cavité, la plate-forme argileuse située au-dessus du Puits est creusée, et les sols sont tassés par le passage des visiteurs. En parallèle, les vestiges archéologiques présents en surface sont ramassés dès cette époque. Puis, en 1948, une série de travaux sont réalisés, dont le creusement de tranchées de circulations et l'aménagement de l'entrée de la grotte, afin d'officiallement ouvrir la grotte aux visites. S'ensuit une intense activité touristique qui mènera à la fermeture de la grotte. S'ensuit une intense activité touristique qui, dès 1955, provoquera les premiers indices d'altération des parois, dont une condensation intermittente d'eau accusant un début de développement de calcite (la « maladie blanche ») et d'organismes bactériens et végétaux (la « maladie verte »). Pour tenter de retrouver l'équilibre premier de la cavité, d'autres aménagements seront menés en 1957-58 : les sols sont creusés pour y insérer des gaines électriques et des conduits de circulation d'air reliés à une machinerie de ventilation sous l'escalier d'entrée. Ces travaux détruiront l'essentiel des niveaux archéologiques encore en place. Malgré tout, il apparaîtra que l'équilibre ne pourra être maintenu qu'en interdisant des visites de masse et la grotte sera fermée par A. Malraux en 1963 (Sarradet, 1979 ; Delluc et Delluc, 1979b).

À partir de ce moment-là l'accès à la grotte sera de plus en plus restreint, y compris aux équipes de recherche. Une nouvelle crise au début des années 2000 sera à l'origine d'une restriction encore plus grande des visites. Afin de mettre en place une surveillance constante des risques encourus, un constat d'état est établi, différents capteurs sont installés et un relevé 3D texturé de l'ensemble de la grotte est réalisé par le cabinet Guy Perazio entre 2012 et 2014. Celui-ci permet de reporter toutes les observations du suivi et limite par là-même les incursions au site. Il offre également la possibilité de réaliser différentes simulations en lien avec la conservation (modélisations des circulations d'air, élévation de température, impacts des visites, etc :

Chapitre 2 - Le corpus de sites

Lacanette *et al.*, 2007, 2009 ; Lacanette et Malaurent, 2010, 2015). De plus, cette base de données numériques aboutira à la création du fac-similé Lascaux IV mais sera également réinvesti pour des projets scientifiques. Le projet MicroPaGO (dir. D. Lacanette ; Lacanette *et al.*, 2018) qui a pour objectif de restituer le niveau et l'état des sols à l'époque de la découverte du site (septembre 1940) puis lors de sa fréquentation par les paléolithiques et le PCR LAsCO (2018-2021, dirs. M. Langlais et S. Ducasse ; Ducasse et Langlais, 2019) qui consiste en la révision du matériel archéologique découvert dans la grotte et à son remplacement spatial sur les sols paléolithiques restitués en trois dimensions.

C. La grotte de Leye



Figure 12 : Entrée de la grotte de Leye (cl. D. Lacanette).

Choisie par N. Aujoulat pour ses similitudes d'emplacement au sein des bancs calcaires et son orientation avec de nombreuses grottes ornées, la grotte de Leye (Figure 12) est une grotte dite « laboratoire » située en Dordogne, sur la commune de Marquay. Cette grotte est la propriété privée de M. Delbos, accessible par convention afin que des recherches puissent y être menées en dehors des habituelles contraintes conservatoires associées aux grottes ornées

(projet CEGO, dir. C. Ferrier, 2010-2014 ; projet PHYT, dir. R. Chapoulie, 2014-2018).

1. Description physique de la cavité

La grotte est située sur la commune de Marquay (Dordogne, Figure 13), dans la vallée de la Vézère, où elle s'inscrit dans un calcaire gréseux à la transition entre le Coniacien et le Santonien, ces deux formations étant celles qui contiennent 95% des grottes de la région. L'unique entrée de la grotte est orientée à l'ouest, 30 mètres au-dessus de la Beunette, affluent de la Beune qui va elle-même se jeter dans la Vézère (Lacanette *et al.*, 2013).

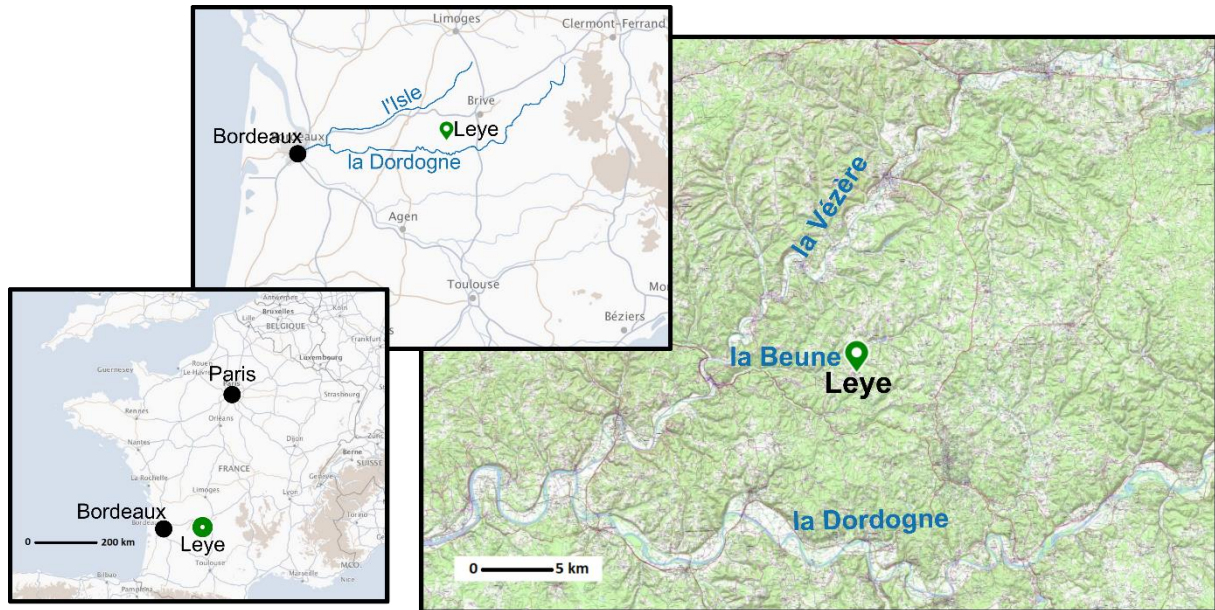


Figure 13 : Situation géographique de la grotte de Leye (doc. [Géoportail.gouv](http://Géoportail.gouv.fr), modifié).

La grotte est constituée de plusieurs galeries parallèles (Figure 14) de 50 mètres cumulés qui exploitent un même plan de failles N 90-110°, orientation fréquente des failles dans la région. La cavité se situe entre 4 et 12 mètres sous la surface, avec des hauteurs sous plafond de 0,5 à 6 m. Si le sol est descendant dans la première partie de la cavité, il se stabilise à l'horizontale dans la seconde partie et a même tendance à remonter aux extrémités (Figure 15) (Lacanette *et al.*, 2013).

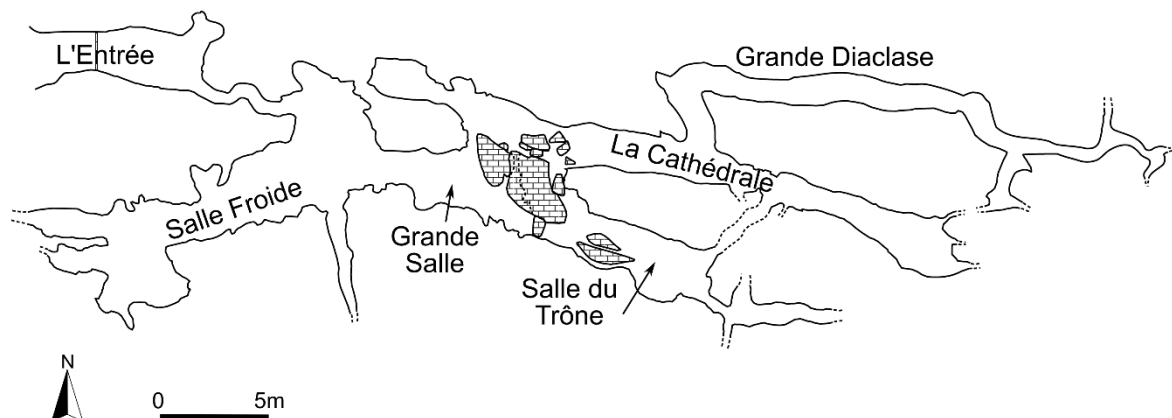


Figure 14 : Grotte de Leye (d'après le fond topographique C. Ferrier, D. Large, D. Lacanette).

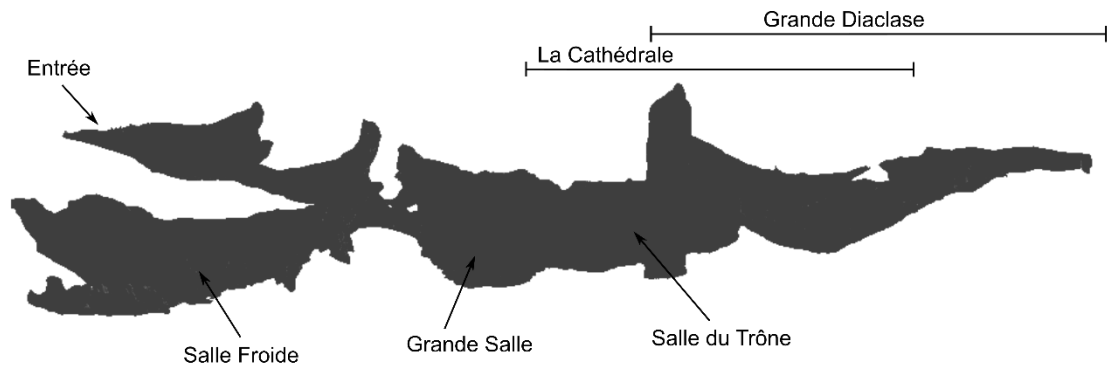


Figure 15 : Profil de la grotte de Leye d'après le modèle 3D Perazio Engineering.

La grotte est toujours active, de légers écoulements d'eau provoquant la dissolution et la précipitation de calcite sous diverses formes (revêtements, coulées, mondmilch, gours), souvent organisées en bandes parallèles au sol, comme à Lascaux (Lacanette *et al.*, 2013). La grotte est ouverte sur l'extérieur, ce qui permet la présence de petits mammifères (en particulier les chauves-souris), mais aussi de micro-organismes, de graines et de mousses (Lacanette *et al.*, 2013).

2. Une grotte laboratoire

Pendant longtemps l'évolution du monde karstique, et en particulier de ses parois, a été étudiée directement et uniquement dans des grottes ornées, l'objectif étant de comprendre les facteurs qui influent sur l'évolution des parois afin de permettre la mise en place des protocoles conservatoires les plus adaptés dans ces grottes. La prise de conscience de l'influence du climat interne et externe au milieu karstique, même si elle existait déjà auparavant (par exemple H. Breuil attribue l'absence de peintures dans la première partie de Font-de-Gaume (Dordogne) à sa proximité avec l'entrée, et donc aux variations de température et d'humidité ; Breuil, 1952), s'est particulièrement ancrée dans les esprits après que la grotte de Lascaux a été fermée au public.

Par la suite, un suivi climatique (températures, humidité et CO₂ principalement) sera mis en place dans de nombreuses grottes ornées. Ce suivi, s'il est indispensable pour prendre des mesures adaptées à chaque cavité, est contraint par l'éventuelle présence de visiteurs et pour

d'évidentes raisons conservatoires. Ainsi, les capteurs ne peuvent pas être installés à n'importe quel emplacement, et les prélèvements sont extrêmement contraints. C'est pourquoi il est apparu nécessaire de pouvoir disposer d'une cavité dépourvue d'intérêt patrimonial afin d'y réaliser des mesures, observations et prélèvements avec des contraintes réduites (Lacanette *et al.*, 2013).

La grotte de Leye a été sélectionnée pour devenir une « grotte laboratoire » pour plusieurs raisons (Lacanette *et al.*, 2013) :

- Elle est située en Dordogne, plus précisément dans la vallée de la Vézère, une région riche en grottes ornées ce qui permet de disposer du même contexte géologique et environnemental.
- Elle dispose d'altérations retrouvées en contexte orné (p. ex. parois calcaires recouvertes de calcites ou de mondmilch, présence de gours et autres coulées stalagmitiques).
- Le réseau karstique n'est pas ennoyé mais bénéficie tout de même d'arrivées d'eau ce qui permet aux spéléothèmes d'être actifs.
- La cavité est de dimension moyenne (50 m au total).
- Plusieurs galeries coexistent, certaines plus étroites que d'autres.
- Elle ne présente qu'une entrée, assez étroite pour être fermée et donc sécurisée.

3. Une grotte entièrement modélisée et partiellement texturée

Afin de pouvoir réaliser des simulations numériques sur le climat de la grotte, un modèle 3D de l'ensemble de la cavité et de la surface des alentours a été livré par Perazio Engineering. Un plan topographique a été réalisé à partir du modèle 3D afin de pouvoir noter des informations en deux dimensions. Un premier modèle reproduit l'ensemble de la grotte avec une précision de 10 cm, sans texture associée (Figure 16, a), tandis que la seconde reproduction ne concerne que la Salle du Trône (Figure 16, b). Réalisée par photogrammétrie, elle est à la fois plus précise (5 mm) et texturée, mais le maillage y est parfois percé (Figure 16, b).

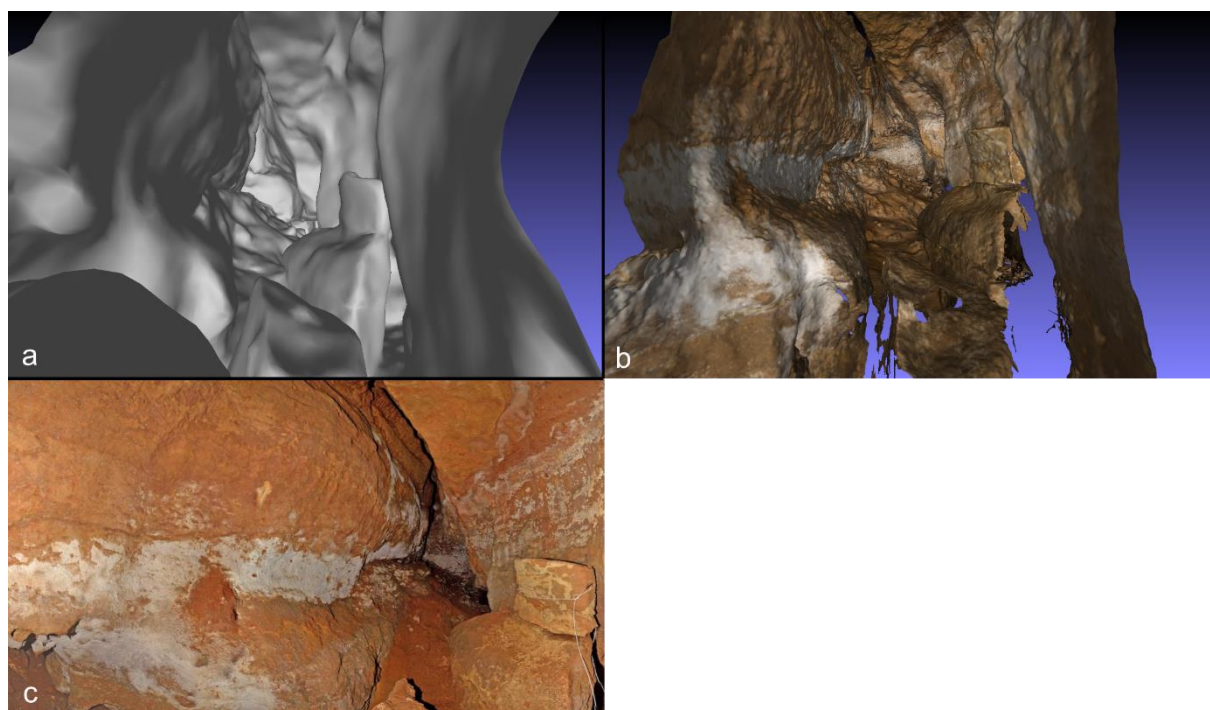


Figure 16 : Prise de vue depuis l'entrée de la Salle du Trône, a : Modélisation 3D à partir d'un relevé laser (Perazio Engineering), b : reproduction photogrammétrique (Archeovision Production), c : prise de vue photographique (Cl. S. Konik).

D. Le site expérimental de Lugasson

Le site expérimental de Lugasson (Gironde, Figure 17) est constitué de deux anciennes carrières, mises à disposition pour des recherches scientifiques par son propriétaire dans le cadre du projet CarMoThaP (Ferrier *et al.*, 2017c).



Figure 17 : Entrée de la petite carrière de Lugasson (cl. C. Verdet)

1. Description de la carrière

La commune de Lugasson est située dans l'Entre-Deux-Mers, en Gironde (Figure 18). Elle s'est développée sur un site d'extraction de calcaire utilisé pour les constructions en pierre de Bordeaux et ses alentours. Le site expérimental de Lugasson, que nous appellerons également « carrière de Lugasson », est situé près du lieu-dit de Fauroux.



Figure 18 : Situation géographique de la carrière de Lugasson (doc. Géoportail.gouv, modifié).

Le site est constitué de deux anciennes carrières souterraines creusées dans des calcaires du Rupélien. La première est composée d'une vingtaine de mètres de galeries dont seules deux galeries d'environ 9 mètres de longueur, disposées à angle droit sont accessibles (Figure 19). La seconde est composée de multiples galeries de quelques centaines de mètres cumulés, d'une hauteur comprise entre 1,50 et 3 m et larges de plusieurs mètres. Ces galeries sont en moyenne hautes de 2,50 m et large de 3 m et sont séparées de la suite du réseau par des éboulis et une plaque isolante installée lors de précédentes expérimentations.

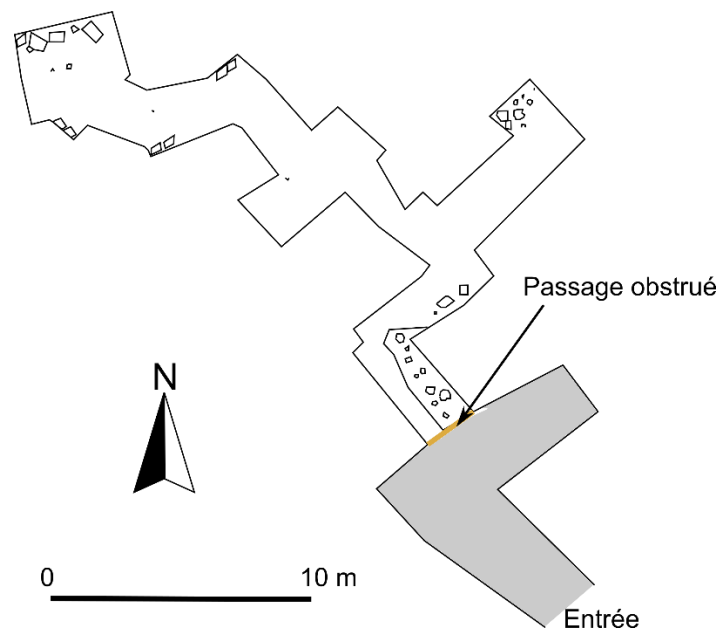


Figure 19 : Topographie de la première galerie de Lugasson avec en gris la partie accessible (topographie C. Verdet, Verdet, 2019).

2. Un site expérimental

Le site a été sélectionné afin d'y mener diverses expérimentations, en particulier dans le cadre des projets IThEM « des Impacts Thermiques sur les parois à la caractérisation des feux, Expérimentation et Modélisation », 2012-2013, puis CarMoThaP « Caractérisation et Modélisation des Thermo-altérations et des résidus de combustion sur les Parois », 2016-2018 (dir. C. Ferrier, Ferrier *et al.*, 2017c). Les expérimentations précédant les nôtres avaient pour principal objectif la réalisation de feux en conditions contrôlées et en milieu confiné afin de mieux comprendre les altérations que ceux-ci produisent sur les parois calcaires (Lacanette *et al.*, 2017, Salmon *et al.*, 2019, Verdet, 2019). Ces expérimentations ont exclusivement eu lieu

dans les deux galeries accessibles de la première carrière, y laissant des traces de combustion sur les parois (Figure 20).

Dans le cadre de notre étude, nous avons eu accès à la seconde carrière pour y réaliser des expérimentations de stationnement et de déplacement en milieu souterrain éclairé par des luminaires préhistoriques (torches et lampes à graisse), ainsi qu'à la première carrière, où des mesures de spectre des différents états de parois ont été réalisées.

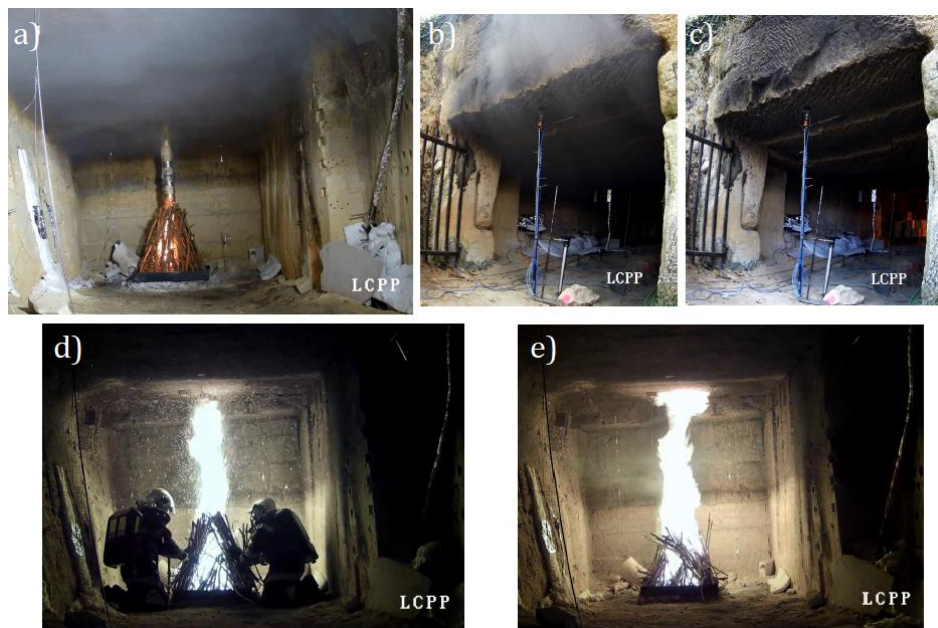


Figure 20 : Production de feux dans le cadre du projet CarMoThaP (Salmon, 2019).

3. Modèles 3D

La première carrière de Lugasson a été numérisée par photogrammétrie par Archéovision Production lors des expérimentations de feux menées par F. Salmon dans le cadre du projet CarMoThaP (dir. C. Ferrier, Salmon, 2019). Un modèle 3D non texturé recouvre les deux galeries tandis que plusieurs numérisations par photogrammétrie de la galerie 2 ont été réalisées au fur et à mesure des différentes expérimentations de foyers paléolithiques afin de conserver une trace de l'évolution des états de surface (Figure 21).

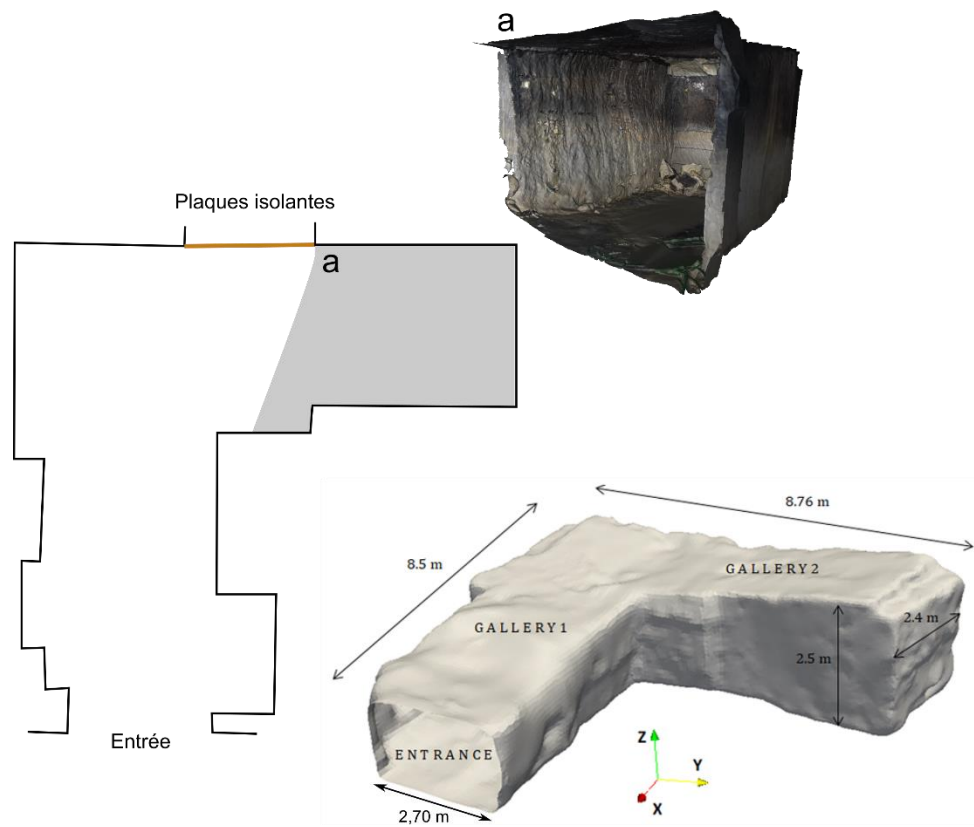


Figure 21 : Plan topographique (topographie C. Verdet, Verdet, 2019) et modèle 3D (P. Mora, Archéovision Production) des deux galeries de la première carrière et modèle texturé de la galerie 2 (a, P. Mora, Archéovision).

CHAPITRE 3 – MATÉRIEL ET MÉTHODE

Le chapitre qui suit sera l'occasion de revenir sur la méthode et les outils mis en place, ainsi que sur les documents préexistants auxquels nous avons eu accès.

A. Méthode de travail

1. Problématique

Notre travail s'inscrit dans la dynamique actuelle des travaux qui cherchent à mieux comprendre quelle était la place des grottes ornées dans les sociétés préhistoriques, et comment les Paléolithiques utilisaient ces espaces. Pour ce faire, nous avons choisi d'investiguer les modalités de perception, d'occupation/circulation et de mise en organisation du milieu souterrain par les populations du passé, et notamment comment ces trois concepts s'influencent-ils mutuellement. Cependant, les accès aux grottes ornées, qui permettent habituellement de mener des études archéologiques, sont de plus en plus restreints pour des raisons conservatoires, il n'est pas possible d'y circuler librement et de se positionner là où se trouvaient les groupes qui ont investi les cavités, de même ces espaces eux-mêmes ont pu se modifier avec le temps. C'est pourquoi nous proposons dans ce travail un développement méthodologique permettant de réaliser des simulations numériques qui pallient ces biais en recréant une réalité physique inaccessible aujourd'hui. Nous avons en particulier retenu deux champs d'action : l'acoustique et l'éclairage.

Notre sujet se compose alors de deux grandes problématiques. La première consiste en l'adaptation d'outils de simulations numériques d'éclairage et d'acoustique au contexte karstique. La seconde porte sur l'utilisation de ces outils afin d'alimenter de manière objective la réflexion sur la relation entre l'espace naturel, inhérent à la cavité, et l'espace culturel, apporté par l'Homme. L'objectif de ce travail est donc d'apporter des éléments de réponse à travers quelques études de cas. Chacune de nos deux problématiques peut être subdivisée en plusieurs sous-objectifs.

En ce qui concerne les outils de simulations, nous souhaitons dans un premier temps proposer un modèle de mise en place avec une approche rigoureuse et instrumentée, permettant d'obtenir des données numériques et reproductibles. Dans un second temps, il sera nécessaire de réaliser un bilan des possibilités et limites (techniques, conservatoires, humaines) de cette approche.

L'application de ces outils aux modèles 3D des grottes ornées de Cussac et de Lascaux devrait permettre d'apporter des données au sujet de l'éclairage utilisé par les préhistoriques, des qualités acoustiques des lieux, ou concernant l'intérêt de l'écholocalisation. Ils nous

permettront également d'amener des réflexions concernant les choix de localisation des ensembles graphiques ou des cheminements paléolithiques.

2. Méthode

a) *Sélection des sites*

La première étape de notre travail a été de sélectionner les cavités étudiées (pour une description détaillée des sites, voir Chapitre 1.2. *Le corpus de sites*). La part la plus importante de notre travail étant d'ordre méthodologique, nous souhaitons deux sites complémentaires sur de nombreux points, permettant de faire varier un maximum de facteurs. Seuls deux critères étaient indispensables : la possibilité d'accéder à un modèle 3D texturé, d'une précision minimale de 5 cm, couvrant au moins plusieurs dizaines de mètres linéaires, et la présence de nombreux graphismes pariétaux dans la cavité. Sur cette base, nous avons sélectionné les grottes ornées de Cussac (Le Buisson-de-Cadouin, Dordogne) et de Lascaux (Montignac, Dordogne), qui remplissent les critères décrits précédemment, pour leur complémentarité :

- Cussac est une cavité partiellement modélisée (environ 55 de ses 1 600 m de galerie ont été modélisés), qui est accessible à des fins de recherches quelques semaines par an. Sa récente invention (septembre 2000) a permis d'y préserver l'état des sols et de sa morphologie. La grotte est quasiment uniquement ornée par de la gravure, et est composée d'une unique galerie formant des méandres. Des recherches scientifiques y sont actuellement menées (PCR Cussac, dir. J. Jaubert), certaines questions, notamment sur l'aspect paléolithique de la cavité, sont donc en cours d'investigation.
- Lascaux est une grotte entièrement modélisée mais totalement inaccessible, même pour des recherches. Sa découverte plus ancienne (septembre 1940) a été suivie d'une intense exploitation touristique et de nombreux travaux d'aménagements qui ont modifié sa structure, en particulier concernant le secteur d'entrée et les sols. La cavité, constituée de salles, de galeries droites, de secteurs retirés et de puits est ornée par de la gravure, de la peinture, et des techniques mixtes. Si les recherches y ont été fortement ralenties ces dernières décennies, le développement du modèle 3D a permis la reprise de travaux sur la cavité (projet MicroPaGO, 2014-2021, dir. D. Lacanette et PCR LAsCO, 2018-2021, dirs. M. Langlais et S. Ducasse), et notamment un travail sur le modèle 3D a été

mené, permettant de proposer une reconstitution de l'état de la grotte à différents moments de son histoire.

Nous avons rapidement ajouté la grotte expérimentale de Leye (Marquay, Dordogne) à notre corpus. En effet, cette grotte, dépourvu d'intérêt archéologique, est libre d'accès à des fins de recherche et dispose d'un modèle 3D complet. Ce site a servi à réaliser des mesures *in situ* ainsi qu'à prélever des matériaux lorsque ce n'était pas possible dans les sites ornés. Il a également été possible d'y confronter les résultats des simulations à la réalité. Enfin, la carrière de Lugasson a servi de site expérimental pour les reproductions d'éclairages paléolithiques.

b) Outils de simulation numérique

Dans un second temps, nous avons mis en place des outils de simulation numérique de sons et d'éclairages. L'objectif était de proposer un modèle de mise en place d'outils de simulations adaptés au milieu souterrain à travers une approche solide et reproductible et l'apport de données numériques.

Pour cela, nous avons sélectionné des outils préexistants, à savoir les logiciels *Phanie et Icare*, développés au CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) par N. Noé et S. Carré dans le cadre de projets architecturaux et d'urbanismes (Carré *et al.*, 2000 ; Noé *et al.*, 2009, 2012). Le logiciel *Phanie* permet de réaliser des simulations physiques de l'éclairage dans des scènes virtuelles complexes et de visualiser des scénarios lumineux en fonction des paramètres de l'environnement et des luminaires (architecture générale, caractéristiques des sources lumineuses, climat, ou encore nature des matériaux en jeu). Le logiciel *Icare*, lui, permet de recréer un environnement acoustique (que l'on appelle auralisation) et de calculer des réponses impulsionnelles dans des modèles 3D complexes à partir de données physiques (architecture, sons produits, absorption acoustique des surfaces, taux d'humidité dans l'air, etc.). Ces outils à l'origine dédiés à des environnements urbains modernes ont dû être adaptés au milieu naturel souterrain. En effet, il s'agit d'un environnement aux propriétés et contraintes très différentes des milieux modernes habituellement investigués avec ces logiciels : l'environnement karstique est l'un des rares, si ce n'est le seul, milieu naturel plongé dans le noir absolu, les formes et couleurs qu'on y perçoit sont alors extrêmement dépendantes de l'éclairage utilisé, les matériaux naturels qui le composent (calcaires, argiles, spéléothèmes) voient leurs propriétés visuelles et acoustiques fluctuer d'un site à l'autre, voire au sein d'un même site, le

cheminement, lorsqu'il est possible, y est balisé, l'électricité est absente, et, enfin, les conditions atmosphériques y sont différentes de celles de la surface (le taux de CO₂ est plus élevé, l'air est saturé d'humidité et les températures y sont très stables, entre 9 et 13° C selon les sites dans la vallée de la Vézère). Les caractéristiques acoustiques et visuelles de ces milieux n'ayant jamais été enregistrées, une campagne de mesures sur site ou sur échantillon a donc dû être menée, sur les sites archéologiques mais aussi sur les sites expérimentaux afin de permettre une calibration de nos outils.

3. Terminologie

Avant de passer à la description de nos outils et documents, il nous paraît important de proposer un point de terminologie. En effet, certains termes sont sujets à controverse, à commencer par *l'art*. Il nous paraît alors important de donner ici les acceptions auxquelles nous nous attacherons dans le reste du manuscrit.

a) *L'Art*

Moyen d'expression, support de transmission, vitrine de la richesse, exposition du pouvoir, exaltation des sens, communication avec un autre monde... Sont autant d'intentions possibles derrière la manifestation artistique, dont il existe autant de définitions que de cultures, d'artistes et de penseurs. Ces derniers ont été nombreux à essayer de donner une définition de l'Art, mais sans connaître les intentions des Préhistoriques, il semble impossible d'attribuer avec certitude les manifestations graphiques pariétales à une définition plutôt qu'à une autre. Entre des définitions parfois trop larges, parfois trop réduites, il est difficile de savoir s'il est même possible d'utiliser un tel vocable pour définir les créations pariétales.

À titre personnel, il nous semble délicat de qualifier d'art l'ensemble des manifestations graphiques, en particulier lorsqu'un vocabulaire technique permet une meilleure description, cependant cela n'est pas toujours possible, et comme le dit M. Lorblanchet le « mot reste toujours à inventer » (Lorblanchet, 1999). Parce que nous avons intégré dans notre imaginaire collectif à quoi correspond « l'art préhistorique », ou « l'art pariétal », nous utiliserons ce terme dans ce cadre d'une définition large.

b) L'Œuvre

L'œuvre, si elle possède une définition très stricte issue de la tradition des « Beaux-arts », peut aussi se définir comme tel : « Travail, tâche, action effectués par un agent quelconque » ou « Objet, système, etc., résultant d'un travail, d'une action » (Larousse, s.d.). C'est sous cette forme que nous emploierons ce mot. Nous ne parlons pas ici du terme « œuvre d'art », qui a sa définition propre, intégré dans un cadre légal.

c) De l'entité graphique au dispositif pariétal

Si les termes suivants (Entité graphique, Zone graphique, Panneaux) ont des définitions plutôt bien déterminées (voir notamment Sauvet, 1993), des zones grises existent, et des nuances peuvent intervenir. De ce fait, chaque équipe scientifique a tendance à disposer de son propre bagage terminologique qui sera particulièrement adapté au site étudié. De par notre formation et notre approche du terrain qui a débuté à Cussac, nous réutiliserons dans ce travail la nomenclature utilisée par l'équipe du PCR Cussac (Feruglio *et al.*, 2019, 2020a, 2020b ; Feruglio et Bourdier, 2020), adaptée lorsque nécessaire au site de Lascaux (Tableau 1)

Entité graphique et Trace

La différence entre l'entité graphique et la trace se situe dans l'intentionnalité : l'entité graphique est intentionnelle tandis que la trace est fortuite. La distinction sur le terrain entre les deux n'est pas toujours évidente, et à Cussac trois catégories ont été créées : la majorité des **entités graphiques** sont gravées, tandis que les mouchages de torches ou frottements d'ocre sont regroupés parmi les **traces**. Les marques colorées sous forme de signes ponctués ou linéaires (Vialou, 1986) qui semblent intentionnelles de par leur disposition topographique ont été indexées comme **marque graphique** afin de les différencier des entités graphiques gravées.

À Lascaux aussi l'entité graphique se distingue de la trace par son intentionnalité. Elle correspond alors à un motif qui prend la forme d'un signe simple (ponctuation, ligne) ou complexe.

Panneau

Traditionnellement, le **Panneau** est « une surface délimitée occupée par des figures » (Leroi-Gourhan, 1988), cette surface étant soit délimitée par « des particularités morphologiques majeures du support (failles, fissures, coulées de calcite, angles dièdres, changements de nature ou de coloration de la roche, etc. », soit la surface décorée est séparée des autres par des espaces graphiquement non investis dont la dimension est « au moins égale à la dimension moyenne des figures avoisinantes » (Sauvet, 1993). À Cussac, deux types de panneaux coexistent : des panneaux constitués d'une seule entité graphique, et ceux en regroupant plusieurs. Ces derniers rentrent dans la classification traditionnelle du Panneau, mais les premiers, qui semblent former un ensemble homogène distinct des autres (Jouteau, 2016, Jouteau *et al.*, 2019), ont été regroupés sous le terme d'**entité graphique isolée**. Le terme de **zone graphique**, plus neutre que le terme **panneau**, permet de regrouper, lorsque cela est nécessaire, les entités graphiques isolées et les panneaux (Feruglio *et al.*, 2020b).

À Lascaux, la question est différente : s'il y existe des entités graphiques isolées (p. ex. la série de points noirs au fond du Cabinet des Félines) et des panneaux bien définis (p. ex. le Panneau des Bisons Adossés), il existe aussi des zones où quasiment toutes les surfaces d'un secteur sont graphiquement investies, la notion de panneau, qui intègre le concept de zone délimitée, s'applique difficilement dans ce cas. Nous parlerons alors de **zone ornée** (p. ex. la Salle des Taureaux).

	Cussac	Lascaux
Entité Graphique (EG)	Motif intentionnel, gravé ou peint, souvent sous la forme d'un motif complexe	Motif isolé, intentionnel, sous la forme d'un signe simple (ponctuation, ligne) ou complexe.
Marque Graphique (UG)	Motif intentionnel, coloré, souvent sous la forme d'un motif simple (ex. ponctuations)	
Trace	Trace fortuite (ex : coulée de peinture, frottement d'un vêtement)	
Panneau	Ensemble d'entités graphiques qui occupent un espace délimité physiquement ou par lui-même	
EG/MG isolée	EG ou MG isolée d'autres motifs par un espace graphiquement non investi	
Zone graphique	Paroi sur laquelle se trouve au moins une EG ou une MG ou en concentrant plusieurs sur un espace plus vaste	
Zone ornée		Espace topographique largement investi. Si des panneaux peuvent y être identifiés, ils ne sont pas nettement distingués les uns des autres.

Tableau 1 : Définition des termes permettant de décrire les manifestations graphiques à Cussac et à Lascaux.

d) Dispositif pariétal ou dispositif iconographique

À l'échelle du site, ou d'une partie d'un site, nous pouvons parler de dispositif iconographique ou pariétal, ce dernier terme renvoyant à un dispositif graphique uniquement présent sur les parois, plafonds et/ou sols du site. Ces termes renvoient à l'organisation générale des entités graphiques, panneaux et zones ornées, toutes manifestations graphiques au sein du site.

B. Documents de travail

1. Modèles 3D

L'objectif de notre étude étant d'apporter une méthode et des outils de simulations, la disponibilité des modèles 3D fut évidemment un critère incontournable dans le choix des sites étudiés. Dans cette section, nous proposons de décrire les modèles 3D auxquels nous avons eu accès.

a) *Cussac*

La situation de la numérisation de la grotte de Cussac est le cas le plus complexe de tout notre corpus, et cela pour plusieurs raisons. Tout d'abord, le développement de la cavité est très long (1,6 km) et certains accès sont restreints, que ce soit par des contraintes d'ordre naturel (passages étroits, plafonds très bas) ou conservatoire (certains secteurs étant interdits d'accès). Naturellement, seuls les secteurs les plus étudiés et accessibles ont bénéficié d'une – ou de plusieurs – commandes de numérisation. D'autre part, la découverte récente de la grotte et son étude en cours font que les numérisations se font progressivement, au fur-et-à-mesure que les secteurs étudiés par les différentes équipes se diversifient, amenant de nouvelles commandes. Ainsi, au cours du temps, essentiellement pour des raisons administratives, plusieurs sociétés et laboratoires se sont succédé pour générer des modèles 3D de portions de la grotte.

Le premier relevé 3D-laser a été réalisé en 2012 par Perazio Engineering. Il couvre une longueur d'une cinquantaine de mètres et intègre les Panneaux de la Découverte et du Pont d'Argile, l'entité graphique isolée du Toupillon, ainsi que les locus 1 et 2 (Figure 22) avec une précision d'environ 5 cm pour le « corps » de la grotte et de l'ordre du millimètre pour les panneaux ornés. Ce modèle est constitué de 2 272 416 de faces.

Le second relevé 3D-laser a été effectué par Patrimonio e Industria en 2015. Ce modèle couvre deux secteurs : le premier de l'entrée de la grotte jusqu'au modèle Perazio, et le second du modèle Perazio jusqu'au Panneau de l'Animal Acéphale (Figure 22). Malheureusement, ce modèle n'est pas exploitable pour notre projet car un traitement des données brutes, nécessaire

Partie I - Fondements de l'étude

au report dans le même référentiel et à la fermeture du modèle, n'a pas encore été pu être effectué.

En parallèle de ces modèles, Archéovision Production a réalisé de nombreuses numérisations par photogrammétrie de secteurs beaucoup plus réduits dans l'espace, souvent limités à l'extension de panneaux, d'empreintes, ou encore de restes humains (Figure 22), mais avec une précision millimétrique, voire inframillimétrique.

Notre étude nécessitant la reproduction de la morphologie de la grotte sur au moins quelques mètres de long, seul le premier relevé, par Perazio Engineering, a été utilisé.

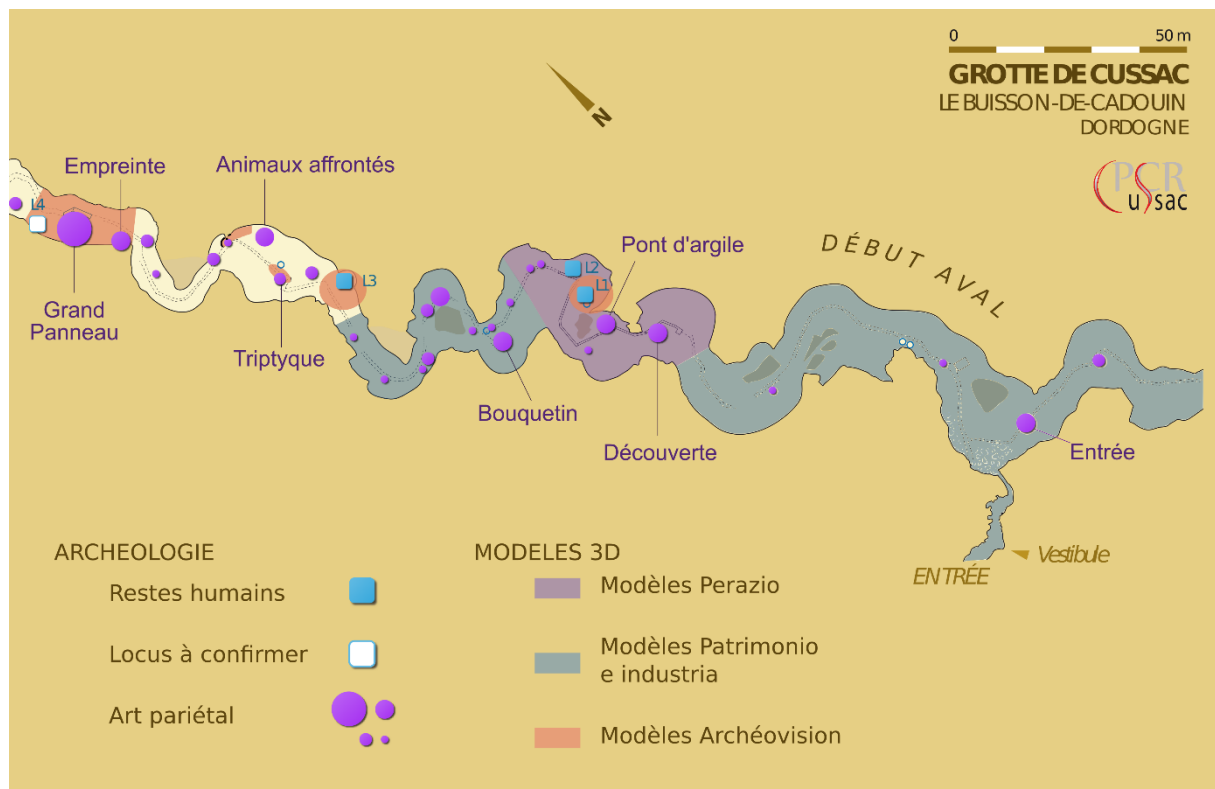


Figure 22 : Répartition des numérisations de secteurs réalisées jusqu'à présent de la Branche Aval de la grotte de Cussac (d'après un plan topographique H. Camus et coll., Protée, 2010-2011).

b) Lascaux

Le site de Lascaux a été entièrement numérisé, une première fois en 2005 puis une seconde fois en 2012-2013 par la société Perazio. Ce dernier modèle, plus précis que le précédent, a servi à la construction du fac-similé Lascaux IV. Il a également permis de conserver une trace de l'état de la cavité à cette date, tandis que les recherches se sont appropriées cet outil, tout d'abord afin d'y mener des simulations aérologiques (Lacanette *et al.*, 2007, 2009 ; Lacanette et Malaurent, 2015), puis par la suite à travers un programme de reproduction de l'état des sols de la cavité au moment de son invention (septembre 1940) et lors du passage des paléolithiques (programme MicroPaGO, *dir.* D. Lacanette, financement IdEx, et Ministère de la Culture). Puis, depuis 2018, à travers le projet DEX_TER/LAsCO (*dirs.* M. Langlais et S. Ducasse) dont l'un des objectifs est de reconnecter les vestiges archéologiques découverts dans la grotte aux sols paléolithiques virtuels.

L'ensemble de la cavité a été numérisé, ainsi que le Puits Vové et le massif dans lequel la grotte prend place (Figure 23). À cette géométrie, l'information colorimétrique a été ajoutée à l'intérieur de la grotte à l'aide de clichés étalonnés. Ce premier modèle, d'une précision moyenne de la géométrie de 3 mm, a par la suite été allégé en une version qui couvre de l'entrée de la grotte jusqu'au fond des diverticules avec une précision de 1 à 5 cm. Il s'agit de la version de la grotte actuelle que nous avons utilisée.

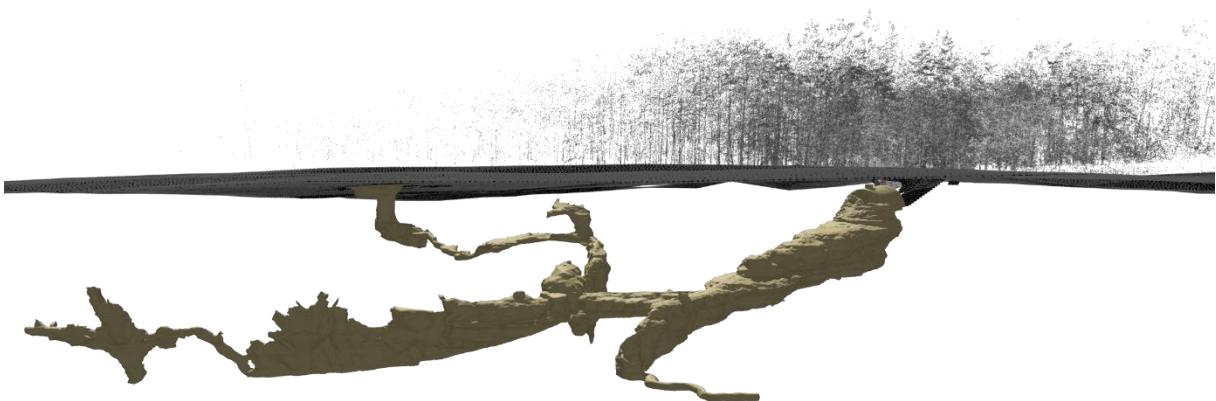


Figure 23 : Vue latérale du modèle 3D de Lascaux inscrit dans le massif, (Perazio Engineering).

À cette version de la morphologie moderne, nous avons pu ajouter à notre corpus des secteurs du modèle 3D retravaillés par le programme MicroPaGO (Dir. D. Lacanette). Ce programme a permis de virtuellement reproduire une morphologie de la grotte compatible avec l'état de la cavité au moment de son invention, soit en septembre 1940, tandis que la reproduction d'une version paléolithique de la cavité est en cours d'étude. À ce titre nous avons eu accès aux modèles 3D des versions de 1940 de l'ensemble des secteurs, avec une dimension des faces de 1 à 5 cm : Entrée et Salle des Taureaux (2 550 227 de faces), Diverticule Axial et Conduit final (809 191 faces), Passage (370 354 faces), Abside, Nef et Galerie du Mondmilch (1 857 174 de faces) et Puits, Grande Diaclase et Salle Ensablée (618 048 faces), ces modèles pouvant être fusionnés en un seul. Nous avons également pu utiliser le modèle 3D de l'Entrée et de la Salle des Taureaux reconstitué selon une proposition de la morphologie de la cavité au moment de son occupation paléolithique. Ce maillage de 1 842 004 de faces dispose d'une précision moyenne de 1 à 5 cm.

c) Leye

La grotte de Leye a été entièrement numérisée, ainsi que la surface équivalente à la grotte au-dessus de la cavité à des fins de recherche, en particulier pour observer l'évolution naturelle des parois et pour réaliser des simulations aérologiques. Deux modèles ont été respectivement réalisés par Perazio Engineering et Archéovision Production. Le premier modèle, constitué de 727 774 faces, reproduit l'ensemble de la grotte avec une précision d'environ 10 cm et n'est pas texturé tandis que le second est une reproduction par photogrammétrie de la Salle du Trône, avec un maillage constitué de 7 884 125 de faces de 5 mm.

2. Configuration informatique

La performance et la durée des simulations sont conditionnées par les composants de l'ordinateur utilisé. Les calculs des logiciels *Icare* et *Phanie* utilisent uniquement le processeur. Ce dernier, un *Intel Core i7-7700K*, a été utilisé à sa cadence de fonctionnement standard, avec le refroidissement à air standard.

Cette configuration nous a permis d'être autonome pour l'ensemble des simulations, la durée des calculs ne dépassant que rarement 12 h.

3. Accès aux sites

a) *Cussac*

L'accès à la grotte de Cussac n'est possible que quelques jours par an, lors de la campagne de terrain annuelle du PCR Cussac qui se déroule entre le début du mois de janvier et la première semaine de février. Des incursions plus ponctuelles et justifiées ont été possibles en dehors de cette période, entre l'hiver et le début du printemps, période où le taux de CO₂ est suffisamment bas dans la cavité (inférieur à 2%). Seuls les secteurs balisés étaient accessibles, soit, en aval, de l'Entrée au Grand Panneau (la section du Grand Panneau à l'extrémité aval ayant été balisée postérieurement à nos visites), et en amont, de l'Entrée au Panneau de l'Oie. Selon le matériel nécessaire à nos mesures, l'ensemble de ces secteurs n'ont pas pu toujours être accessibles, cela est spécifié dans les chapitres dédiés.

b) *Lascaux*

La grotte ornée de Lascaux est fermée, y compris aux recherches, mais il nous a été possible d'accéder à la colline, ce qui nous a permis, lorsque nécessaire, de prélever des échantillons des mêmes bancs calcaires. Nous avons également eu accès au fac-similé Lascaux IV⁵. Aucune mesure n'a pu y être menée d'une part car la morphologie du fac-similé diffère de celle de la grotte originelle, et d'autre part car les matériaux utilisés dans la reproduction ne sont pas des matériaux naturels (ni calcaires, ni spéléothèmes, ni argile ou sables). Cependant, ces visites nous ont permis de mieux appréhender l'espace de la cavité. En effet, si notre ressenti personnel de l'espace ne doit pas être la réponse aux problématiques archéologiques, elle peut être à l'origine des questionnements, et dans ce cadre, il nous paraissait important d'avoir eu accès à ce qui se rapproche le plus de la grotte d'origine.

⁵ Nous souhaitons ici remercier A. Barbé pour nous avoir ouvert les portes du fac-similé, le Centre International de l'Art Pariétal – Lascaux IV en-dehors des horaires des visites, et D. Tauxe pour nous avoir accompagnés sur le site.

c) La grotte de Leye et la carrière de Lugasson

Comme expliqué dans le chapitre dédié (sous-chapitres 1.2.C. *La grotte de Leye* et 1.2.D. *Le site expérimental de Lugasson*), la grotte de Leye et la carrière de Lugasson sont des sites dépourvus de vestiges archéologiques et sont donc aisément accessibles à des fins de recherche. Nous avons ainsi eu régulièrement accès à ces sites, et avons pu y réaliser des prélèvements ainsi que des mesures acoustiques (dans le cas de la grotte de Leye), ou des expérimentations et mesures sur éclairages (dans la carrière de Lugasson⁶).

⁶ Nous remercions C. Ferrier et J. C. Leblanc pour avoir contacté le propriétaire de la carrière afin que nous puissions en disposer librement.

~ Partie 2 ~

Mise en place des outils de simulation

CHAPITRE 1 – *PHANIE*, LOGICIEL DE SIMULATION D'ÉCLAIRAGE

L'éclairage, en modifiant les couleurs, les ombres, et les détails perçus, biaise notre perception des parois et des éventuelles œuvres qui les ornent. Il serait envisageable de reproduire un éclairage électrique disposant des mêmes propriétés spectrales et d'intensité que celles des éclairages paléolithiques afin de pénétrer dans une grotte ornée (cela a par ailleurs été testé, Groenen, 2016, Van Gelder et Nowell, 2018), mais les modifications que les cavités ont pu subir depuis le Paléolithique (effondrement des porches d'entrée, modification de la hauteur des sols, dépôt ou érosion de spéléothèmes, etc.) ainsi que les restrictions d'accès aux sites pour des raisons conservatoires limitent fortement l'utilisation de cette méthode.

Notre objectif est donc de simuler des éclairages du même type que ceux utilisés au Paléolithique (lampes à graisse et torches) dans des modèles 3D de grottes ornées afin de proposer une alternative à la méthode précédente, et d'évaluer ses avantages et limites. Il est important lors de ces simulations de pouvoir intégrer les caractéristiques de la lumière émise et les propriétés spectrales des parois et sols dans les calculs, et de tenir compte de l'influence du mode de réception (écran ou papier).

Les grottes sont des espaces complexes que la plupart des logiciels commerciaux prévus pour l'architecture ou les jeux vidéo ne peuvent gérer, et ceux qui le peuvent le font au prix d'une simplification des calculs physiques en jeu (matériaux réduits à une couleur au format RVB, sources prédéfinies, etc.). Le rendu de ces logiciels est alors très beau, mais le résultat n'est pas « réaliste ». C'est pourquoi nous avons choisi de travailler en partenariat avec le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)⁷ basé à Marne-la-Vallée (Seine-et-Marne) qui développe un logiciel de simulation d'éclairage en bâtiment ou en extérieur, « *Phanie* ». Ce partenariat nous a permis de nous former au logiciel, de l'utiliser et de l'adapter à nos besoins⁸.

Dans ce chapitre qui porte sur le logiciel *Phanie*, nous proposons dans un premier temps de revenir sur les phénomènes impliqués lors de l'éclairage d'un lieu, puis nous aborderons le fonctionnement du logiciel, les données nécessaires à son utilisation, puis les mesures que nous avons réalisées et intégrées à *Phanie* avant de décrire l'étape de calibration du logiciel.

⁷ En particulier nous souhaitons remercier Alexandre Jolibois qui a été notre interlocuteur général au sein du CSTB.

⁸ Nous souhaitons ici remercier Samuel Carré, du CSTB, qui nous a formés au logiciel et qui nous a aidés lors de toutes les étapes nécessaires à l'adaptation du logiciel à notre étude.

A. Phénomènes impliqués⁹

1. La lumière

La lumière est une onde électromagnétique émise par une source dite primaire, et peut être définie par trois facteurs :

- Sa direction de propagation (indiquée par des vecteurs dans un repère x, y, z)
- Sa répartition spectrale (décrite par la variation de son amplitude en fonction de la longueur d'onde)
- Sa puissance, définie selon plusieurs unités

a) La direction de propagation

Dans la nature, les sources primaires (le Soleil, les feux) sont omnidirectionnelles, c'est-à-dire que les ondes lumineuses sont envoyées dans toutes les directions autour de la source. C'est également le cas des sources d'éclairage préhistoriques, bien que le dispositif mis en place pour maîtriser le feu va plus ou moins orienter la production de lumière (Figure 24), mais ce n'est pas du tout le cas des lampes portables ou frontales modernes utilisées dans le cadre du déplacement en milieu souterrain, qui sont directionnelles (Figure 24).

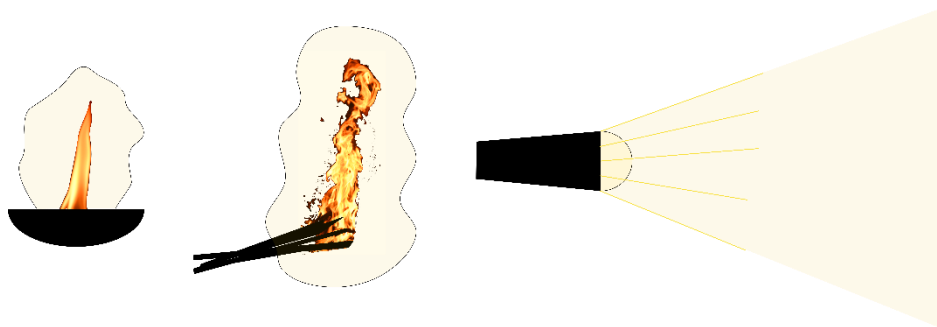


Figure 24 : Directivité du flux lumineux pour une lampe à graisse (à gauche), une torche en bois (au centre) et une torche électrique moderne (à droite).

⁹ L'ensemble des informations résumées ici sont issues de trois ouvrages : *Science de la couleur : aspects physiques et perceptifs* (Sève, 2009), *La couleur : lumière, vision et matériaux* (Elias et Lafait dir., 2006) et *Quand la matière diffuse la lumière* (Simonot, Boulenguez et Viénot, dir., 2019).

b) La répartition spectrale

Le spectre d'une lumière est défini par une plage de fréquences, le plus souvent exprimées en longueurs d'ondes (le domaine des longueurs d'ondes visibles par l'Homme est compris entre 390 et 750 nm, Figure 25).

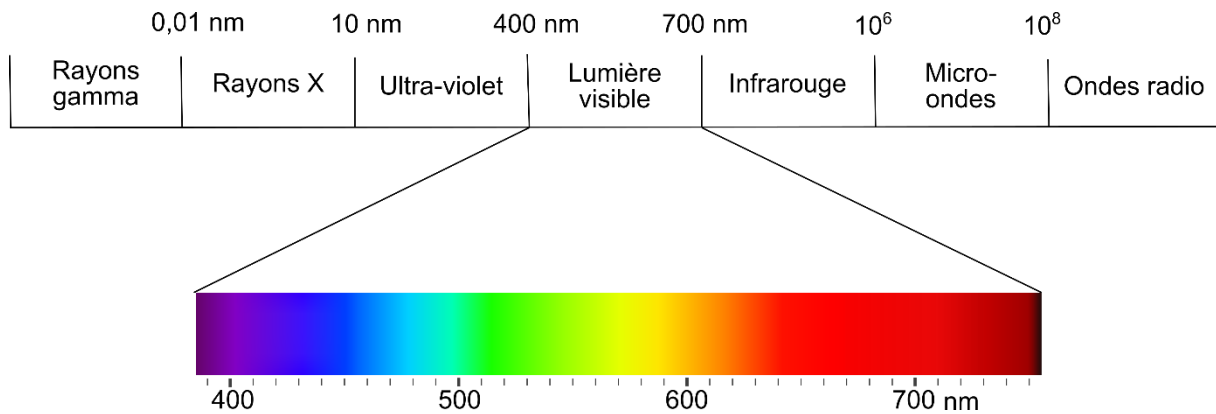


Figure 25 : Longueurs d'ondes et spectre de la lumière visible en nanomètres (modifié d'après Elias et Lafait dir., 2006).

Les sources incandescentes, ou thermiques (feux naturels, ampoules incandescentes), montrent une gamme étendue et régulière des longueurs d'onde sur tout le spectre visible, on parle alors de source polychromatique. Au contraire, de nombreuses sources artificielles lumineuses sont constituées d'une suite discrète de longueurs d'ondes (ampoules led par exemple, Figure 26).

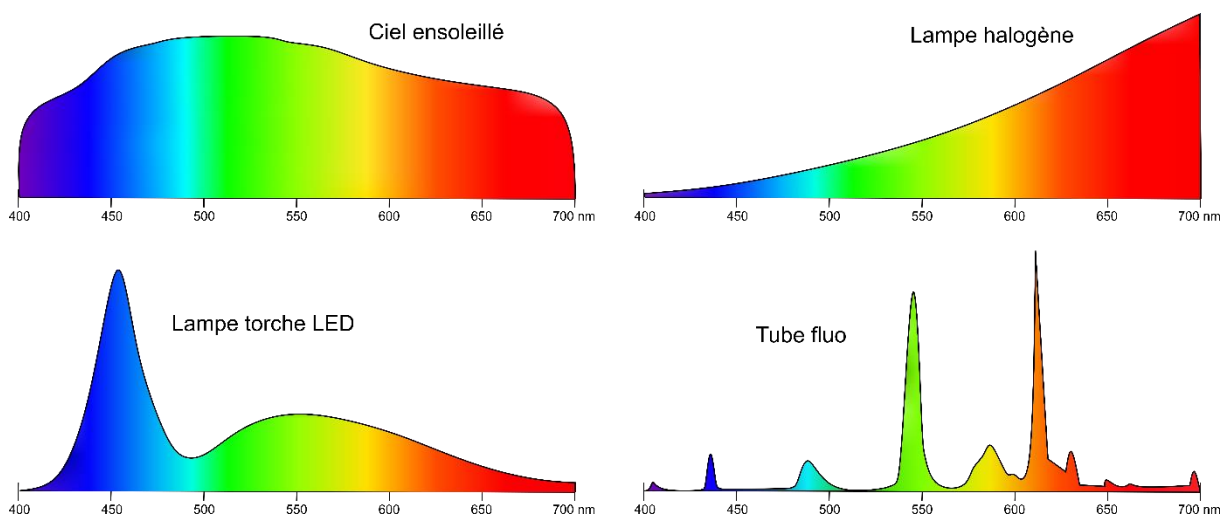


Figure 26 : Spectres émis par quelques sources naturelles ou artificielles modernes. Modifié d'après Zanier et Delahaye, 2019.

Lorsque la lumière rencontre un objet, la surface de ce dernier va absorber une partie des radiations et refléter le reste, modifiant ainsi les propriétés (intensité, spectre et direction) de la lumière retransmise en fonction de ses propres caractéristiques (couleur, rugosité, coefficient de réflexion, etc.). L'objet est alors considéré comme une source secondaire. La couleur d'un objet est habituellement définie en fonction du spectre qu'il réémet depuis son contact avec une lumière blanche, ou naturelle (Figure 27), mais éclairé par une lumière colorée, sa couleur peut être amenée à varier (Figure 27).

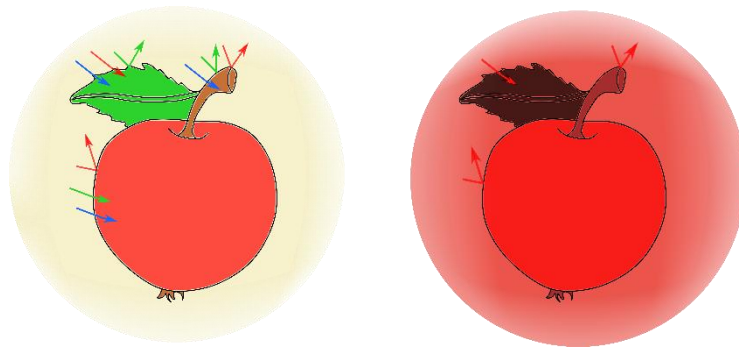


Figure 27 : Couleur perçue d'un objet selon un éclairage blanc à gauche, et rouge à droite.

c) Unités de puissance

La puissance d'un éclairage peut être définie par plusieurs unités¹⁰ (Figure 28) :

- I L'**intensité** caractérise l'intensité du flux émis par angle solide de 1 stéradian (l'angle solide correspond à un angle en trois dimensions, le stéradian étant son unité de base). Elle s'exprime en **candela** (cd) et permet de quantifier la lumière émise par une source, quelle que soit la distance à la source. L'intensité d'une bougie est d'environ 1 cd.
- Φ Le **flux lumineux** définit la puissance de l'énergie d'une source telle qu'elle est perçue par l'œil humain. Il s'exprime en **lumen** (lm), selon la formule : $lm = cd / \text{stéradian}$.
- E L'**éclairement** est le flux lumineux reçu par unité de surface. Il s'exprime en **lux** (lx) selon la formule $lx = lm/m^2$. À un mètre de distance d'une bougie, on reçoit 1 lux.
- L La **luminance** caractérise le flux lumineux émis par unité d'angle solide divisé par la

¹⁰ Ici nous présentons les unités issues de la photométrie, et prenant donc en compte la sensibilité spectrale de l'œil humain. Des grandeurs uniquement physiques existent également, exprimées à partir du Watt.

surface apparente de la source. L'unité de la luminance est le **cd/m²** et se calcule selon la formule : $L = \rho * E / \pi * 3.14$

Avec ρ : facteur de réflexion

E : éclairement reçu en lx

Il s'agit de la seule grandeur perceptible par l'Homme car elle permet de quantifier la quantité de lumière qui arrive dans l'œil, divisée par la surface apparente de la source.

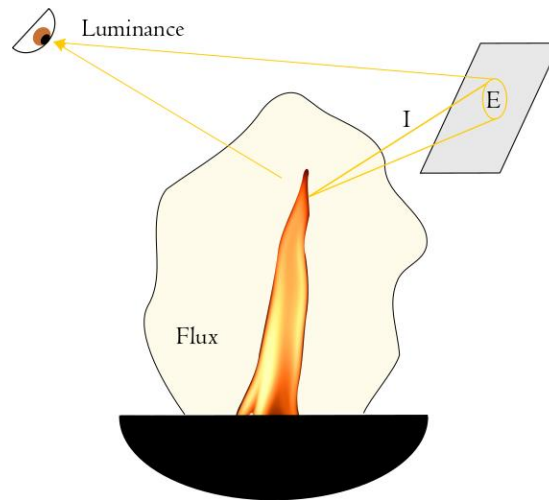


Figure 28 : Schéma représentant l'intensité, le flux, l'éclairement et la luminance produite par une lampe à graisse.

2. Le récepteur : l'œil humain

Puisque nous appartenons à la même espèce, *Homo sapiens*, nous pouvons supposer que le fonctionnement biologique de l'œil et de la vision n'a pas évolué de façon importante depuis le Paléolithique récent, ce que tendent à démontrer plusieurs études (Land et Fernald, 1992 ; Fernald, 2000).

La lumière pénètre dans l'œil par la pupille puis va passer par plusieurs lentilles (la cornée et le cristallin) jusqu'à être projetée au fond de l'œil sur la rétine (Figure 29). Les informations concernant l'intensité, le spectre, et la direction des différents rayons lumineux sont ensuite transmises au cerveau via le nerf optique pour être interprétés comme une image.

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

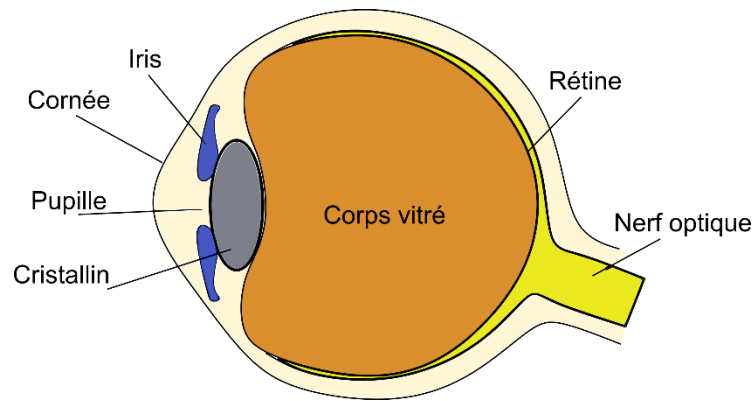


Figure 29 : Schéma simplifié de l'œil humain, d'après Elias et Lafait dir., 2006.

La rétine est tapissée de deux types de cellules photo-réceptrices : les cônes, situés au centre, uniquement actifs au-delà d'un certain seuil de luminosité mais sensibles aux couleurs (plus précisément, il existe trois types de cônes dont la sensibilité spectrale est centrée autour des couleurs vert, bleu ou rouge), et les bâtonnets, actifs même dans l'obscurité et tapissant les contours de la rétine, mais uniquement sensibles aux contrastes d'intensité (ils permettent donc de voir en nuances de gris). Ainsi, trois niveaux de vision peuvent être définis : la vision photopique, à partir de 10 cd/m^2 , qui permet une vision fine des couleurs, la vision mésopique, entre $0,001$ et 10 cd/m^2 , qui permet de percevoir les couleurs, mais de manière déformée (par exemple le rouge devient bordeaux sombre), et la vision scotopique, lorsque l'éclairage est inférieur à $0,001 \text{ cd/m}^2$, ne permettant pas de distinguer les couleurs, mais étant beaucoup plus sensible aux contrastes d'intensité et aux mouvements, en particulier latéraux. Selon lequel de ces trois modes de vision est actif, l'œil humain n'a pas la même sensibilité aux longueurs d'ondes : lorsqu'il utilise la vision photopique, l'humain est plus sensible aux couleurs vert-jaune (longueurs d'onde autour de 555 nm), c'est-à-dire que pour une même puissance rayonnée, une source émettant du jaune sera considérée comme plus puissante qu'une source émettant du bleu. On distingue alors la puissance physique (radiométrie) de la puissance perçue (photométrie). Plus l'environnement s'assombri, plus la sensibilité spectrale est décalée vers le bleu (effet Purkinje), jusqu'à ce que l'ensemble des cônes soient inactifs et qu'il soit impossible de distinguer des couleurs.

Bien sûr, la sensibilité aux contrastes, aux formes et aux couleurs varie d'une personne à l'autre, selon les influences culturelles et au cours de la vie d'un individu.

B. Le logiciel *Phanie*

1. Besoins initiaux

Afin de simuler l'éclairage produit par une source disponible au Paléolithique (lampe à graisse ou torche) dans le modèle 3D d'une grotte, nous avons dans un premier temps déterminé nos besoins et cherché un logiciel qui pouvait :

- Prendre en compte un modèle 3D à la morphologie complexe.
- Simuler les caractéristiques physiques de l'éclairage au plus près du réel, c'est-à-dire en prenant en compte le spectre, la puissance et la direction de la source primaire ainsi que l'influence des sources secondaires jusqu'à la réception du signal.
- Pouvoir modifier les caractéristiques des sources de lumière afin de les faire correspondre aux sources paléolithiques choisies.
- Intégrer les caractéristiques photométriques des différents matériaux présents.
- Indiquer un coefficient de réflexion différent entre le fond des gravures et la paroi et restituer les ombres des gravures.
- Prendre en compte l'adaptation de l'œil à l'obscurité en proposant un rendu cohérent avec les différents modes de vision possibles.
- Simuler une ou plusieurs sources fixes ou mobiles.
- Simuler des sources stables ou vacillantes.
- Simuler un récepteur fixe ou mobile (sous forme de vidéo ou d'espace 3D au sein duquel il est possible de se déplacer).
- Permettre une restitution photoréaliste.

Aucun logiciel en libre accès ou accessible pour notre budget ne permet de combiner la plupart de ces critères, c'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser le logiciel *Phanie*, développé par le département Acoustique et Éclairage du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). De tous ces critères, nous avons rapidement décidé d'en mettre trois de côté : « Permettre un coefficient de réflexion différent entre le fond de la gravure et la paroi et restituer les ombres des gravures » à cause de l'ampleur des calculs que cela impliquerait, « Simuler des sources vacillantes » et « Simuler des sources mobiles », seuls points qu'il n'est techniquement pas possible de réaliser avec *Phanie* à l'heure actuelle.

Le logiciel *Phanie* est un outil de photo-simulation de l'éclairage basé sur des données spectrales. À l'aide du modèle 3D de l'environnement étudié, des spectres des matériaux présents dans ce modèle et des spectres et éclairagements des dispositifs d'éclairage, le logiciel traite les phénomènes lumineux à partir de méthodes de calcul qui reposent sur une approche physique (illumination globale). Il permet ainsi de visualiser et de caractériser (en termes de luminances et d'éclairagements) des ambiances lumineuses d'intérieurs et d'extérieurs. Le logiciel est développé par le CSTB dans l'objectif d'évaluer le confort visuel selon le niveau d'éclairage ou l'indice de rendu des couleurs par exemple.

2. Données d'entrée

Chaque calcul de *Phanie* fait appel aux données physiques qui entrent en jeu lors de l'éclairage. En particulier, trois types de données d'entrées sont nécessaires : une (ou plusieurs) source d'éclairage, un récepteur (ici un écran d'ordinateur) et un modèle 3D texturé auquel sont associés les spectres des matériaux présents dans la cavité. Si le logiciel contient déjà des données de sources et de textures, il s'agit surtout de sources modernes (du type led) et de textures artificielles comme du béton. Il a donc été nécessaire de sélectionner les sources et les matériaux que nous souhaitons intégrer aux modèles avant de procéder à la mesure de leurs spectres et éclairagements.

a) Les sources d'éclairage

La plupart des sources préenregistrées dans *Phanie* sont modernes et elles ne nous concernent pas ici, sauf l'une d'entre elles qui permet de reproduire un éclairage naturel en fonction de la couverture nuageuse et de l'orientation de la scène par rapport au Soleil. Ce type de source pourra donc être utilisé pour simuler la distance à laquelle l'éclairage naturel peut pénétrer dans une grotte, selon l'ouverture de celle-ci.

Phanie permet également d'intégrer de nouvelles sources lumineuses à partir de leurs données spectrales (au format .txt) et de leur éclairage dans les trois dimensions (au format .ies). Trois types d'éclairages artificiels paléolithiques sont attestés de part des vestiges archéologiques : les lampes (fixes ou mobiles), les torches, et les foyers. À Lascaux, de très nombreuses lampes

mobiles ont été retrouvées (entre 34 et plus de 130 selon les estimations ; Delluc et Delluc, 1979a), ainsi que de nombreux fragments de charbons dans le sol, probablement issus de torches ou de foyers. À Cussac, seules deux lampes ont été découvertes jusqu'à présent, mais les galeries sont marquées de mouchages, attestant du passage d'individus munis de torches. Peu d'expérimentations ont été réalisées pour mieux comprendre leur fonctionnement, et les mesures sur ces éclairages sont très parcellaires et ne concernent que les lampes à graisse (à notre connaissance, seule deux mesures ont été réalisées, Delluc et Delluc, 1979a et de Beaune, 1983), ce qui nous a amené à réaliser de nouvelles expérimentations associées à des mesures de spectre et d'éclairage (voir sous-chapitres 2.1.D. *Les sources d'éclairages mobiles paléolithiques : expérimentation* et 2.1.E. *Les sources d'éclairages mobiles paléolithiques : mesures*).

b) Les matériaux

Les calculs ont lieu à partir d'un modèle 3D au format .obj qui peut être ouvert ou fermé, à condition que cela respecte la géométrie réelle des lieux. Ces modèles 3D doivent être texturés, les couleurs étant au format RVB, afin que les nuances de couleur puissent être prises en compte. Le format RVB seul est insuffisant pour calibrer le comportement optique des matériaux puisqu'il dépend des conditions d'éclairages lors de la prise de vue et qu'il donne une information simplifiée de la réalité. C'est pourquoi il doit être associé au spectre du ou des matériaux présents (enregistrés au format .spectre ; Figure 30).

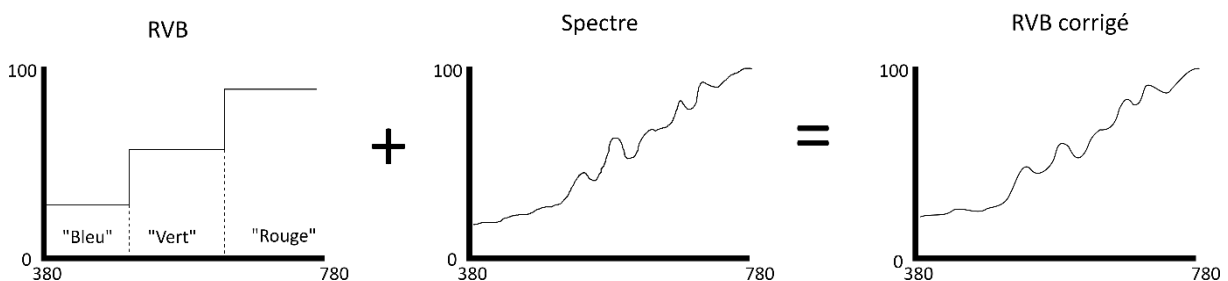


Figure 30 : Illustration de la correction du signal RVB à l'aide du spectre.

Les textures sont déjà disponibles sur les modèles 3D qui nous intéressent, et les spectres peuvent être mesurés sur place ou en laboratoire à partir d'échantillons de matériaux. La directivité peut également être intégrée, mais uniquement à partir de mesures réalisées dans un banc de mesure des propriétés de réflexion de surfaces (BRDF). Les matériaux présents dans les grottes présentent un nombre infini de spectres différents (le comportement optique dépend à la fois de la nature du matériau, mais aussi des variations internes de couleur dues à de multiples facteurs, comme la présence d'une plus ou moins fine couche d'argile, de diverses impuretés dans les spéléothèmes ou encore du taux d'humidité du matériau), or il est impossible de tous les prélever ou mesurer sur place, c'est pourquoi nous avons décidé de mettre en place une approche à deux volets : quelques échantillons, caractéristiques des calcaires présents dans les cavités étudiées ont été prélevés pour être analysés en laboratoire avec un spectrophotomètre, et des mesures *in situ* à l'aide d'un spectroradiomètre ont eu lieu à Cussac et à Lugasson afin d'obtenir un panel de spectres plus fin sur un secteur réduit. L'objectif général a été de sélectionner des matériaux à la fois accessibles, et parmi les plus représentatifs du milieu souterrain.

c) L'écran

L'écran est le médium permettant la visualisation des résultats. Tous les écrans ont une qualité d'affichage différente, et il est possible d'en modifier manuellement la luminosité et le contraste. Il est donc important de calibrer l'écran avec lequel les résultats vont être lus et interprétés. Pour ce faire, nous avons utilisé une sonde de calibration *Datacolor Spyder5ELITE*. Dans un premier temps, il y a une phase d'étalonnage de l'écran afin de régler la luminosité minimale (le point noir) et maximale (le point blanc), le contraste, le gamma et la température de couleur. Dans un second temps a lieu une phase de caractérisation, avec la création d'un profil ICC contenant les corrections effectuées pour l'écran. Ce code permettra à la carte graphique d'envoyer un signal corrigé des couleurs.

Il faut également souligner que les éclairages que nous allons simuler, à savoir des torches et des lampes à graisse, produisent un éclairage très faible. Plongés dans l'obscurité, nos yeux s'adaptent à cet éclairage, il est donc nécessaire, pour pouvoir apprécier avec précision les images produites par *Phanie*, d'être soi-même plongé dans l'obscurité.

3. Fonctionnement du logiciel

Le logiciel *Phanie* propose plusieurs algorithmes qui utilisent diverses techniques de l'informatique graphique pour résoudre les calculs : radiosité hiérarchique, cartes de photons, lancer de rayons, tracé de chemins bidirectionnels, chacune proposant des avantages et un rendu différent (Carré *et al.*, 2000 ; Ribardière *et al.*, 2011). Le fonctionnement général du logiciel est décrit dans la Figure 31, tandis que les méthodes de calculs sont détaillées dans la suite du texte.

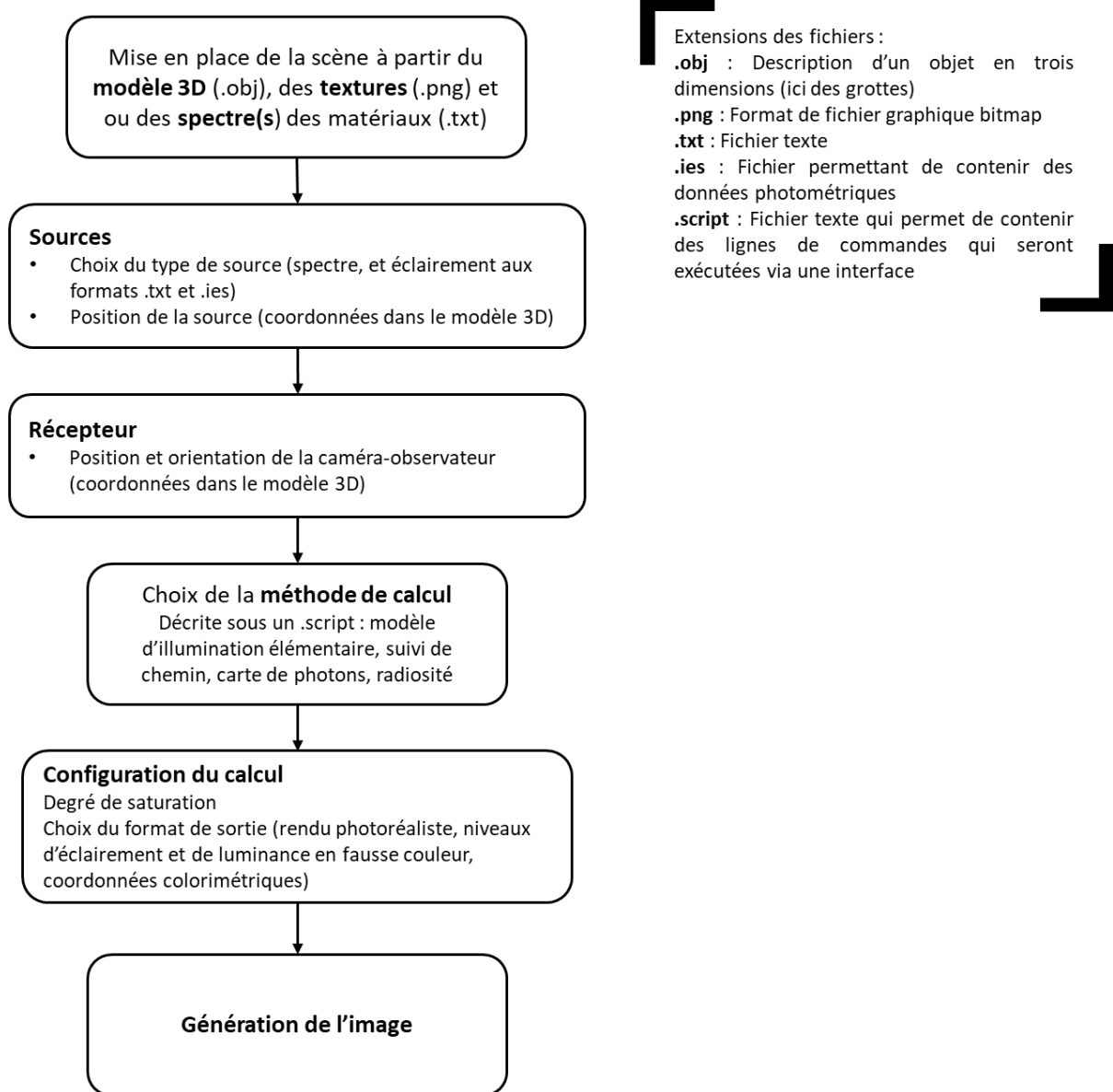


Figure 31 : Étapes de fonctionnement général du logiciel *Phanie* (S. Carré, CSTB).

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

a) Le modèle d'illumination élémentaire

Il s'agit d'une méthode de calcul basée sur la technique du lancer de rayons qui ne prend en compte que l'éclairage direct, les ombres sont donc très marquées (les surfaces qui ne sont pas directement éclairées par la source primaire sont dans l'ombre).

Avantages : Calculs très rapides

Inconvénients : Les ombres sont très marquées (Figure 32)



Figure 32 : Simulation de la présence d'une torche dans le Passage (Lascaux) à l'aide de la méthode par illumination élémentaire. Saturation : 10 000, aucun correctif appliqué.

b) Le suivi de chemin avec cache

Avec cette méthode, des rayons sont lancés depuis la source de lumière mais également depuis l'observateur selon une distribution stochastique afin d'utiliser les chemins les moins bruités. Les rayons, au contact des objets, sont absorbés ou renvoyés avec des propriétés (direction, éclairement et spectre) modifiées en fonction du comportement optique des matériaux en jeu (Ribardière *et al.*, 2011 ; Omidvar *et al.*, 2014). Le nombre de rayons émis est choisi par l'utilisateur : plus il est important, et plus le calcul est long, mais moins le résultat sera bruité.

Avantages : Cette méthode permet, lors d'un même calcul, de modifier l'emplacement de l'observateur et ainsi d'obtenir une série d'images avec différentes positions d'observateur (pour une source à position fixe), créant comme un « film ».

Inconvénient : génère des défauts (tâches sombres ou claires) dans les concavités (Figure 33)

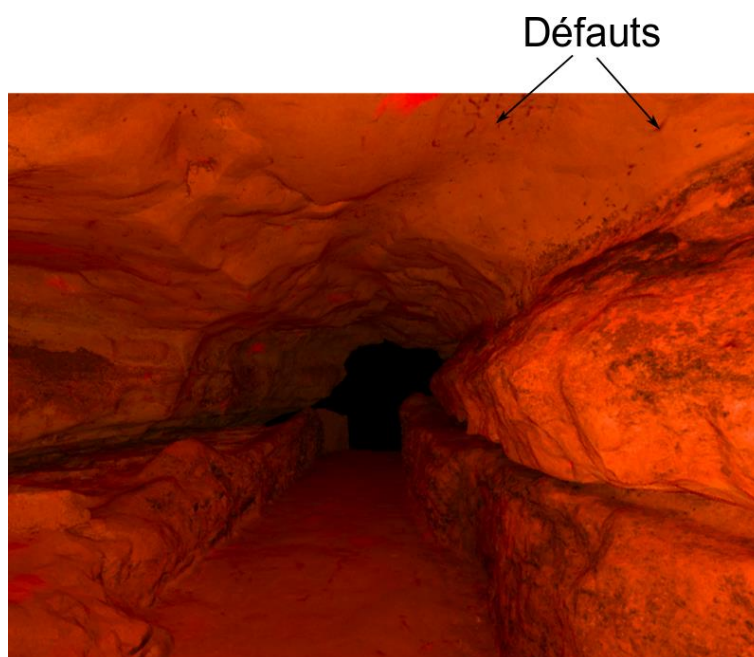


Figure 33 : Simulation de la présence d'une torche dans le Passage (Lascaux) à l'aide de la méthode par suivi de chemin. Saturation : 10 000, aucun correctif appliqué.

c) La carte de photons

Dans ce procédé, au lieu de rayons lumineux, le logiciel lance des particules (les « photons ») depuis la source. Le logiciel compte ensuite le nombre de photons présents par unité de surface afin de donner le niveau d'éclairement de la surface. Plus les surfaces choisies sont fines et plus les effets d'éclairage sont bien définis, mais plus le résultat sera bruité. Il est possible d'augmenter le nombre de photons lancés pour diminuer le bruit, mais cela augmente en contrepartie le temps de calcul.

Avantages : méthode efficace pour gérer des situations inhabituelles, non prises en charges par les autres méthodes, comme la présence de fumée, de vernis, d'eau, etc.

Inconvénients : le calcul est long et ne génère qu'une image (Figure 34).

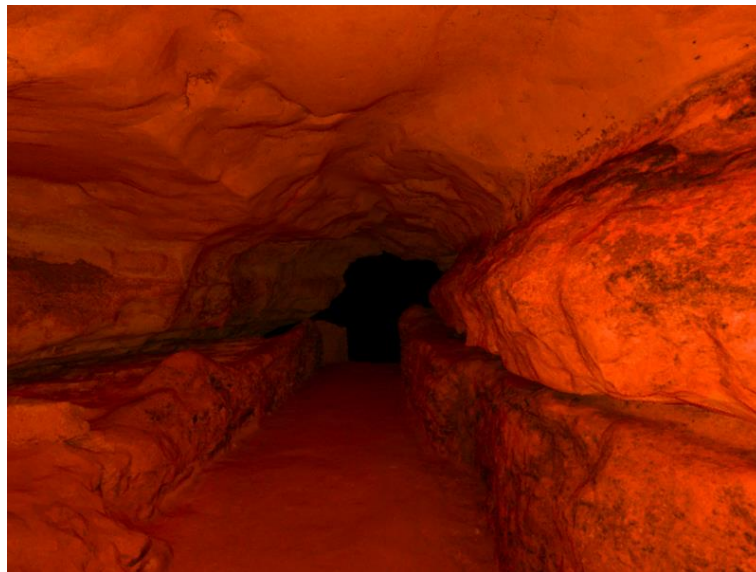


Figure 34 : Simulation de la présence d'une torche dans le Passage (Lascaux) à l'aide de la méthode par lancer de photons.
Saturation : 10 000, aucun correctif appliqué.

d) La radiosité

Dans ce mode de calcul (Zeghers *et al.*, 1997 ; Carré *et al.*, 2000), les surfaces sont divisées en petites étendues régulières dont il est possible de choisir la taille minimale. Ces surfaces réémettent la lumière issue de la source vers toutes les surfaces, le temps de calcul dépend donc du nombre d'éléments de surfaces choisis. Ainsi, dans le cas d'une grotte, il peut être nécessaire

de ne réaliser le calcul que dans la zone d'intérêt pour éviter des temps de calcul extrêmement longs.

Avantages : le rendu est indépendant du point de vue de l'observateur et permet de déplacer la caméra en temps réel au sein de l'extrait de modèle 3D éclairé à l'aide d'une source fixe (Figure 35).

Inconvénients : temps de calcul très long.



Figure 35 : Simulation de la présence d'une torche dans le Passage (Lascaux) à l'aide de la méthode de radiosité.
Saturation : 10 000, aucun correctif appliqué.

e) Conclusions

La Figure 36 présente une même scène, le Passage de Lascaux, éclairée à l'aide d'une torche en pin, selon les différentes méthodes décrites précédemment. On peut observer que le modèle d'illumination élémentaire permet d'obtenir très rapidement des images, mais celles-ci sont sombres. Les méthodes de suivi de chemin avec cache et de la carte de photons ont un bon rendu mais la production d'une image par carte de photon est un procédé plus de trois fois plus long. Enfin, la méthode par radiosité produit un rendu légèrement plus sombre que les deux méthodes précédentes, mais l'accompagne d'un modèle 3D éclairé interactif. Le temps de calcul est alors beaucoup plus long.

Modèle d'illumination élémentaire

2 minutes



Suivi de chemin avec cache

30 minutes



Carte de photons
(2 Millions de photons lancés)

1h40



Radiosité

2 jours



Figure 36 : Comparaison des résultats des simulations photoréalistes de la présence d'une torche dans le Passage de Lascaux selon les différentes méthodes de calcul.

4. Données de sortie

Selon la méthode de calcul utilisée, trois modes de sorties photoréalistes sont possibles : une image fixe (modèle d'illumination élémentaire, suivi de chemin avec cache, carte de photons et radiosité), une série d'images (suivi de chemin avec cache) ou un modèle 3D éclairé (radiosité). S'il est possible d'accompagner ces images par des informations purement physiques, comme par exemple le niveau d'éclairement, nous avons choisi de travailler avec les rendus photoréalistes. En effet, ceux-ci sont plus intéressants pour réaliser des observations précises, notamment des décors pariétaux. Il faut alors garder à l'esprit que ces résultats sont vus sur un écran, ou imprimés, ce qui nous amène à un premier biais dans l'analyse : selon la calibration de l'écran et la qualité de l'impression, nous ne verrons pas les mêmes informations. Il est donc important de calibrer l'écran de travail au préalable afin que les informations de couleur et d'intensité lumineuse affichées correspondent bien aux informations produites par le logiciel, et d'être conscient de ce biais lors de la lecture d'un document imprimé. Un second biais réside dans l'ambiance lumineuse de l'observateur. En effet, avec une lampe à graisse ou une torche, les conditions d'éclairage sont très faibles, mais l'œil s'adapte à l'obscurité, c'est pourquoi les images produites sont très sombres. Il est alors important de se mettre dans les mêmes conditions (c'est-à-dire dans une pièce très faiblement voire non éclairée) pour observer et interpréter l'image. Si cela est possible sur écran, c'est impossible sur un rendu papier. Les sources utilisées sont également très chaudes, ce qui a tendance à donner des images très orangées (Figure 36). Cependant, le phénomène de « constance de couleur » (Foster, 2011) permet au cerveau de composer une représentation mentale stable des couleurs des surfaces des objets malgré des changements dans l'intensité et la composition spectrale de l'éclairage. Ce phénomène implique à la fois les données physiques de l'objet en question et de l'éclairage (type, spectre, puissance), des facteurs biologiques (avec des mécanismes en jeu depuis la rétine jusqu'au cortex visuel) et des facteurs psychologiques (comme la mémoire ou encore les émotions), ce qui rend son intégration dans nos outils extrêmement complexe mais qui explique pourquoi, plongés dans l'obscurité, nous n'avons pas cette impression de « brûlé » contrairement à ce qui se produit lors d'une observation sur écran ou papier (Smithson, 2005 ; Hurlbert et Ling, 2017 ; Hurlbert, 2019 ; Hasantash *et al.*, 2019).

Nous tenons à souligner ici que l'appréciation visuelle des figures issues des simulations a été réalisée selon des conditions strictes (écran calibré, pièce sans source de lumière) permettant leur interprétation. Ces images originelles sont extrêmement sombres lorsqu'observées sur

papier ou écran dans une pièce éclairée, c'est pourquoi l'ensemble des images reproduites dans ce manuscrit a bénéficié, dans *Phanie*, d'une modification dite de « saturation ». Cette correction permet une meilleure appréciation des contrastes et couleurs mais n'est pas strictement représentative de ce qui peut être observé sur l'image non modifiée, ce qui pourra amener le lecteur à des appréciations différentes. Pour cette raison, l'ensemble des images à interprétation sensible sont disponibles, non modifiées, en annexes (numéro précisé pour chaque cas). Cela permettra au lecteur qui le souhaite – et le peut – de réaliser les observations dans des conditions optimales.

5. Conclusion

Nous avons choisi de travailler avec le logiciel *Phanie*, car il permet de simuler des éclairages personnalisés dans des environnements 3D complexes tout en intégrant les données physiques en jeu. Cela nous permettra d'intégrer des éclairages préhistoriques, mais en l'absence de mesures physiques réalisées à leur sujet dans la littérature, il nous faudra au préalable passer par une étape de reproduction et de mesure de ces sources. Il sera également possible (et nécessaire) d'intégrer les spectres des matériaux présents dans le milieu karstique afin d'affiner le comportement optique des parois. Devant l'impossibilité de réaliser des mesures exhaustives sur tous les matériaux présents en grotte, nous avons choisi une double approche avec des mesures sur site et des mesures sur échantillons.

Suite au calcul, le résultat doit être observé sur un écran calibré dans des conditions qui sont les mêmes que celles de la scène. Ainsi, puisque nos scènes ont lieu sous terre, dans un environnement complètement noir hormis la source de lumière, les résultats doivent être observés dans une pièce la plus sombre possible. Plusieurs modes de calculs sont disponibles dans *Phanie*. Nous avons choisi de réaliser les simulations pour l'étude à l'aide des méthodes de suivi de chemin avec cache, permettant d'obtenir des images fixes assez rapidement, et de radiosité, qui permet d'obtenir un modèle 3D interactif disposant d'un éclairage fixe dans lequel il est possible de faire naviguer la caméra, donc l'observateur. Cependant, ces résultats sont extrêmement sombres puisque destinés à être observés dans l'obscurité totale. Ainsi, des images modifiées pour pouvoir être observées dans une pièce éclairée, que ce soit sur écran ou papier, seront réalisées via le modèle d'illumination élémentaire. Cela produit un résultat très contrasté, mais très rapide à calculer (quelques minutes), ce qui permettra d'illustrer nos propos

Chapitre 1 - *Phanie*, logiciel de simulation d'éclairage

(cependant ces images seront légèrement différentes des « vrais » résultats et ne seront donc pas utilisés pour l'interprétation).

C. Caractérisation spectrale des matériaux

L'aspect des matériaux et les nuances de couleurs sont gérés sous *Phanie* à l'aide d'une convolution entre la texture du modèle 3D, aux formats .png, .bmp ou .jpg et le spectre réel des matériaux en jeu. En effet, les textures sont issues de photographies et les couleurs affichées dépendent donc de l'éclairage utilisé lors des prises de vue. La convolution entre ces deux informations (photographies et spectres) permet de corriger et d'affiner les textures. La diversité des matériaux présents dans les grottes et de leurs spectres est telle qu'il est impensable de pouvoir attribuer un spectre particulier à chaque nuance. Nous avons donc décidé de réaliser deux types de mesures de spectres. La première a eu lieu en laboratoire¹¹ sur un nombre limité d'échantillons issus de plusieurs sites, tandis que la seconde a eu lieu *in situ*, à Cussac d'une part et Lugasson d'autre part¹², pour enregistrer un échantillon de la variabilité spectrale des matériaux présents en un même lieu.

1. Protocoles des mesures

a) Mesures en laboratoire

Protocole

Sept échantillons de matériaux (calcaires, calcite et argile) ont été envoyés au CSTB de Nantes afin de bénéficier d'une analyse spectrale et directionnelle. En effet, dans le cas de solides naturels, les surfaces sont irrégulières, ce qui implique que la lumière est réfléchiée dans de nombreuses directions. Lorsque la lumière est renvoyée sans préférence directionnelle, on parle de réflexion diffuse, mais il est possible qu'une ou plusieurs directions soient privilégiées, d'où l'importance d'évaluer la directivité du matériau.

Puisque le milieu karstique est saturé d'humidité, chaque échantillon a été mesuré deux fois, une première fois après séchage à l'étuve pendant 48h et une seconde fois après que la base de

¹¹ Nous souhaitons ici remercier Samuel Carré du CSTB qui a réalisé les mesures en laboratoire à l'aide d'un spectrophotomètre Konica Minolta CL-500A.

¹² Nous souhaitons par ailleurs renouveler nos remerciements envers Dominique Lafon et Stéphane Konik pour avoir accepté d'effectuer les mesures avec leurs appareils (un spectroradiomètre *Konica Minolta CS-2000*).

l'échantillon a été mise en contact avec de l'eau pendant 24h (Tableau 2). Cela a permis d'observer comment le facteur humidité du matériau influence son spectre.

Échantillon	Calcite	Calcaire Cussac	Calcaire Lascaux	Calcaire Leye 1	Calcaire Leye 2	Argile Cussac	Argile Veyssoix
Taux humidité (%)	5,6	2,3	4,4	4,0	3,9	14,8	10,7

Tableau 2 : Taux d'humidité des échantillons après mise en contact avec de l'eau pendant 24h.

Notre intention première était d'analyser les échantillons sur un banc de mesure des propriétés de réflexion de surfaces (BRDF). Cet instrument (Figure 37) permet de mesurer le spectre de l'échantillon selon différents angles, et donc de connaître la directivité du matériau.

Cependant, suite à la crise sanitaire du printemps 2020, les mesures n'ont pu être réalisées sur le dispositif envisagé et nous nous sommes redirigés vers une analyse macroscopique de la directivité et avons utilisé un spectrophotomètre (*Konica Minolta CL-500A*) pour les mesures spectrales.



Figure 37 : Banc de mesure des propriétés de réflexion de surfaces du CSTB de Nantes (cl. S. Carré).

Description des échantillons

Nous avons sélectionné trois types de matériaux, appartenant aux trois grandes familles de matériaux présents dans le milieu karstique : du calcaire, un spéléothème, et du sédiment meuble. Précisément, pour des raisons de contraintes d'accès à ces matériaux (le prélèvement

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

d'échantillons dans des grottes, en particulier ornées, est extrêmement réglementé) et de coût des mesures, nous avons sélectionné sept échantillons¹³ découpés selon la forme d'un pavé d'environ 40 mm de hauteur et 50 mm de côté :



Figure 38 :
Échantillon calcaire

- Du calcaire (Figure 38), issu d'un bloc calcaire extrait d'un affleurement dégagé lors de l'installation de la réserve incendie sur la colline de Lascaux (cote altimétrique située entre 175 et 177 mètres NGF).

- Un échantillon calcaire prélevé dans les déblais d'un sondage réalisé dans l'entrée de la grotte de Cussac (Figure 39), le bloc correspond à du calcaire lité, pouvant coïncider aux faciès 2 ou 3 de l'intérieur de la grotte, qui portent de nombreuses gravures).



Figure 39 :
Échantillon calcaire de Cussac



Figure 40 : Échantillons calcaires de Leye

- Deux échantillons d'un bloc de calcaire directement prélevé dans la grotte de Leye (Figure 40).

- Du sédiment argileux du site de Cussac (Figure 41), prélevé sur le cheminement actuel.



Figure 41 : Échantillon de sédiment argileux de Cussac



Figure 42 : Échantillon de sédiment argileux de Veyssou

- De l'argile issue du site de Veyssou (Dordogne, Figure 42), dont la granulométrie est proche de celle présente à Cussac (Ledoux, 2019).

¹³ Je tiens ici à renouveler mes remerciements envers ceux qui m'ont transmis des matériaux ou qui m'ont accompagné sur le terrain pour récolter des échantillons : Patrice Buraud, Catherine Ferrier, Delphine Lacanette, Lysianna Ledoux et Jean-Christophe Portais.

- De la calcite du site de Coudoulous (Lot, Figure 43).



Figure 43 : Échantillon de calcite de Coudoulous

Nous avons choisi d'analyser trois calcaires différents, d'une part pour disposer des mesures des sites de Lascaux et de Cussac, mais aussi pour avoir un aperçu de la variabilité de ce type de matériau. Pour la même raison, nous avons choisi d'analyser du sédiment argileux de deux cavités : Cussac et Veyssou.

b) Mesures in situ

Les mesures sur échantillons ont été complétées par des mesures réalisées sur site, à Cussac et Lugasson. Cette méthode a permis de mesurer, à l'aide d'un spectroradiomètre, un panel de spectres de matériaux présents dans un même espace.

Fonctionnement du spectroradiomètre

Le spectroradiomètre est un appareil qui permet de mesurer les longueurs d'ondes réfléchies par un obstacle qui arrivent jusqu'à l'instrument de mesure. Pour cela, de la lumière est émise à l'aide d'une source dont on connaît le spectre et l'intensité, puis, après avoir été reflétée par la surface à analyser, elle est détectée par le spectroradiomètre. L'acquisition du spectre brut nécessite entre quelques secondes et quelques minutes, plus le signal lumineux est important et plus la mesure est rapide. Les mesures enregistrées par le spectroradiomètre doivent ensuite être retravaillées car elles dépendent à la fois des propriétés optiques des matériaux mesurés (ce que nous souhaitons obtenir) mais aussi de celles de la source utilisée. Il faut donc soustraire l'influence de cette dernière au résultat enregistré afin d'obtenir le spectre réel des surfaces. Pour cela nous avons placé un réflecteur parfait (dispositif renvoyant l'ensemble du flux lumineux reçu dans toutes les directions) éclairé par la même source et situé à la même distance du spectroradiomètre et de la source que la surface mesurée. Cette mesure a été réalisée sur place lorsque le site le permettait, ou en laboratoire. C'est pourquoi il a été nécessaire d'enregistrer toutes les distances pour pouvoir replacer les éléments (sources, spectroradiomètre et réflecteur parfait) dans la même configuration que sur le site. La réflectance du réflecteur

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

parfait est alors mesurée et correspond au spectre reçu par la surface, aussi appelé blanc de référence. Un traitement informatique permet ensuite de soustraire l'influence de la source au signal reçu par le spectroradiomètre afin d'obtenir le spectre de la surface.

Matériel utilisé et contraintes

Sur le terrain nous avons utilisé un spectroradiomètre *Konica Minolta CS-2000* ainsi qu'un éclairage à lampe halogène Solux (permettant de produire de la lumière sur l'ensemble des longueurs d'ondes du spectre visible). Ce matériel étant lourd et difficile à déplacer, nous n'avons pu l'utiliser que dans la grotte de Cussac et la carrière de Lugasson, en ne faisant des mesures que depuis un emplacement fixe. Le secteur choisi devait à la fois disposer d'une prise électrique à proximité (accessible avec une rallonge), être suffisamment stable et large (au moins un mètre de côté) pour ne faire prendre aucun risque au spectroradiomètre (et aux sols à Cussac), être situé dans un espace où le modèle 3D est disponible avec sa texture, et enfin que l'espace choisi présente des faciès de paroi représentatifs de la variabilité des parois et sols de l'ensemble des galeries texturées. À Cussac comme à Lugasson, un seul endroit a semblé réunir l'ensemble des conditions.

Localisation des mesures à Cussac

À Cussac, les mesures ont été réalisées avec l'aide et le matériel de Dominique Lafon-Pham (IMT Mines Alès). Le spectroradiomètre et deux éclairages Solux ont été installés au pied amont de la passerelle métallique qui monte au Panneau de la Découverte (Figure 44). 35 points y ont été mesurés, à des distances allant de 2 à 15 mètres autour du spectroradiomètre afin de couvrir au maximum la diversité des surfaces présentes : calcaire massif, lité, bioturbé, banquettes d'argiles plus ou moins tassées, argile du sol, stalactites marrons et blanches, revêtements de calcite brune, orangée et jaune et, enfin, des coralloïdes (Figure 45, Figure 46). Comme il était impossible de placer le réflecteur parfait à proximité de la paroi mesurée, la mesure du blanc de référence a eu lieu en laboratoire.

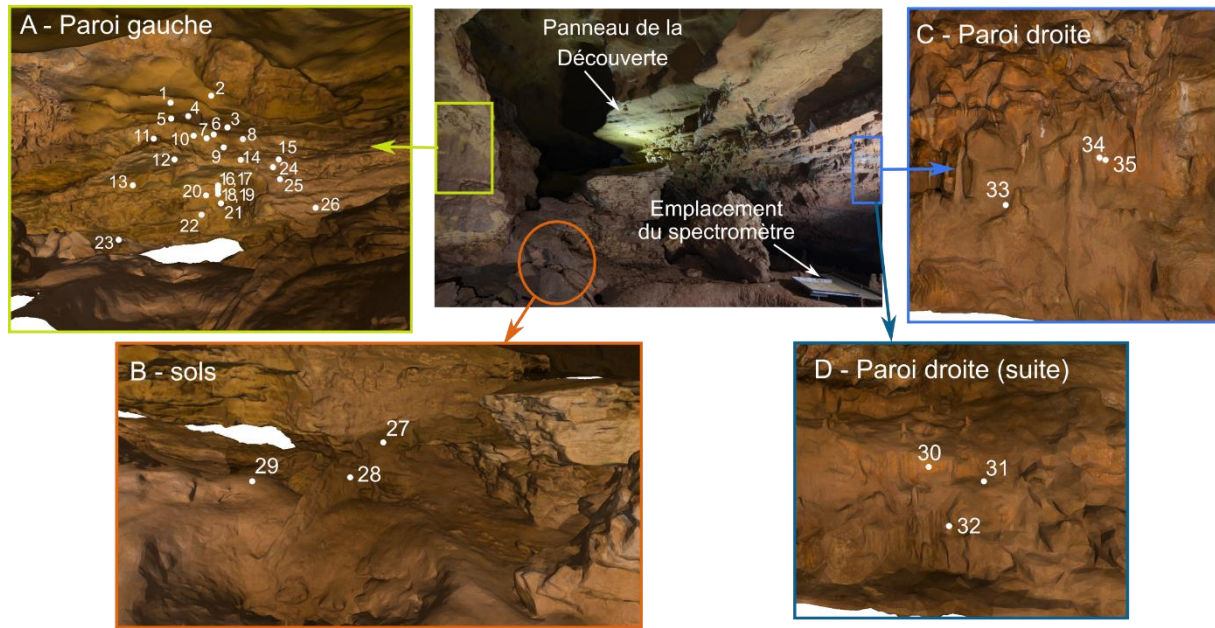


Figure 44 : Localisation des mesures de spectre sur des surfaces de Cussac, près du Panneau de la Découverte.

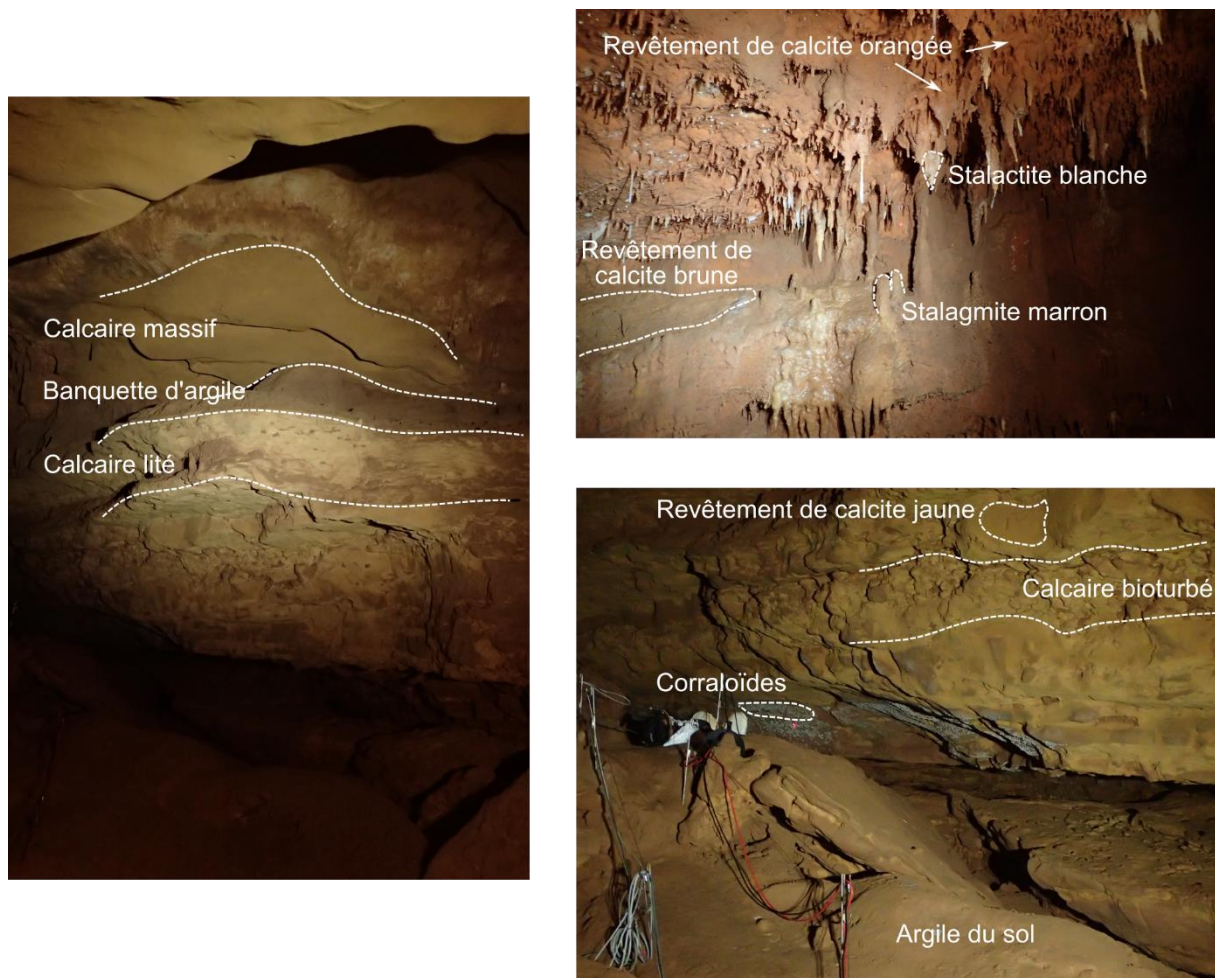


Figure 45 : Faciès-types des surfaces mesurées.

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation



Figure 46 : Correspondance entre les numéros de mesure et le type de matériau.

Localisation des mesures à Lugasson

À Lugasson le spectroradiomètre et un éclairage Solux ont été installés au fond de la petite galerie (Figure 47). Ce matériel a été prêté et mis en place par Stéphane Konik (CNP-PACEA), qui a également réalisé les enregistrements. Dix mesures y ont été prises, dont trois sur le réflecteur parfait (Figure 48), les six autres couvrant trois types de faciès de parois calcaires : du calcaire sain (blanc), du calcaire légèrement couvert de suie (gris) et du calcaire largement noirci par des feux (Figure 49).



Figure 47 : Petite galerie, installation du spectroradiomètre (cl. D. Lacanette).

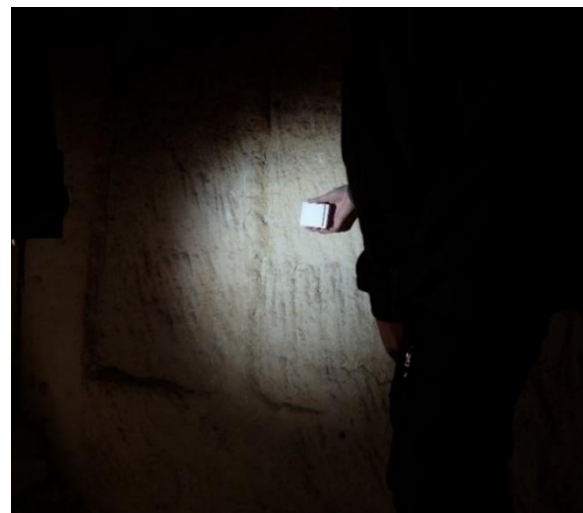
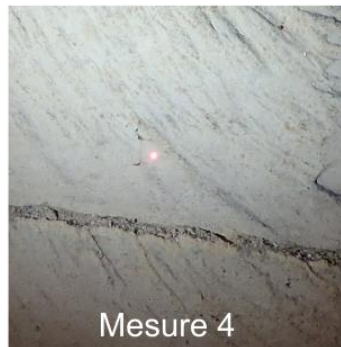


Figure 48 : Mesure sur le réflecteur parfait (cl. D. Lacanette).

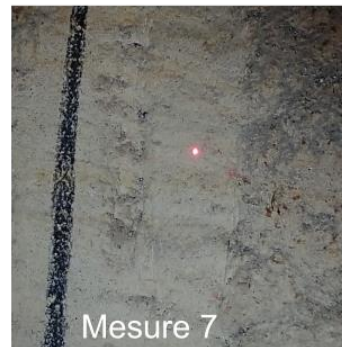
Partie 2 - Mise en place des outils de simulation



Mesure 1



Mesure 4



Mesure 7



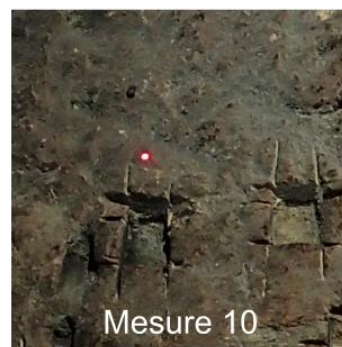
Mesure 3



Mesure 6



Mesure 9



Mesure 10

Figure 49 : Localisation des mesures de spectres réalisées sur les parois de la carrière de Lugasson (cl. D. Lacanette).

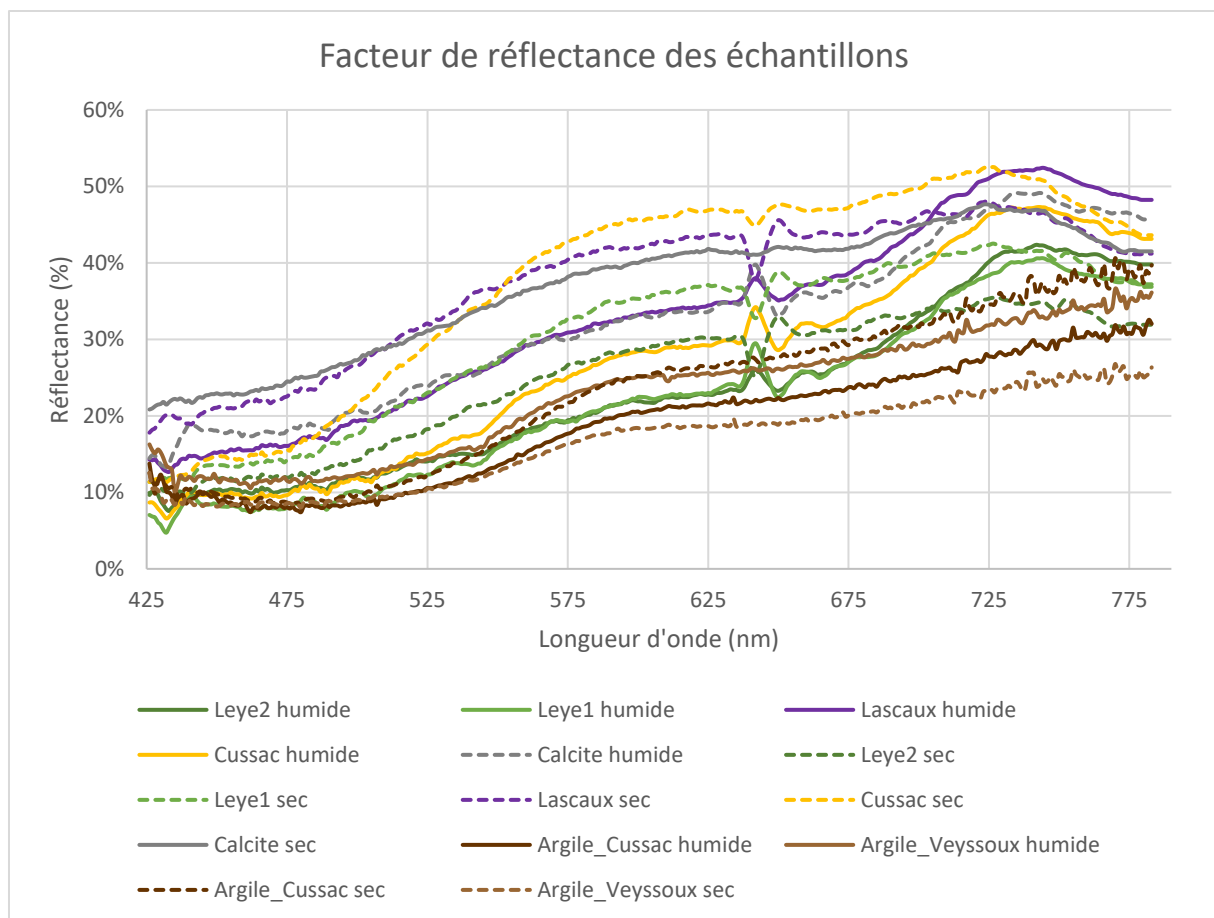
2. Résultats des mesures

a) Directivité des matériaux

En l'absence de mesures possibles, nous avons posé l'hypothèse que les calcaires présents sont très diffus. En effet, les matériaux tels que la craie sont souvent utilisés comme référence de matériau blanc et diffus. Or, si les calcaires présents dans les cavités étudiées ne sont pas des craies, on peut tout de même supposer que leur diffusion s'en rapproche.

b) Mesures en laboratoire

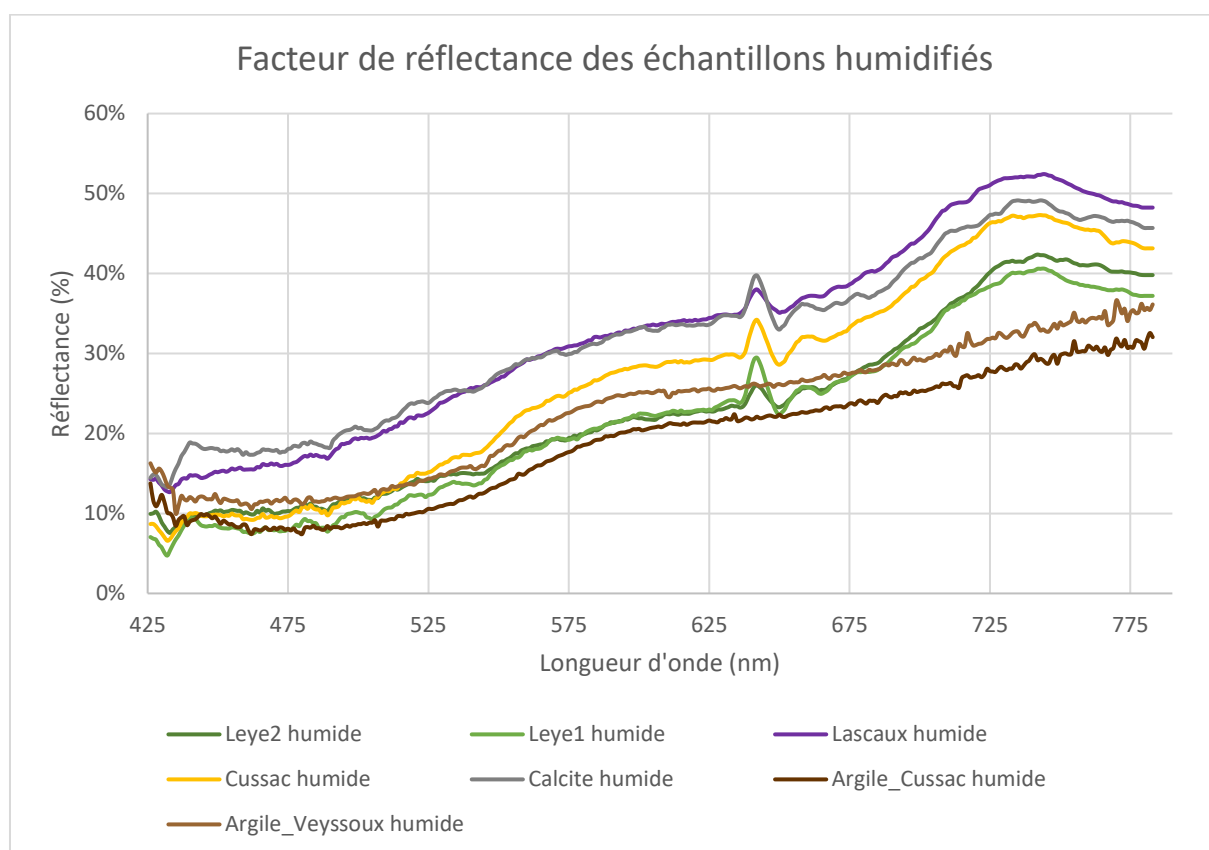
Les mesures des échantillons permettent d'observer une différence entre la réflectance d'un matériau sec et celle d'un matériau humide (Graphique 1), avec en général un matériaux qui s'éclaircit un séchant. Cela n'est pas le cas pour l'argile de Veysoux, ce qui peut être dû à l'apparition de fissures sur l'échantillon lors du séchage.



Graphique 1 : Réflectance des échantillons (Mesure S. Carré, CSTB Nantes).

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

On observe également (Graphique 2) que les échantillons des calcaires humides possèdent des courbes semblables (avec bien sûr une différence de hauteur due à la couleur du calcaire) quel que soit leur dite d'origine, de même que l'échantillon de calcite mesuré, tandis que les argiles ont un comportement semblable entre elles et différent des calcaires et de la calcite. Bien sûr, ce phénomène devra être vérifié par un plus grand nombre d'échantillons mesurés avant d'être confirmé.

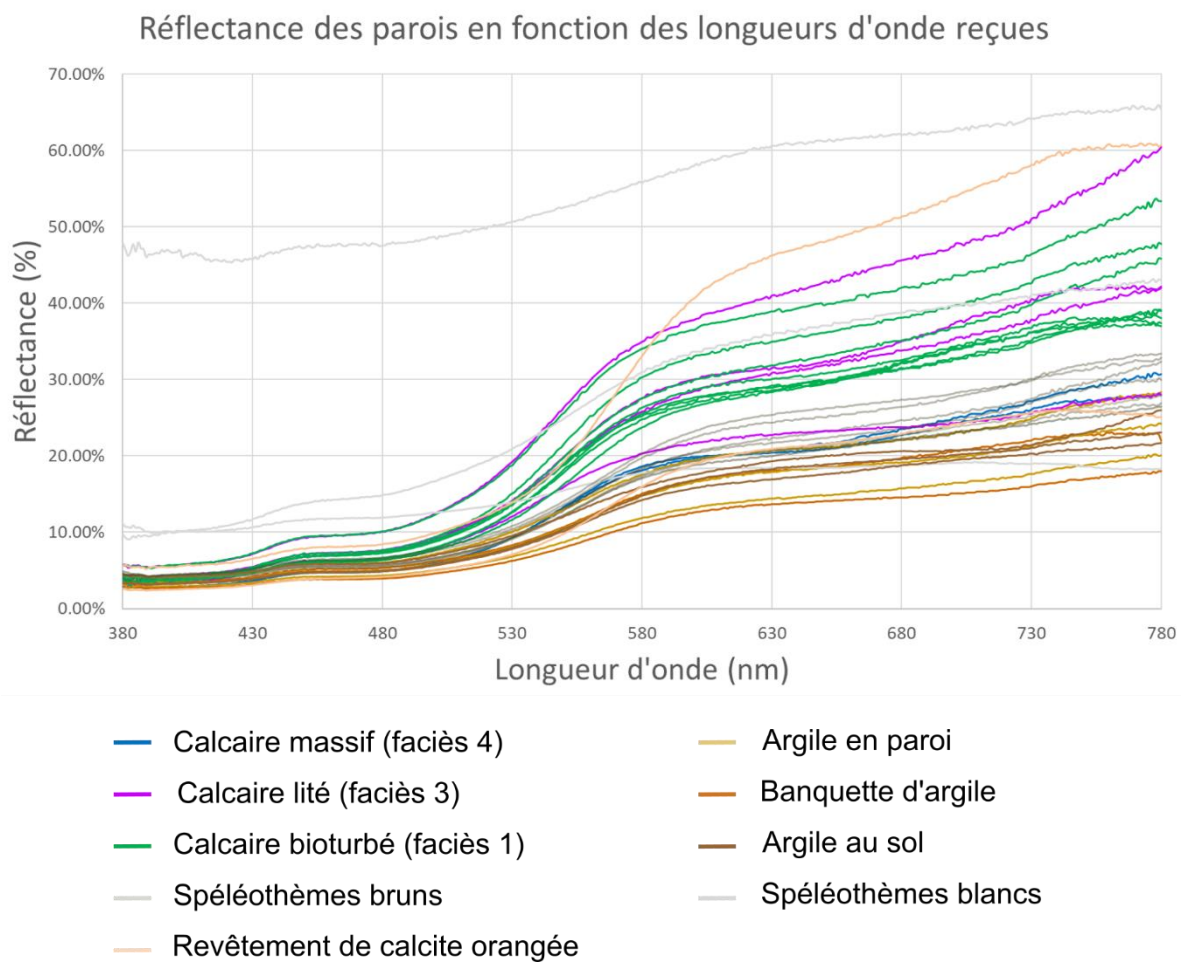


Graphique 2 : Réflectance des échantillons humidifiés (Mesure S. Carré, CSTB Nantes).

Sur le Graphique 2, un décrochement peut être noté vers 640 nm. Cela est dû à l'utilisation, entre autre source, d'un tube fluorescent avec un pic à cette longueur d'onde et à la résolution spectrale du spectromètre qui est assez grossière (10 nm) et applique donc des interpolations (de degré 2 ou 3) afin de construire un spectre tous les 1 nm. Les décrochements observés ne correspondent donc pas à une réalité physique mais à un défaut d'interpolation, qui pourra être corrigé en mettant en place une moyenne glissante sur l'intervalle perturbé.

c) *Mesures à Cussac*

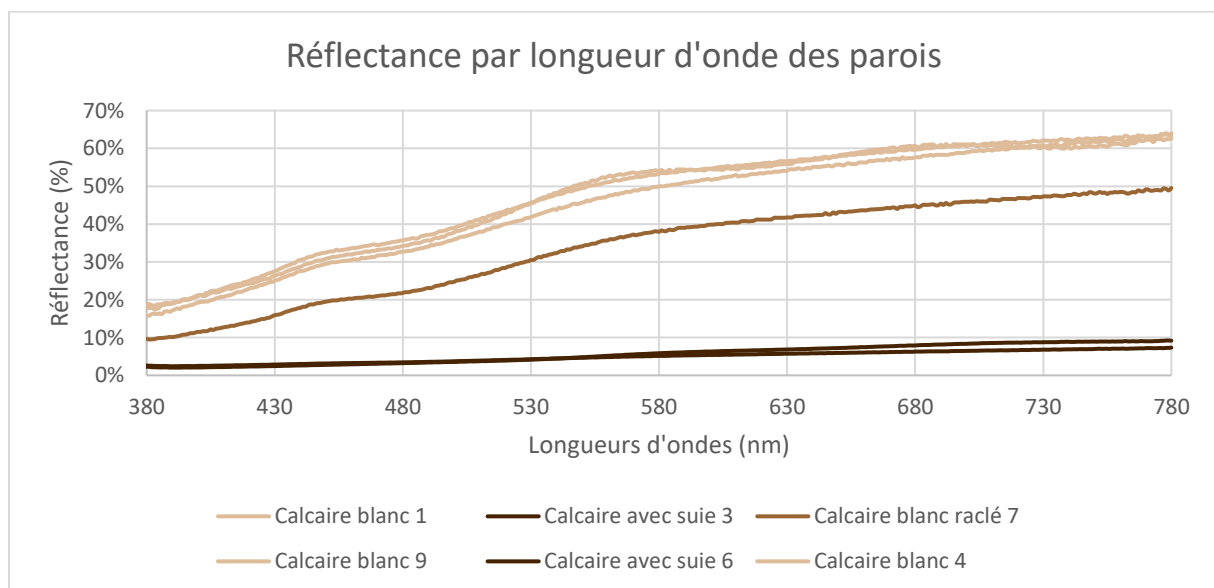
Les spectres mesurés à Cussac montrent un continuum des argiles les plus brunes jusqu'aux calcites les plus blanches en passant par les divers faciès de calcaires. Il ne semble pas possible de discriminer clairement les différents matériaux uniquement à l'aide des spectres, même s'il est possible d'observer une tendance regroupant les calcaires massifs et les argiles d'une part et les calcaires lités et bioturbés d'autre part (Graphique 3).



Graphique 3 : Réflectance d'une sélection de parois de Cussac (Mesure D. Lafon-Pham).

d) Mesures à Lugasson

Sur les six mesures réalisées sur le calcaire, une n'a pas pu être calibrée (n°10), faute de blanc de référence correspondant. Dans la carrière, deux états de paroi sont facilement différenciables : des parois calcaires blanches et des parois recouvertes de suie. Sur le graphique cependant, trois types de spectres se distinguent (Graphique 4) : les parois calcaires blanches (mesures 1, 4 et 9, Figure 49), les parois calcaires recouvertes de suie (mesures 3 et 6, Figure 49) et une paroi calcaire blanche également, mais dont la spécificité est d'être raclée (mesure 7, Figure 49), et dont la réflectance semble être intermédiaire aux deux autres pôles. Plusieurs hypothèses peuvent l'expliquer, comme le fait que la mesure ayant été réalisée près d'une paroi recouverte de suie, il s'agit peut-être d'un décalage entre la surface pointée et la surface réellement mesurée, la mesure pourrait également correspondre à l'extrême des réflectances possibles pour ces surfaces calcaires blanches, ou bien à un artefact dû au raclage de la surface. Enfin, il est possible de noter que toutes les courbes ont le même comportement, avec des hauteurs de réflectances différentes, les calcaires les plus clairs ayant une réflectance plus élevée que les calcaires sombres comme attendu.



Graphique 4 : Réflectance d'une sélection de parois de Lugasson (Mesure S. Konik)

3. Discussion

Alors que dans la littérature la réflectance des surfaces des grottes est souvent résumée à « environ 40 % de réflectance » (Delluc et Delluc, 1979a), ou simplement « inférieure à 100 % » (Pastoors et Weniger, 2011), nos mesures ont permis de montrer que cette caractéristique est bien plus complexe que cela, puisque qu'elle varie en fonction des longueurs d'onde, ce qui permet par ailleurs de donner sa « couleur » au matériau.

Les spectres sur échantillons permettent d'avoir un aperçu de la variabilité des formes des spectres inter-sites, tandis que les spectres mesurés à Cussac ou Lugasson permettent de comprendre que les calcaires d'un même site ont tendance à se comporter de la même manière (les formes des courbes se suivent, les variations dans la hauteur des courbes étant essentiellement liées à la clarté des matériaux). Seules les mesures prises sur la calcite semblent varier au sein d'un même site. Cela peut s'expliquer par les natures très variées de ce matériau (coulées, draperies, stalagmites et stalactites, coralloïdes par exemple) et par la présence d'impuretés de nature et de quantité variables.

a) Correction spectrale du modèle 3D de Cussac

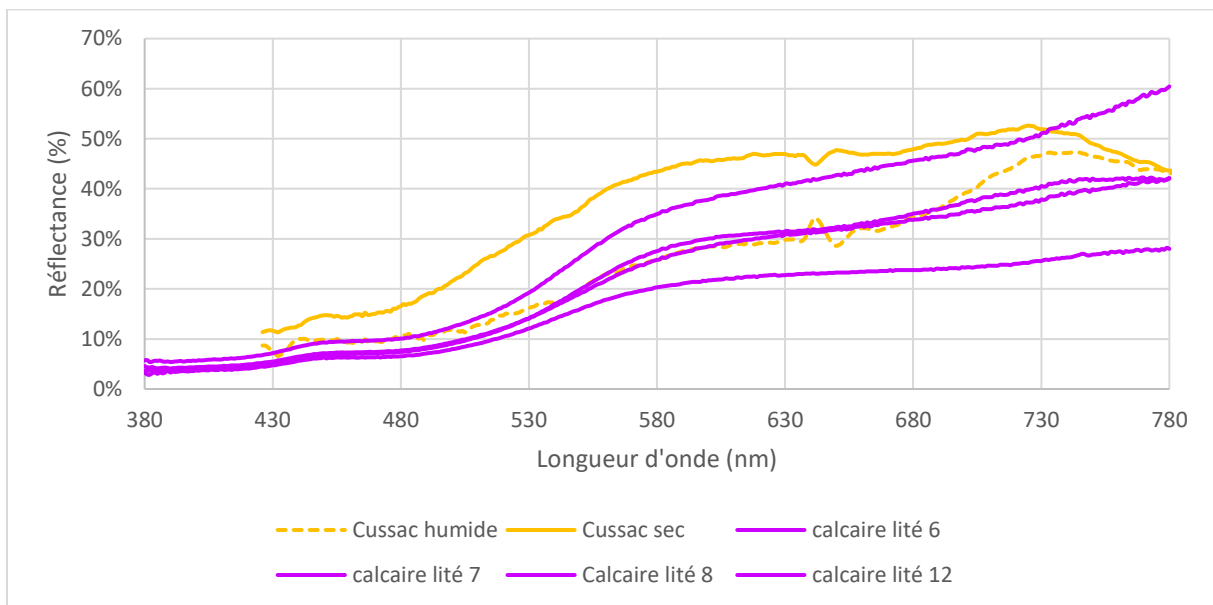
À Cussac, il existe un continuum de spectres entre les différents matériaux, ce qui rend impossible l'attachement strict d'un spectre à un faciès. Pour cette raison nous appliquerons un correctif global à tous les matériaux basés sur le spectre moyen des calcaires de Cussac.

b) Correction spectrale du modèle 3D de Lascaux

La comparaison entre les mesures *in situ* du calcaire lité de Cussac et les mesures d'un échantillon de ce même type de calcaire sec et humide (Graphique 5) montre que le calcaire humidifié semble mieux représenter le comportement spectral de ce type de calcaire. C'est pourquoi, à titre d'hypothèse, à Lascaux nous allons appliquer un correctif spectral basé sur la mesure d'un échantillon humide. Cette mesure sera extrapolée entre 380 et 420 nm et au-delà de 730 nm, et le décrochement de la courbe autour de 640 nm sera corrigé. Bien sûr, seules des mesures *in situ* pourraient confirmer ou infirmer la pertinence de cette hypothèse. Or, pour des

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

raisons conservatoires, il est, à l'heure actuelle, impossible de pénétrer dans Lascaux, même pour y réaliser des mesures non invasives. Notre travail permet donc de proposer une approche non intrusive : en montrant la présence d'un continuum des spectres au sein d'un même site, il devient possible, après récolte et analyse d'échantillons humidifiés aux abords du site (et à condition de s'assurer qu'ils sont issus des mêmes niveaux que ceux présents à l'intérieur de la cavité), d'extrapoler un spectre moyen des calcaires de l'intérieur du site.



Graphique 5 : Mesures de réflectance sur des calcaires lités du site de Cussac (mesures S. Carré, CSTB Nantes et D. Lafon-Pham).

D. Les sources d'éclairages mobiles paléolithiques : expérimentations¹⁴

Lorsque nous pénétrons aujourd'hui dans une grotte ornée, c'est équipé d'un éclairage puissant, directionnel, stable, autonome, équipé d'ampoules led et souvent porté sur le front quand il n'est pas installé en fixe dans la grotte. L'éclairage préhistorique, sous la forme de lampes à graisse ou de torches, est, au contraire, peu puissant mais omnidirectionnel, vacillant, il doit être régulièrement surveillé et alimenté, dispose d'un spectre d'émission continu et est porté à la main. Ces différences engendrent *de facto* une perception différente de l'espace, c'est pourquoi nous souhaitons simuler un éclairage reproduisant les caractéristiques des luminaires paléolithiques.

Il est possible d'intégrer des sources d'éclairages au logiciel *Phanie* à condition de disposer du spectre qu'elles produisent et de leur éclairement dans l'espace. Or, ces données sur les éclairages paléolithiques sont fortement lacunaires, voire inexistantes (Groenen, 2016), ce qui nous a amené à réaliser une série d'expérimentations sur les éclairages paléolithiques afin d'en mesurer le spectre et l'éclairement, à savoir les lampes à graisse et les torches.

L'objectif de ces expérimentations est de réaliser des mesures sur des éclairages qui ont pu être utilisés au Paléolithique tout en proposant un protocole de sélection des matériaux et de fabrication des éclairages rigoureux. Les expérimentations ont été menées en utilisant le moins d'outils modernes possibles afin de pouvoir également réaliser des observations sur la fabrication et l'utilisation de ces sources d'éclairage. Ainsi, les expérimentations ont consisté en plusieurs étapes : dans un premier temps une phase de recherche bibliographique a été conduite afin de définir le champ des possibles. Dans un second temps, les matériaux et outils ont été prélevés dans la nature à l'aide d'outils simples mais aussi d'outils modernes (lames en silex ou couteaux, tronçonneuse pour les branches de bois les plus épaisses). Ensuite, les

¹⁴ Ces expérimentations sont le fruit d'un travail collectif et je souhaite ici renouveler mes remerciements envers celles et ceux qui m'ont aidée à mettre en place les protocoles expérimentaux, à collecter les matières premières, à fabriquer les sources, à réaliser des tests en milieu souterrain, à déterminer les outils et le protocole des mesures, à mettre à notre disposition le matériel de mesure, à réaliser les mesures, et à prendre des photographies : J. Boudier-Blet (TRACES), S. Carré (CSTB), J. Caunègre (PACEA), C. Ferrier (PACEA), L. Jouteau, S. Konik (CNP), D. Lacanette (I2M – TREFLE), D. Lafon (IMT Mines Alès), M. Langlais (PACEA), J. C. Leblanc (TRACES), P. Mora (ARCHEOVISION), O. Spinelli-Sanchez (IRAMAT-CRP2A), et enfin, l'équipe de chasse de Jumilhac le grand (24), merci !

sources ont été fabriquées avec divers matériaux afin de ne sélectionner que les plus efficaces. Ces sources ont été testées en milieu souterrain puis caractérisées à l'aide d'un luxmètre et d'un spectroradiomètre.

1. Protocole de fabrication des lampes à graisse

Le protocole de sélection des matériaux et de fabrication des lampes à graisse a consisté en plusieurs étapes :

- Analyse des vestiges archéologiques connus
- Revue de travaux antérieurs sur le fonctionnement des lampes à graisse
- Récolte des matières premières
- Creusement des cuvettes des lampes
- Mise en place du procédé d'allumage et d'entretien de la flamme
- Comparaison et sélection des mèches pour les mesures
- Comparaison et sélection des graisses pour les mesures
- Présentation des lampes mesurées

a) *Analyse des vestiges archéologiques*

Analyse morphologique

Plus de 300 objets archéologiques retrouvés sur le territoire français peuvent être considérés comme des lampes à graisse paléolithiques (De Beaune, 1983 ; Groenen, 2016). Il n'est cependant pas toujours aisé de déterminer les objets qui ont réellement été utilisés comme luminaire, les indices utilisés aujourd'hui à l'échelle macroscopique étant la présence de charbons, des traces de chauffe (rubéfaction), ou encore la présence d'une cuvette (Allain, 1965). Ces indices, bien que souvent les seuls disponibles, ne sont cependant pas suffisants pour affirmer l'utilisation en tant que lampe de l'objet, une étude multi analytique étant nécessaire (Medina-Alcaide *et al.*, 2019).

Sophie de Beaune, dans sa thèse (1983), étudie l'ensemble des vestiges alors considérés comme étant des lampes paléolithiques, ce qui permet de connaître leurs formes et dimensions. La

plupart des lampes sont en calcaire, bien que quelques-unes soient connues en silex ou en grès, ces dernières ayant davantage tendance à être façonnées et à porter un manche. Les lampes les plus fréquentes (en-dehors des lampes fixes, que nous avons exclues de notre étude puisque nous nous focalisons sur l'éclairage mobile) sont à circuit fermé (80 %), avec une cuvette souvent ovale (48 %) ou circulaire (31 %), creusée par piquetage (51 %), parfois également raclée (15 %) voire polie (18 %). Ces cuvettes ont une profondeur moyenne légèrement supérieure à 2 cm (22,75 mm) et un volume moyen de 28,5 ml (De Beaune, 1983).

Ces dimensions sont en accord avec celles issues de l'étude de B. et G. Delluc (1979a) portant sur 35 pierres retrouvées à Lascaux qu'ils considèrent comme étant des lampes. Leurs volumes varient entre 15 et 75 ml, avec une moyenne de 36 ml. Les lampes étudiées par B. et G. Delluc semblent toutefois assez simples dans leur fabrication, la plupart n'étant pas retouchées, ou très peu, et le nombre de lampes plates, légèrement inclinées ou naturellement creusées étant assez élevé (Figure 50). Des traces de rubéfaction et de charbon ont cependant été retrouvées sur ces objets, ce qui en fait des lampes probables (Delluc et Delluc, 1979a).



Figure 50 : à gauche, lampe façonnée en grès à cuvette fermée (© Musée national de Préhistoire). Au centre, plaquette de calcaire naturellement concave potentiellement utilisée comme lampe (© Musée national de Préhistoire). À droite, ensemble de pierres creuses et potentielles lampes issues de la mission Glory 1957-1958 (d'après Delluc et Delluc, 1979a).

À Cussac, seules deux lampes ont à ce jour été découvertes, toutes deux en Branche Amont. La première est à proximité du cheminement emprunté de nos jours mais également par les préhistoriques. Elle est plate, calée entre plusieurs spéléothèmes et présente des traces charbonnées au centre de sa surface ainsi que des traces de rubéfections plus discrètes situées sur au moins l'un de ses contours (Figure 51). La seconde est posée à même le sol, face contre terre ce qui empêche d'observer sa surface active. On devine cependant une partie creuse, charbonneuse en son centre et nettement rubéfiée autour (Figure 51).

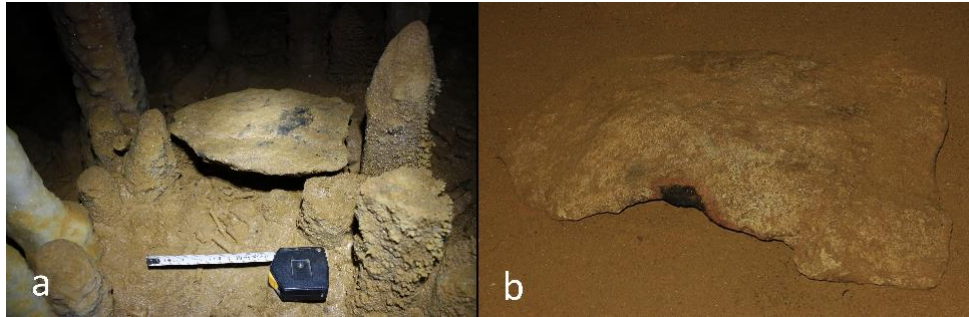


Figure 51 : a) lampe plate (cl. L. Ledoux), b) lampe retournée (cl. M. Peyroux).

Analyses anthracologiques

Quelques analyses sur des résidus charbonneux ont pu être menées. Dans le cadre de l'étude des lampes de Lascaux (Delluc et Delluc, 1979a ; Leroi-Gourhan *et al.*, 1979), les analyses révèlent la présence de plantes ligneuses (du conifère dont du genévrier ont été déterminé) et non ligneuse (dont des graminées). Les charbons et cendres présents dans la lampe en grès ont été observés à plusieurs reprises, la dernière analyse en date indiquant la présence de genévrier et peut-être également de résineux, comme du pin (Leroi-Gourhan *et al.*, 1979).

D'autres analyses (de Beaune, 1983) ont par la suite pu montrer la présence de mèches d'origines végétales, à la fois ligneuse (du genévrier a notamment été reconnu) et non ligneuse. Une étude plus récente sur une lampe de la grotte de Nerja (Espagne) de contexte solutréen indique la présence de pin (sylvestre ou noir ; Medina-Alcaide *et al.*, 2019). La fréquente présence de plantes ligneuses cache peut-être non pas une plus grande fréquence de leur utilisation, mais le fait que ces plantes se conservent mieux, après calcination, que les plantes non ligneuses (notamment sous la forme de charbons de bois).

b) Expérimentations précédentes

Les premières expérimentations publiées sur les lampes à graisse reviennent à D. Peyrony (Peyrony, 1918), qui plaça dans une « pierre à cupule » des fibres végétales ou des mousses enflammées au-dessus desquelles un morceau de suif était suspendu, ce qui permettait, en goutant sur les mèches, d'entretenir la combustion. À sa suite, de nombreux auteurs émettront différentes hypothèses sur le fonctionnement des lampes à graisse (p. ex. Aubourg, 1983).

Si les études de ces premiers auteurs ont le mérite d'être riches en propositions, aucune expérimentation n'a été réalisée – ou publiée – afin de valider leurs hypothèses. Il faut attendre la fin des années 70 puis 80 avec respectivement les travaux de B. et G. Delluc (1979a) portant sur les lampes issues du site de Lascaux, de S. de Beaune (1983, 1987a, 1987b, 2000) sur l'ensemble des lampes découvertes sur le territoire français et de A. Aubourg (1983) qui réalise des expérimentations de lampes à graisse pour que cela soit fait. Enfin, au début des années 2000, un travail est réalisé sur les techniques d'allumage des lampes (Rigaud, 2000).

Il ressort de ces expérimentations un modèle général de fonctionnement des lampes à graisse : la mèche, imbibée de graisse fondue, est allumée. La chaleur produite par la flamme va permettre aux morceaux de graisse disposés à côté de fondre à leur tour et de remonter le long de la mèche par capillarité, entretenant ainsi le processus. La difficulté première est donc d'obtenir de la graisse fondue pour imbiber la mèche. Ensuite, le procédé a une durée très longue, d'au moins plusieurs heures, tant que de la graisse est ajoutée régulièrement et que l'excès de graisse fondue est régulièrement évacué, (Delluc et Delluc, 1979a ; de Beaune, 1983). De ce modèle, quelques variantes existent, notamment sur la position de la graisse par rapport à la mèche en fonction de la forme de la cuvette, ou encore du type de mèche.

Les Tableau 3 et Tableau 4 présentent l'efficacité des différentes mèches et graisses utilisées par les différents auteurs, et montrent à la fois des informations qui font l'unanimité, comme la qualité de l'amadou comme mèche d'éclairage (produisant une flamme jusqu'à 15-20 cm de hauteur, Aubourg, 1983), ou la mauvaise qualité de la moelle de cervidé comme graisse, mais d'autres sont contradictoires : le lichen, la mousse et l'os sont-ils, ou non, de bonnes mèches ? La graisse de cheval est-elle de meilleure ou de moins bonne qualité que le suif de bœuf ?

Auteur	Huile de phoque	Suif de bœuf	Graisse de cheval (flancs)	Moelle de cervidé
B. & G. Delluc, 1979a		+	-	---
S. de Beaune, 1983	+++	-	+	---
A. Rigaud, 2000		+		

Tableau 3 : Efficacité de quelques graisses testées dans des lampes à graisse. +++ : Excellent qualité, + : bonne qualité, - : qualité moyenne, --- : très mauvaise qualité.

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

Auteur	Lichen	Mousse	Genévrier (bois)	Bois blanc	Charbon espèce ?	Écorce de bouleau	Champignon séché	Amadouvier	Bois pourri	Os
B. & G. Delluc, 1979a	-	-	+++	+++				+++		
S. de Beaune, 1983	+	+	+			---	---			---
A. Aubourg, 1983								+++	+++	
A. Rigaud, 2000					+					+

Tableau 4 : Efficacité de quelques mèches testées dans des lampes à graisse. +++ : Excellent qualité, + : bonne qualité, - : qualité moyenne, --- : très mauvaise qualité

Enfin, de ces expérimentations quelques mesures d'éclairage ont été réalisées. D'abord par B. Delluc et G. Delluc (*op. cit.*), pour qui l'intensité des lampes à graisse est très semblable, voire légèrement supérieure, à celle des bougies modernes : mesurées à un mètre d'une paroi calcaire au coefficient de réflexion d'environ 40 à 50 %, ils obtiennent 0,5 blondels pour une bougie moderne et entre 0,3 et 4 blondels pour les lampes à graisse (Delluc et Delluc, 1979a). De nouvelles mesures ont été réalisées par S. de Beaune (1983) qui quantifie l'éclairage d'une lampe à graisse composée de graisse de cheval et d'une mèche en lichen. Elle obtient alors un éclairage moyen de 0,6 lx à 0,50 m de la source, avec une variation de 0,3 lx à 0,9 lx, ce qui correspond à une intensité moyenne de 0,15 cd, une mesure bien inférieure à celle d'une bougie moderne (1 cd), ce qui semble en désaccord avec les mesures précédentes.

Les questions irrésolues concernant les composants les plus efficaces d'une lampe à graisse, les contradictions observées sur les mesures d'éclairage, ainsi que l'absence de mesures de spectre nous ont amenée à concevoir des expérimentations allant de la sélection des matériaux jusqu'à la mesure d'éclairage et de spectre des lampes. L'objectif de cette série expérimentale est de sélectionner les matériaux et la méthode d'allumage et d'entretien des lampes qui produit un maximum de lumière (tout en utilisant des matières premières présentes au Paléolithique supérieur) avant de réaliser les mesures.

c) Récolte des matières premières

Une lampe à graisse est composée de trois éléments : la lampe en matière minérale, qui n'est que le support de la combustion, la mèche, qui sert d'une part à canaliser la flamme et d'autre part à conduire l'huile chaude jusqu'à la flamme pour maintenir le cycle de combustion, et la graisse, qui, fondue, est le combustible.

Les blocs calcaires

N'importe quel bloc de pierre naturellement creusé peut faire office de support de lampe, mais le registre archéologique enregistre une plus grande fréquence de lampes artificiellement creusées dans des blocs ou plaquettes de calcaire (de Beaune, 1983), c'est pourquoi nous avons choisi de réaliser nos lampes dans ce matériau. Pour cela, nous avons sélectionné des blocs présents à proximité immédiate du site de Cussac (blocs effondrés de la barre rocheuse continuant le porche de la grotte) et des blocs extraits du site même lors du creusement d'un sondage dans l'entrée. Ces blocs ont été choisis à la fois pour leur localisation et pour leur forme naturelle d'épaisse plaquette. Afin de creuser ces plaquettes, nous avons utilisé des galets de plusieurs matériaux (quartz, basalte) collectés dans un cours d'eau (Figure 52).



Figure 52 : Galets utilisés lors de la taille des lampes (cl. A. Jouteau).

Les mèches

Nous avons fait le choix de ne tester que des mèches qui pouvaient être présentes au Paléolithique supérieur, donc capables de se développer dans des conditions froides et arides. Nous n'avons également effectué aucune préparation préalable autre que de la découpe. En effet, il est possible d'améliorer la flamme produite par certaines mèches suite à une préparation (comme par exemple la préparation de mousses, attestée chez les Inuits, Hough, 1896, 1898), mais dans un premier temps nous avons fait le choix de proposer une préparation minimale des matières premières afin de présenter une base méthodologique simple, à approfondir s'il s'avère nécessaire de poursuivre les questionnements sur les mèches. Nous avons donc choisi de tester sept mèches d'origines différentes :

- **Une boule de lichen** (*Evernia prunastri* ; Figure 53). Il existe de nombreuses espèces de lichen, avec probablement des qualités de mèche différentes. Nous avons sélectionné *Evernia prunastri* car cette espèce a été utilisée lors des expérimentations menées par B. et G. Delluc (1979a). De plus, cette espèce est adaptée à des environnements variés, y compris froids, et est présente dans toute l'Europe.



Figure 53 : Mèche de lichen en boule (à gauche, cl. A. Jouteau, C. Ferrier) et lichen naturel (à droite, cl. B. Dupont).

- **Une boule de mousse** (de l'ordre des *Hypnales* ; Figure 54). Comme pour le lichen, il existe de nombreuses espèces de mousses, celle-ci ayant été sélectionnée à la fois pour sa présence dans notre environnement et pour ses capacités d'adaptation à des climats variés.



Figure 54 : Mèche de mousse (cl. C. Ferrier)

- **Un morceau d'amadou** (*Fomes fomentarius* ; Figure 55). L'amadouvier est un champignon constitué d'une cuticule imperméable, d'une partie cotonneuse (l'amadou *stricto sensu*) et d'une partie fibreuse. La cuticule est imperméable et doit être enlevée pour fabriquer la mèche, mais elle permet au champignon d'être sec en toute circonstance et de ne nécessiter aucun séchage. Lors de nos expérimentations nous avons eu l'occasion d'utiliser autant la partie fibreuse que la partie cotonneuse et les

deux semblent aussi efficaces pour fonctionner en mèche. Ce champignon, qui se développe sur des arbres morts ou affaiblis, a une distribution circumboréale et était donc probablement disponible au Paléolithique supérieur

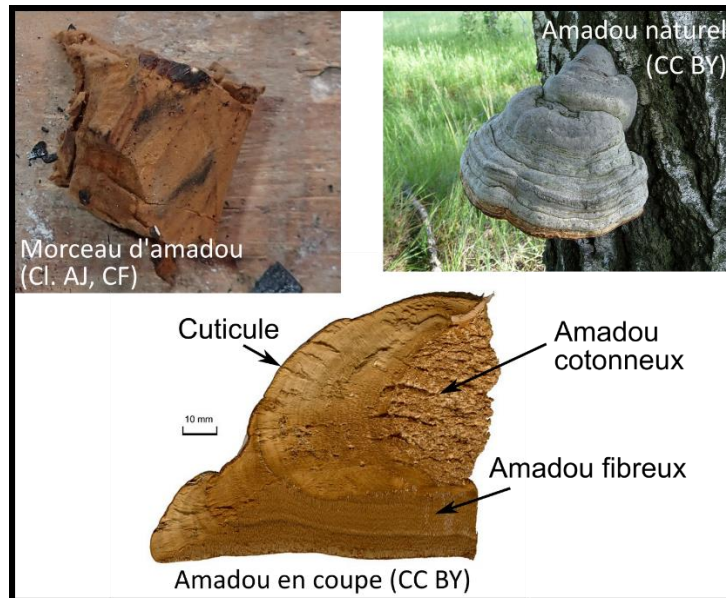


Figure 55 : Amadou naturel (en haut à droite), en coupe (en bas) et en morceau pour servir de mèche (en haut à gauche).

- **Une braise de pin sylvestre (*Pinus sylvestris* ; Figure 56).** Le pin sylvestre était présent dans l'environnement au Paléolithique supérieur et sa présence est attestée en contexte de grotte ornée.



Figure 56 : a) braise refroidie (charbon) de pin sylvestre (cl. A. Jouteau, C. Ferrier), b) pin sylvestre (cl. A. Jouteau).

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

- **Une braise de châtaignier** (*Castanea sativa* ; Figure 57). Le châtaignier est plutôt présent en climat tempéré. Il a été ajouté afin de pouvoir comparer l'efficacité d'une braise de bois résineux (le pin) avec une braise de bois non résineux (le châtaignier).

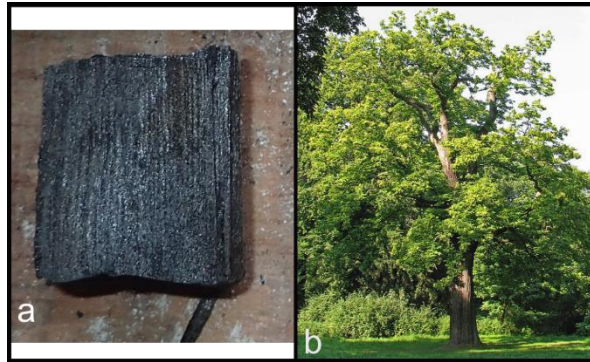


Figure 57 : a) braise refroidie (charbon) de châtaignier (cl. A. Jouteau, C. Ferrier), b) châtaignier naturel (cl. Darkone).

- **Un morceau d'aubier de pin maritime** (*Pinus pinaster* ; Figure 58). L'aubier est le bois situé entre le cœur et l'écorce de l'arbre. L'aubier de bois mort a la particularité d'être poreux et facilement découpé à l'aide d'une lame. Le pin maritime ne supportant pas les températures basses et les sols calcaires, il n'était probablement pas présent sur le sol français au Paléolithique supérieur, mais les propriétés de son bois sont très semblables à celles du pin sylvestre ou du pin noir, c'est pourquoi en l'absence de pin sylvestre ou noir mort accessible nous avons utilisé du pin maritime.

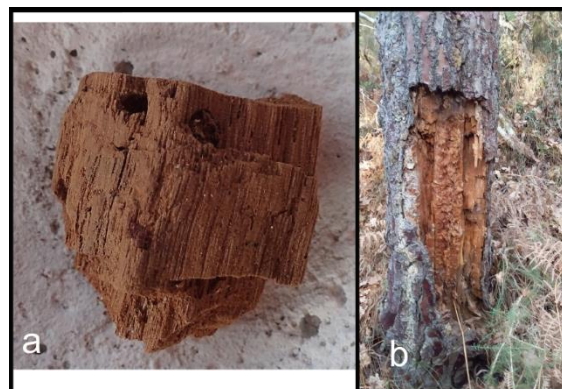


Figure 58 : a) Morceau de pin maritime ayant servi de mèche (cl. A. Jouteau, C. Ferrier), b) tronc de pin maritime mort (cl. J. C. Leblanc).

- **Un fragment d'os spongieux de bœuf** (Figure 59). Avant son utilisation comme mèche, l'épiphyse a été brûlée afin que toutes les graisses et tissus présents soient carbonisés et que l'os soit bien sec.



Figure 59 : Morceau d'épiphyse de bœuf carbonisée (cl. A. Jouteau, C. Ferrier).

Les graisses

Concernant la graisse utilisée, nous avons été confrontés à la disparition ou à la raréfaction dans nos régions des animaux présents au Paléolithique supérieur ayant pu servir de réserve de graisse, en particulier entre la fin de l'été et le début de l'hiver : renne, bison, mammouth, cheval préhistorique. Nous avons alors cherché de la graisse issue d'animaux modernes proches de ces grands herbivores mais accessibles, à savoir le bœuf, le cheval et le cerf. La graisse de bœuf que nous avons à notre disposition, issue de la poitrine, a été obtenue auprès d'un boucher et provenait d'élevages modernes où les bêtes sont élevées en bâtiment et nourries au moins une partie de l'année au fourrage. Il s'agit d'animaux particulièrement gras, au mode de vie assez éloignés de celui des bovidés du Paléolithique. La graisse de cheval, issue des flancs, a également été obtenue auprès d'un boucher et provenait d'élevages où les bêtes sont élevées en plein air à la belle saison mais enfermées l'hiver, bien que nourries au foin. Enfin, la graisse de cerf, récupérée autour des rognons, provenait de cerfs sauvages chassés pendant l'automne et le début de l'hiver en Dordogne.

Nous avons décidé de ne pas utiliser de suif de bœuf ni d'autre graisse issue de la fonte d'une graisse brute, car nous n'avons aucune preuve que ce procédé existait au Paléolithique supérieur, encore moins qu'il ait été utilisé.

En contexte Inuit, c'est l'huile de phoque qui est majoritairement utilisée, ainsi que la graisse de caribou en l'absence de phoques (Eugène Morin, comm. pers.). Nous avons volontairement

écarté l'huile de phoque car elle est aujourd'hui difficilement accessible et n'était peut-être pas disponible pour les groupes paléolithiques éloignés du littoral.

L'ensemble des mèches et des graisses ont été découpées à l'aide d'une lame (un couteau moderne ou un éclat de silex ; Figure 60).



Figure 60 : Découpe de graisse de bœuf à l'aide d'un éclat de silex, (à gauche, cl. C. Ferrier) et de graisse de cheval avec un couteau (à droite, cl. A. Jouteau).

d) Creusement des cuvettes¹⁵

Afin que les cuvettes soient standardisées, nous avons choisi de les réaliser selon les dimensions moyennes des cuvettes paléolithiques (d'après les mesures issues des travaux de de Beaune, 1983), soit environ 7 cm de diamètre, entre 1 et 2 cm de profondeur et d'une contenance moyenne de 30 ml (Figure 61, Tableau 5). Les traces laissées sur les objets paléolithiques permettent de savoir que les cuvettes ont le plus souvent été creusées par piquetage (de Beaune, 1983). Nous avons donc décidé d'utiliser des galets naturellement appointés (Figure 52) pour piquer la surface du calcaire jusqu'à former une cuvette (Figure 62). Les galets disposent de

¹⁵ Nous avons fait le choix de ne pas reproduire de lampe plate, car si le procédé utilisé est le même alors on observe une grande perte de graisse. Ces lampes ont donc pu être utilisées de manière beaucoup plus ponctuelle : cela est parfois le cas chez les Inuits (cf. de Beaune, 1983) et expliquerait la quantité importante de lampes plates abandonnées à Lascaux (il ne s'agissait peut-être pas d'objets réutilisés). Il pourrait également s'agir de luminaires au fonctionnement différent des lampes à cuvette. La question nécessiterait de plus amples recherches, et notre objectif n'est pas de nous montrer exhaustif dans les dispositifs testés, mais de proposer une reproduction de lampes pratiques et permettant d'obtenir un maximum de lumière.

nombreux avantages comparés aux outils en silex pour ce type de travaux : le maintien est facile et l'outil est lourd, ce qui permet un travail par piquetage simple et efficace. Comme le galet s'use très peu, il n'y a pas besoin de le retoucher et il ne risque pas de se casser. Il est possible à la fin du travail d'égaliser le fond de la cuvette par raclage à l'aide d'un outil en silex, mais cela ne contribue pas à améliorer le fonctionnement de la lampe. Nous avons ainsi confirmé une observation déjà réalisée par les expérimentations de Sophie de Beaune (1983) : la création d'une cuvette ne nécessite ni aptitude ni apprentissage particulier, et permet, en 40 à 90 minutes, selon la dureté du calcaire, d'obtenir une cuvette de dimensions moyennes à l'aide d'outils simples (Tableau 5).



Figure 61 : Ensemble des lampes creusées (cl. A. Jouteau).

Numéro	Origine	Longueur lampe (cm)	Largeur lampe (cm)	Épaisseur lampe (cm)	Longueur cuvette (cm)	Largeur cuvette (cm)	Profondeur cuvette (cm)	Volume cuvette (ml)	Durée taille (min)
1	Sondage	20	14	8,5	8,5	6	2	23	90
2	Sondage	22	13	7	6,5	6	1,5	24	48
3	Sondage	27	16	7,5	7	6	2	26	40
4	Abri sous roche	22	14	8	9	7	2	30	
5	Abri sous roche	26	17,5	12,5	8	7,5	1,7	50	60
6	Abri sous roche	23	12,5	10,5	7	5,5	1,5	25	50
7	Sondage	17,5	13	7	7,5	6,5	2,2	30	

Tableau 5 : Description des lampes fabriquées.



Figure 62 : Lampe n°1 après 5 minutes (a), 20 minutes (b), 30 minutes (c) et 90 minutes (d) de taille (cl. A. Jouteau).

e) Procédé d'allumage et d'entretien

Une lampe à huile, contrairement aux lampes à graisse, s'allume et s'entretient très facilement puisque le combustible est déjà sous forme liquide et peut donc remonter par capillarité le long de la mèche peu importe la chaleur dégagée par la flamme. La difficulté de gestion d'une lampe à graisse commence donc au démarrage de la lampe : la graisse étant froide, elle n'imbibe pas la mèche qui se consume avant d'avoir pu produire suffisamment de chaleur pour que la graisse commence à fondre, et ce, quelle que soit l'origine de la graisse (bœuf, cheval, cerf). Plusieurs méthodes d'allumage ont été proposées dans différents travaux, toujours en précisant qu'il s'agit du moment le plus délicat. Nous avons opté pour une méthode qui nous a paru à la fois simple à mettre en œuvre et sûre d'utilisation (Figure 63) : une dizaine de grammes de graisse sont déposés au fond de la cuvette (Figure 63-a) puis recouverts de brins incandescents (de genévrier ou de pin sylvestre ; Figure 63-b-c). Régulièrement les charbons produits doivent être enlevés et de nouveaux brins être ajoutés. Les brins en bois résineux sont plus efficaces car complètement autonomes dans leur combustion, les brins de genévrier (ou de feuillu)

nécessitant d'être surveillés, régulièrement penchés et retournés. Cette étape permet à la graisse de fondre et de créer une petite réserve d'huile. Lorsque l'ensemble a fondu, la mèche peut être placée au point le plus profond de la cuvette (Figure 63-d). Il faut attendre que la graisse fondue l'imbibe en remontant par capillarité, puis elle peut être enflammée (Figure 63-e). Cette phase dure quelques minutes (environ un quart d'heure) mais permet de s'assurer du bon démarrage de la lampe.

Une fois que le démarrage a réussi, il suffit d'ajouter de la graisse sur les bords de la cuvette au fur-et-à-mesure qu'elle se transforme en huile (Figure 63-f). La graisse doit être ajoutée en morceaux de petites dimensions afin d'optimiser sa fonte, que ce soit sous la forme de languettes régulièrement approchées de la flamme ou de petits morceaux régulièrement ajoutés. Il faut cependant faire attention à ne pas mettre la graisse directement en contact avec la flamme au risque de la faire carboniser, la rendant inutile. Une fois que le processus est lancé, la mèche a une durée de vie illimitée tant qu'elle est bien imbibée de graisse fondue. Nous n'avons pas remarqué, contrairement à nos prédécesseurs (de Beaune, 1983 et Delluc et Delluc, 1979a), la nécessité de vidanger la graisse fondue : si la graisse est ajoutée au fur et à mesure que l'huile se consume, on obtient un niveau de graisse fondue constant, ce qui permet à la fois de ne pas perdre de graisse et d'utiliser des lampes complètement fermées.

Nous avons essayé de faire préchauffer la lampe pour accélérer le processus de démarrage. Dans un premier temps en la plaçant côté cuvette contre un foyer et dans un second temps en faisant brûler du bois au-dessus de la cuvette, sans graisse à l'intérieur. Cela n'aboutit pas car le fait que la surface soit chaude ne permet qu'à une toute petite partie de la graisse initiale de fondre et il est tout de même nécessaire d'apporter du bois enflammé pour faire fondre le reste. Finalement, il ne semble pas qu'il y ait de gain de temps ou de matériaux puisque l'étape de fonte de la première graisse n'est que très peu réduite et que cela nécessite une étape de préchauffe qui prend également du temps et des ressources en bois. Il est cependant possible de faire fondre de la graisse dans un récipient à proximité d'un foyer puis de la verser dans une lampe ou encore d'utiliser des graisses déjà liquides, comme de l'huile de phoque ou de l'huile de pied de bœuf.

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

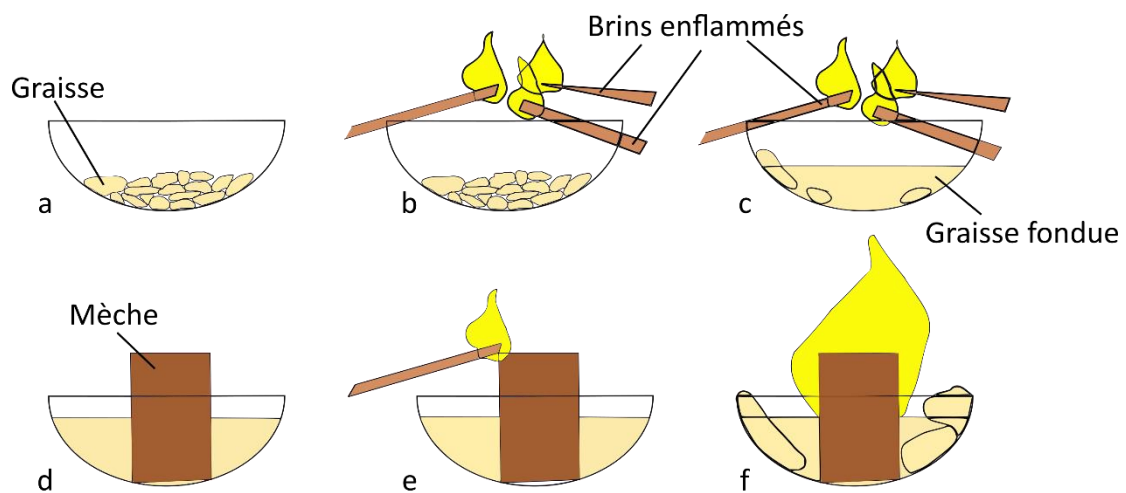


Figure 63 : Mise en place de la graisse dans la cuvette (a), Brins enflammés mis à proximité (b et c), mèche placée dans l'huile fondue (d), inflammation de la mèche (e) et mèche fonctionnelle alimentée en graisse (f), cl. A. Jouteau.

f) *Comparaison et sélection des mèches pour les mesures*

Méthode

Afin de sélectionner parmi les sept types de mèches récoltées celles qui seront utilisées dans les lampes mesurées, nous avons incorporé chacune de ces mèches, selon des dimensions semblables, dans une lampe avec 50 ml d'huile végétale (mélange d'huile de colza et de tournesol). Nous avons choisi dans un premier temps d'utiliser de l'huile végétale, car comme elle est déjà liquide, elle permet de s'affranchir de la difficulté de l'allumage. Ensuite, nous avons réalisé des observations concernant la hauteur de flamme produite au bout de 30 minutes de fonctionnement, la hauteur de flamme maximale et la durée de la combustion (Tableau 6, Figure 64).

Résultats

À la suite de ces tests, quatre mèches ont semblé produire des flammes plus importantes que les autres (Tableau 6, Figure 64) : le morceau de pin maritime mort, la mousse, l'épiphyse de bœuf et l'amadou. Il faut cependant mettre un bémol concernant la mousse car la flamme démarre très lentement et n'atteint 10 cm de hauteur qu'au bout de près d'une heure de fonctionnement. De manière générale, on observe que la durée de la combustion est directement liée à la puissance de flamme produite : plus on obtient une flamme haute rapidement, et plus le niveau d'huile baisse rapidement, conduisant à une extinction plus rapide de la lampe.

Numéro	Nature mèche	Dimensions (cm)	Hauteur de flamme à 30 min (cm)	Hauteur maximale de flamme (cm)	Durée (min)
1M	Aubier de pin maritime mort	2,5*2,5*1,5	10	10	56
2M	Lichen	Diamètre 2,5	1	3	161
3M	Mousse	Diamètre 2,5	1	10	127
4M	Braise de pin sylvestre	2,5*2*1,5	1	5	157
5M	Braise de châtaignier	2,5*2*1,5	5	5	102
6M	Épiphyse de bœuf carbonisée	3*3*1,5	5	9	70
7M	Amadou	2,5*2*1,5	10	10	53

Tableau 6 : Hauteurs de flamme et durée de la combustion pour chaque mèche.

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation



Figure 64 : Hauteurs maximales des flammes produites par différentes mèches naturelles (cl. A. Jouteau, C. Ferrier).

Ces mèches ont de nouveau été testées dans les mêmes conditions afin de s'assurer de la reproductivité des résultats (Tableau 7).

Numéro	Nature mèche	Dimension s (cm)	Hauteur de flamme à 30 min (cm)	Hauteur maximale de flamme (cm)	Durée (min)
8M	Amadouvier	2,5*2,5*2,5	10	10	46
9M	Aubier pin maritime mort	2*2*1,5	10	10	88
10M	Mousse	Diamètre 2,5	4	10	135
11M	Epiphyse de bœuf carbonisée	2*1,5*1	1.5	1.5	180

Tableau 7 : Reproduction des quatre mèches ayant donné les flammes les plus hautes.

Cette seconde série d'expériences montre que seul l'amadouvier et l'aubier de pin ont une hauteur de flamme constante puisque la mousse a de nouveau atteint sa hauteur maximale de flamme au bout de $\frac{3}{4}$ h environ, et l'épiphyse de bœuf n'a pas donné de résultats concluants. Pour la mousse, cela semble s'expliquer par le fait qu'il faut attendre longtemps pour qu'elle soit suffisamment imbibée d'huile pour fonctionner correctement. Pour l'os spongieux carbonisé, cela peut s'expliquer par la présence de nombreux paramètres intervenant dans l'organisation de sa porosité : espèce dont il est originaire, degré de carbonisation, os dont il est originaire, partie de l'os, âge de l'animal, etc.

Conclusion

Les braises et le lichen n'ont pas permis d'obtenir de bonnes mèches et ont donc été retirés de la suite de l'étude. Cependant de nombreuses espèces de lichens existent, avec des aspects et probablement des qualités de mèche différentes. Il serait donc aussi intéressant, si l'on souhaitait pousser l'étude, de tester d'autres espèces de lichen.

La mousse et l'épiphyse ont parfois permis d'obtenir de très bonnes flammes, mais pas de façon répétable, elles ont donc également été écartées de la suite de l'étude. Il s'agit probablement d'un problème de préparation ou de choix de l'espèce utilisée pour la mousse et d'une grande variabilité de l'organisation des pores pour l'épiphyse (y-a-t-il des parties de l'os ou de l'animal qui produisent une meilleure flamme que d'autres ?).

Nous avons donc décidé, pour ces premières mesures, de ne conserver que les mèches composées d'un morceau d'aubier de pin mort et d'un morceau d'amadouvier, puisque ces deux mèches produisent une flamme de dimensions proches (environ 10 centimètres de hauteur) et ce de manière reproductible avec notre protocole d'allumage.

g) Dimensions des mèches

Méthode

Afin de calibrer la dimension des mèches pour qu'elles soient les plus efficaces possible, et de vérifier l'efficacité de ces mèches avec de la graisse animale, une troisième série de tests sur les mèches a été réalisée à l'aide de 30 g de graisse de cheval et des mèches de dimensions variables (Tableau 8). Nous avons observé la hauteur maximale de la flamme produite ainsi que la durée de la combustion.

Résultats

Numéro	Nature de la mèche	Dimensions de la mèche (cm)	Forme de la mèche	Hauteur maximale de flamme (cm)	Durée (min)	Largeur de la flamme
12M	Amadouvier	2*2*2	cube	12	60	Large
13M	Amadouvier	2.5*2*1.5	pavé vertical	15	48	Large
14M	Amadouvier	2.5*2*1.5	pavé horizontal	12	65	Large
15M	Amadouvier	2.5*1*1	pavé étroit vertical	6	82	Fine
16M	Aubier pin maritime mort	2*2*2	cube	12	67	Large
17M	Aubier pin maritime mort	2.5*2*1.5	pavé vertical	12	63	Large
18M	Aubier pin maritime mort	2.5*2*1.5	pavé horizontal	10	62	Large
19M	Aubier pin maritime mort	2.5*1*1	pavé étroit vertical	10	86	Fine

Tableau 8 : Hauteur maximale de flamme produite et durée de la combustion en fonction de la nature et des dimensions de la mèche utilisée.

Ce test permet de confirmer l'influence de la dimension et de la forme de la mèche sur la hauteur de flamme (Figure 65) : les plus petites mèches produisent moins de flamme, tandis que la disposition de la mèche en pavé vertical produit une flamme plus haute que dans le cas du pavé horizontal ou du cube. D'autre part, aucune différence évidente n'a été soulevée entre les mèches en Amadou ou en aubier de pin maritime.

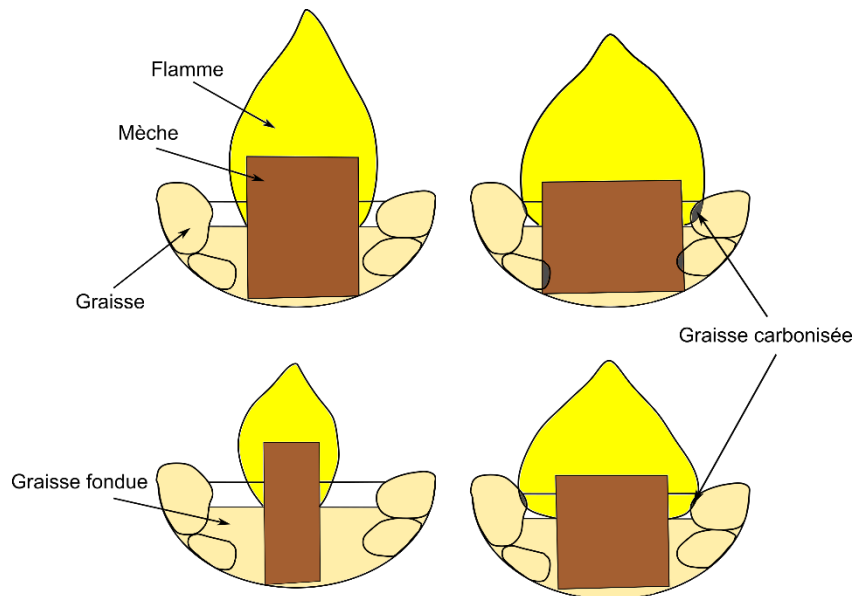


Figure 65 : Influence de la taille et de la forme de la mèche sur la production de flamme.

Conclusion

Nous avons choisi de découper les mèches en pavé de 2,5*2*1,5 cm et de les poser verticalement. En effet, en émettant une flamme plus haute, cela permet à la mèche de laisser de la place à une réserve d'huile plus importante que dans le cas du cube ou du pavé horizontal (Figure 65).

Nous devons souligner que les observations précédentes pourraient être affinées à l'aide d'une étude statistique réalisée sur un nombre plus important de lampes.

h) Comparaison et sélection des graisses pour les mesures

De même que des expérimentations ont été réalisées sur les mèches récoltées afin de ne sélectionner, pour les mesures, que celles qui permettaient d'obtenir la source de lumière la plus importante, les trois types de graisse ont également été testées. La graisse de bœuf (Figure 66) est blanche, assez solide et se découpe facilement en cubes ou en tranches. La graisse de cheval (Figure 66), très jaune, très huileuse et assez molle est plus difficile à découper. La graisse de cerf (Figure 66) est blanche légèrement rosée, assez filandreuse et très sèche. Elle se découpe facilement mais comme elle est issue d'animaux sauvages maigres, elle contient de la viande qu'il faut séparer de la graisse avant utilisation.

Méthode

30 g de chacune des graisses ont été incorporées dans des lampes, associées à une mèche en amadou ou en aubier de pin maritime de dimensions calibrées (pavé vertical de 2,5*2*1,5 cm ; Figure 66, Tableau 9).

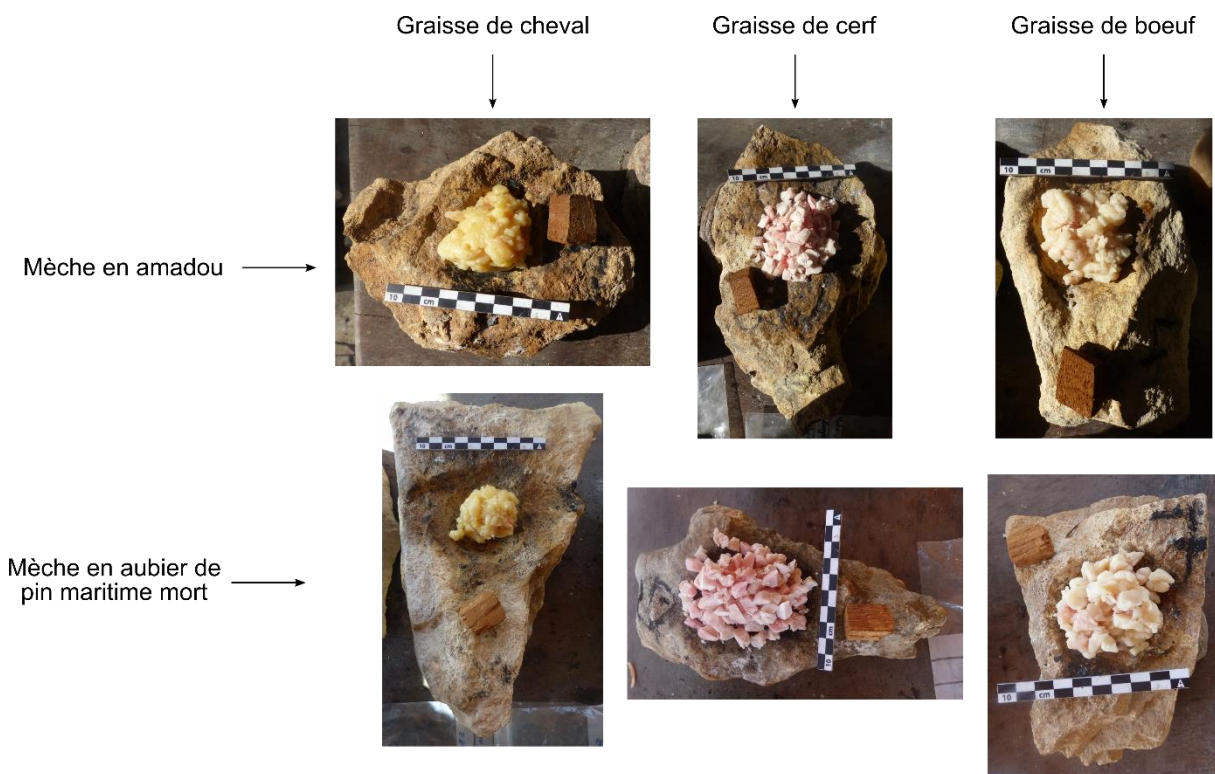


Figure 66 : Graisses et mèches utilisées lors de la comparaison des différentes graisses (cl. A. Jouteau).

Résultats

Malgré leurs aspects différents, la nature de la graisse ne semble pas impacter la dimension de la flamme produite et paraît avoir une faible influence sur la durée de la combustion, bien que les durées de fonctionnement soient légèrement supérieures avec la graisse de cheval. Cela doit toutefois être nuancé par le petit nombre de tests réalisés et par la présence d'un autre facteur : les dimensions de la cuvette. En effet, nous avons observé que plus la cuvette est étroite et plus la graisse est proche de la flamme, avec un risque de carboniser et d'être alors inutilisable. Il semble que les lampes les plus larges et les moins profondes soient les plus efficaces pour ce type d'organisation de lampe à graisse. On observe sur cet échantillon, graisses et mèches confondues, une moyenne de 64 minutes de fonctionnement pour 30 g de graisse (Tableau 9).

Enfin, cette expérience nous a permis de confirmer que les deux types de mèches sont efficaces avec la graisse.

Numéro	Nature graisse	Nature mèche	Hauteur maximale de flamme (cm)	Durée (min)
1 G	Cheval	Amadouvier	10	75
2 G	Cerf	Amadouvier	10	55
3 G	Bœuf	Amadouvier	10	61
4 G	Cheval	Aubier en décomposition	10	74
5 G	Cerf	Aubier en décomposition	10	70
6 G	Bœuf	Aubier en décomposition	10	51

Tableau 9 : Hauteur de flamme et durée de la combustion en fonction de la graisse et de la mèche utilisées.

Conclusion

Les résultats étant très proches pour les trois graisses, nous avons décidé qu'elles seraient toutes incorporées aux lampes mesurées, afin de vérifier si la graisse a une influence sur le spectre et l'éclairage.

i) Présentation des lampes mesurées

Les expérimentations précédentes ont permis de sélectionner six types de lampes à mesurer, associant : amadou et graisse de cheval, amadou et graisse de cerf, amadou et graisse de bœuf, pin et graisse de cheval, pin et graisse de cerf, et pin et graisse de bœuf.

j) Discussion

Notre protocole a permis d'affiner un peu les processus de préparation et d'utilisation proposés lors d'expérimentations antérieures (Delluc et Delluc, 1979a ; Aubourg, 1983 ; de Beaune, 1983 ; Rigaud, 2000). En particulier, en proposant un apport progressif de petits morceaux de graisse, nous n'avons pas observé de difficultés liées à un niveau d'huile trop haut (Delluc et Delluc, 1979a ; de Beaune, 1983), et la vidange des lampes n'a donc pas été nécessaire. Cette

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

méthode permet ainsi aux lampes à cuvettes fermées comme le « brûloir » de Lascaux de fonctionner sans difficulté. L'allumage des lampes reste la partie la plus délicate du procédé, mais plus que difficile, elle nécessite de la patience. Nous avons essayé sans succès de préchauffer les lampes pour que la graisse fonde plus vite. Nous pensons qu'il serait possible d'accélérer le processus en débutant avec une huile déjà liquide, comme l'huile de poisson, de phoque, ou encore l'huile de pied de bœuf ou de cheval, disponible en faible quantité sur les carcasses, mais qui pourrait être suffisante pour cette phase d'allumage. Il est également possible de préparer la graisse afin de la rendre liquide (de Beaune, 1987a).

Nous n'avons pas testé de suifs, ce procédé n'étant pas obligatoire ni attesté au Paléolithique, mais des trois graisses que nous avons testées, et malgré leurs apparences différentes, aucune ne semble plus efficace qu'une autre. La nature et la préparation de la mèche semble être un facteur bien plus déterminant dans la production de flamme. Nos observations rejoignent celles de B. et G. Delluc et d'A. Aubourg (*op. cit.*) : l'amadou et le bois mort (ici de pin) semblent être des mèches particulièrement efficaces, même avec une préparation minimale. Les expérimentations précédentes montraient des contradictions concernant la production de flamme avec des mèches en lichens, mousses, et en os, or nos expérimentations montrent également une grande variabilité avec ces mèches. Concernant les mèches en os, cela peut être dû aux nombreux facteurs entrant en jeu (espèce animale, âge de l'animal, os en question, partie de l'os, dimensions de l'os, etc.), tandis que la variabilité de la mousse peut être expliquée par sa diversité phylogénétique et la nécessité de la préparer au préalable (Hough, 1896, 1898 ; de Beaune, 1987a). Il faut enfin noter que les Préhistoriques avaient à leur disposition des graisses d'animaux aujourd'hui disparus ou dont le mode de vie s'est profondément modifié, ainsi que des mèches de nature et de préparation différente des nôtres. En effet, nos expérimentations ne sont pas des reproductions fidèles de lampes à graisse du Paléolithique récent, mais plutôt une proposition de protocole permettant d'observer une part de la variabilité des éclairages possibles.

Enfin, nous souhaitons mentionner l'absence de rubéfaction produite sur les lampes, alors qu'il s'agit d'un marqueur important de la reconnaissance des lampes préhistoriques. De nombreux paramètres interviennent lors de la potentielle rubéfaction : nature des éléments chimiques présents dans le calcaire, présence d'oxydes de fer, état d'hydratation, intensité de la chauffe, durée de la chauffe, conductivité thermique de la pierre, etc. Nous pouvons avancer plusieurs hypothèses pour expliquer cette différence :

- De par sa nature, le calcaire que nous avons à notre disposition ne pouvait pas rubéfier (cette hypothèse semble peu probable dans notre cas précis car nous avons utilisé des calcaires issus du site de Cussac, où les lampes paléolithiques retrouvées sont rubéfiées),
- Les lampes paléolithiques fonctionnaient plus longtemps que les nôtres (nous n'avons jamais dépassé 2 heures de fonctionnement d'affilée) ou de façon plus répétée (chacune de nos lampes a fonctionné environ 5 fois).
- Leur fonctionnement était différent, la position et la nature de la graisse, et le nombre et les dimensions de la mèche pouvant avoir été différente.
- Les lampes préhistoriques découvertes ont pu avoir plusieurs utilités, également liées à la chauffe, par exemple : délimitation d'un foyer, préparation de colorants, obtention de charbon.

2. Protocole de fabrication des torches

Afin de choisir comment confectionner les torches à mesurer, nous avons procédé en plusieurs étapes :

- Recherches bibliographiques,
- Récolte des matières premières,
- Mise en place des modalités générales de fabrication,
- Choix des dimensions des brins,
- Choix des dimensions des torches,
- Présentation des torches mesurées.

a) *Revue de la littérature*

Vestiges archéologiques

Les vestiges archéologiques de torches sont beaucoup plus discrets que ceux des lampes puisqu'il s'agit de fragments de charbons contenus dans le niveau archéologique ou maintenus sur les parois et de mouchages de torches (Figure 67), c'est-à-dire des traces charbonneuses présentes sur les parois dû au frottement de la torche, qu'il soit intentionnel (pour raviver la flamme par exemple) ou accidentel. Ces traces, bien que ténues, ont pourtant permis des

analyses pour identifier l'essence végétale impliquée. Deux espèces semblent majoritaires (mais non exhaustives) : le pin (par exemple à Chauvet, Théry-Parisot et Thiébault, 2005 ; Théry-Parisot *et al.*, 2018, à Cosquer, Clottes *et al.*, 2005 ou à la Cueva de Nerja, Medina-Alcaide *et al.*, 2015) et le genévrier (p. ex. à Cussac, Jaubert *et al.*, 2017).

Aucun fragment de plusieurs centimètres de long n'a été découvert jusqu'à présent en contexte Paléolithique (il existe à la grotte Chauvet des empreintes de morceaux de bois et de brindilles dans les salles profondes de quelques centimètres de longueur dont l'essence n'a pas pu être identifiée), ce qui nous empêche de connaître les dimensions des brins utilisés, mais des fragments issus de torches ont été retrouvés dans des contextes karstiques plus récents : un fragment de bois de 11,5 cm de long et large de deux centimètres, brûlé à son extrémité, a été découvert dans la grotte de Niaux, probablement déposé lors d'une incursion des lieux au Néolithique (Clottes et Simonnet, 1972). D'autres fragments de bois de 10 à 20 cm de long ont été retrouvés dans des mines protohistoriques (mines d'El Aramo dans les Asturies, Blas Cortina, 2005 ; mines de sel de Hallstatt, Barth, 1980). Ces brins semblent issus de torches très simples composées de brins de bois assemblés ensemble et enflammés. Cette méthode étant extrêmement simple et ne nécessitant pas d'outils particuliers, ils peuvent donner un premier aperçu du mode de fonctionnement des torches paléolithiques.

À Cussac, de très nombreux mouchages ont été repérés et enregistrés (Figure 67c-d), mais seuls deux charbons ont été identifiés à ce jour, la détermination indiquant qu'il s'agit probablement de genévrier dans les deux cas (Figure 67a-b , Jaubert *et al.*, 2017). Notons que les tracés multiples de certains mouchages à Cussac pourraient attester de cette composition en brins assemblés.

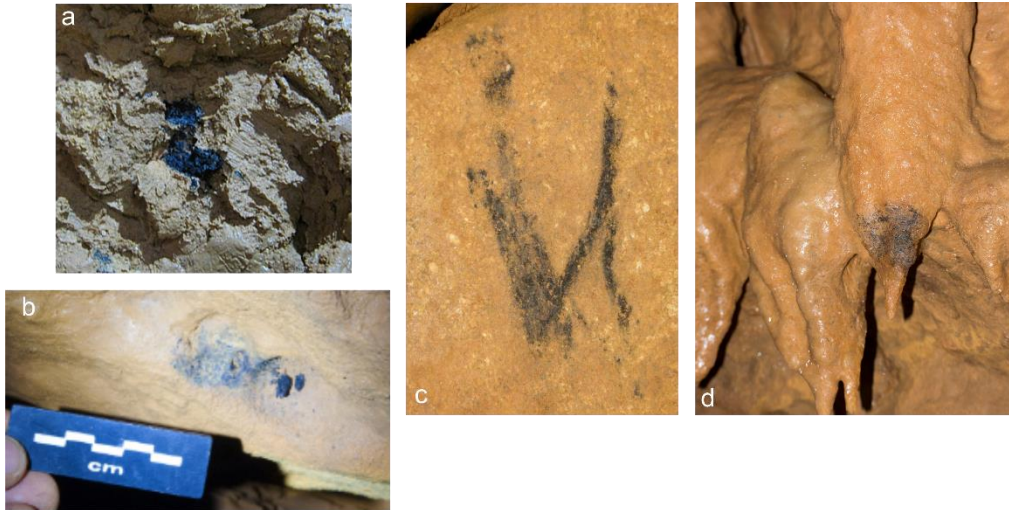


Figure 67 : Exemples de résidus charbonneux découverts à Cussac. a) Charbon situé au sol, à l'aplomb d'un mouchage en paroi, prélevé en janvier 2013 par l'équipe TrAc's. b) Mouchage de torche avec résidus charbonneux suspendus (cl. N. Fourment). c) Trace charbonneuse sur bloc calcaire (cl. M. Peyroux). d) Mouchage sur stalagmite (cl. F. Maksud).

À Lascaux, il est admis que le niveau paléolithique était riche en charbons (Glory, 1965 ; Leroi-Gourhan *et al.*, 1979). Des analyses anthracologiques ont été réalisées sur des charbons prélevés dans le Diverticule Axial, le Passage et le Puits. Les résultats montrent des essences beaucoup plus variées que ce qui est habituellement présent dans les sites paléolithiques et renvoient à un environnement plutôt tempéré : le genévrier et le chêne dominant, mais on a aussi déterminé du sapin, du noisetier, du pin maritime, du saule, du bouleau, de l'aune et du châtaignier. Cela indiquerait soit un mélange avec des charbons provenant de périodes plus récentes et apportés par ruissellement, soit que la fréquentation préhistorique de Lascaux s'inscrit dans une période plutôt tempérée. L'importante quantité de bois retrouvée dans le paléosol de toutes les galeries (Glory, 1965), « sortes de copeaux longs de 8 à 12 cm et larges de 1 à 2 cm (manches à outils, échafaudages). » pourrait aussi indiquer la présence de torches ou de foyers au sol, les dimensions des brins étant plus cohérentes avec la première hypothèse (présence de torches).

Expérimentations

Les traces laissées par les torches étant beaucoup plus discrètes, elles ont également été moins étudiées par le passé, leur enregistrement systématique n'étant réalisé que depuis quelques décennies. Cela a inévitablement impacté notre connaissance sur ces luminaires puisque seules trois expérimentations ont été menées à ce jour à notre connaissance (Malvesin-Fabre et

Parriaud, 1955 ; Aubourg, 1983 ; Galant *et al.*, 2007). Les derniers travaux (Galant *et al.*, 2007), ont eu lieu dans le contexte de l'étude de la grotte d'Aldène (Hérault), où seul du genévrier a été retrouvé (l'occupation de la cavité est estimée mésolithique et s'inscrit donc dans un environnement tempéré). Les torches ont donc été confectionnées à l'aide de brins de genévrier d'environ 70 cm de long. Elles produisent un éclairage sur quatre à six mètres de rayons pendant 30 à 45 minutes (Galant *et al.*, 2007). L'étude de Malvesin-Fabre et Parriaud (1955) indiquait déjà par ailleurs que l'essence de genévrier brûle mieux (plus complètement et sans fumée) que le pin. Lors de l'expérimentation réalisée en 1983, l'auteur testa deux types de torches. Les premières, réalisées à partir de l'écorce de bouleau nécessitent d'être régulièrement réalimentées (un mètre carré d'écorce fonctionne pendant environ une heure mais doit être réalimentée toutes les cinq minutes). Les secondes, de 5 cm de diamètre, ont été fabriquées à partir de fragments de pins ou de sapins d'environ 60 cm de long et ont produit une flamme d'environ 30 cm pendant environ une demi-heure (Aubourg, 1983).

L'absence de mesures de spectre ou d'éclairement, ainsi que l'absence de pin sylvestre dans les expérimentations précédentes nous ont amené à proposer un protocole d'élaboration de torches permettant de sélectionner les essences et les dimensions des brins permettant le meilleur équilibre entre éclairage puissant, longue durée de combustion et bonne maniabilité (la torche doit pouvoir être tenue à une main). Suite à ces expérimentations, le spectre et l'éclairement des torches considérées comme les plus efficaces ont été mesurés.

b) Choix et récolte des matières premières

La plupart des mouchages et charbons retrouvés jusqu'à présent en contexte paléolithique sont constitués de pin (sylvestre ou noir) ou de genévrier, c'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser ces deux essences pour nos reproductions de torches paléolithiques. Afin d'en déterminer le fonctionnement minimal, nous avons choisi d'ajouter le moins d'artifice possible, soit uniquement de l'osier pour faire un ou des liens si nécessaires. L'osier est plutôt associé à un environnement tempéré, mais de nombreuses autres fibres végétales souples peuvent être utilisées comme lien. Comme pour les lampes, nous avons utilisé au maximum des outils simples, disponibles au Paléolithique supérieur, bien que des haches voire une tronçonneuse aient été utilisées pour accélérer le travail.

L'intérêt du pin (ici du *Pinus sylvestris* ; Figure 68) réside dans le fait qu'il s'agit d'un **résineux**. La résine, transportée par les canaux résinifères de ces conifères, est un liquide collant et très inflammable. Le bois de résineux, lorsqu'il est riche en résine (on parle alors de « bois gras ») s'enflamme à plus faible température que d'autres bois, et le feu s'auto entretient facilement. Il était encore utilisé jusqu'au début du XX^{ème} siècle pour éclairer les maisons sous le nom de « tède » dans le sud-ouest français (Gascogne, Pyrénées). Si des processus d'extraction plus ou moins complexes existent pour optimiser la production de résine, celle-ci se trouve naturellement dans les branches et les racines, en particulier près des nœuds ou des blessures. Les branches ne sont pas très épaisses et peuvent tout à fait être récupérées à la main en cassant les branches les plus basses. Le pin sylvestre s'élaguant naturellement, il est également possible de ramasser des branches mortes tombées qui sont encore riches en résine. Enfin, il est possible de se procurer du bois gras via les racines exhumées dans un chablis.



Figure 68 : a) *Pin sylvestre* (cl. A. Jouteau), b) *nœud riche en résine* (cl. J. C. Leblanc), c) *tas de branches utilisées pour les expérimentations* (cl. J. C. Leblanc).

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

Le bois de genévrier (*Juniperus communis* ; Figure 69), s'il est très inflammable, n'est pas un résineux et ne bénéficie donc pas des avantages liés à la présence de résine dans le bois. Cependant, son utilisation en tant que torche est attestée par la présence de charbons de genévrier dans des mouchages de torches préhistoriques, c'est pourquoi nous l'avons également utilisé. Le genévrier étant un arbuste, ses branches sont toujours à hauteur d'homme et accessibles à la main, mais elles sont recouvertes d'épines (Figure 69a). Il existe alors deux moyens de s'en procurer : en se protégeant les mains par le port de gants épais ou en ne recherchant que des branches dont les épines ont été consommées par des herbivores (Figure 69c). Dans les deux cas, les branches sont peu épaisses mais le bois est particulièrement dur, nous avons donc entaillé la branche à l'aide d'une lame (de couteau moderne) avant de la casser à la main.



Figure 69 : a) Baies et épines de genévrier, b) Buisson de genévrier, c) branche dont les épines ont été consommées par des herbivores (cl. ; A. Jouteau, L. Jouteau).

Afin d'optimiser sa combustion, le bois a été séché pendant quelques mois dans un endroit aéré. Il est possible de raccourcir la durée nécessaire au séchage du bois, en préparant les brins pour avant la période de séchage. De plus, le bois frais est plus facile à travailler que le bois sec.

c) *Modalités générales de fabrication*

Nous avons décidé de fabriquer des torches le plus simplement possible, en suivant l'expérimentation menée par P. Galant (Galant *et al.*, 2007) qui a réussi, uniquement en associant des brins, sans ajouter de graisse ou de résine, à former une torche. Pour cela nous avons décidé de ficher des brins attachés entre eux par des liens végétaux en osier dans un manche constitué d'une branche de pin sylvestre fendue (Figure 70) afin de permettre un meilleur maintien.

Le bois n'ayant pas toujours été débité frais, il a fallu le débiter sec. Il s'agit alors d'un procédé plus difficile et nous nous sommes pour cela aidée d'outils modernes : haches et scies à bois sur les branches les plus épaisses, et couteau pour les plus fines, bien que sur du bois frais un simple coin avec un perceur aurait permis de débiter le bois, puisque les branches sont assez fines (quelques centimètres de diamètre maximum).

Nous avons observé que la fabrication des torches, à travers le travail du bois, nécessite davantage de force musculaire que celle des lampes à graisse, ainsi que plus de temps. De plus, elle nécessite un peu plus d'entraînement afin de correctement disposer les brins : ceux-ci ne doivent être ni trop ni pas assez espacés entre eux et pouvoir tenir seuls, le lien n'étant qu'une sécurité (les brins ne doivent pas tomber lorsque le lien s'enflamme).

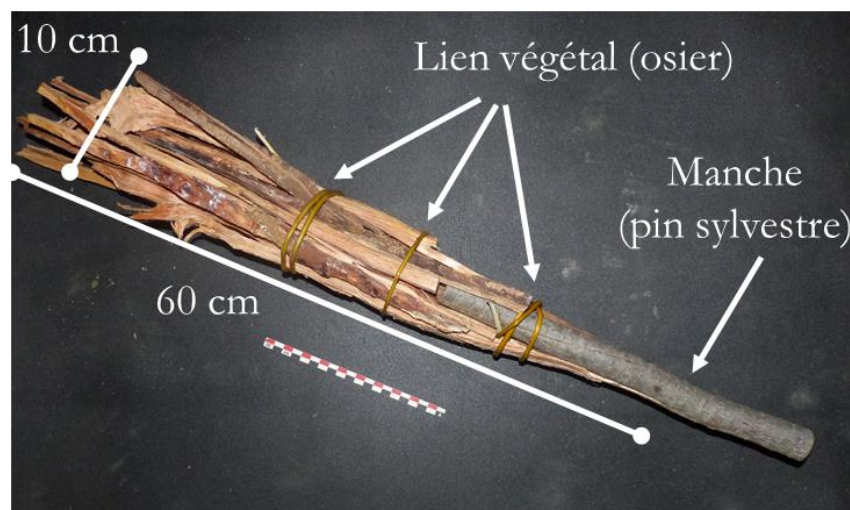
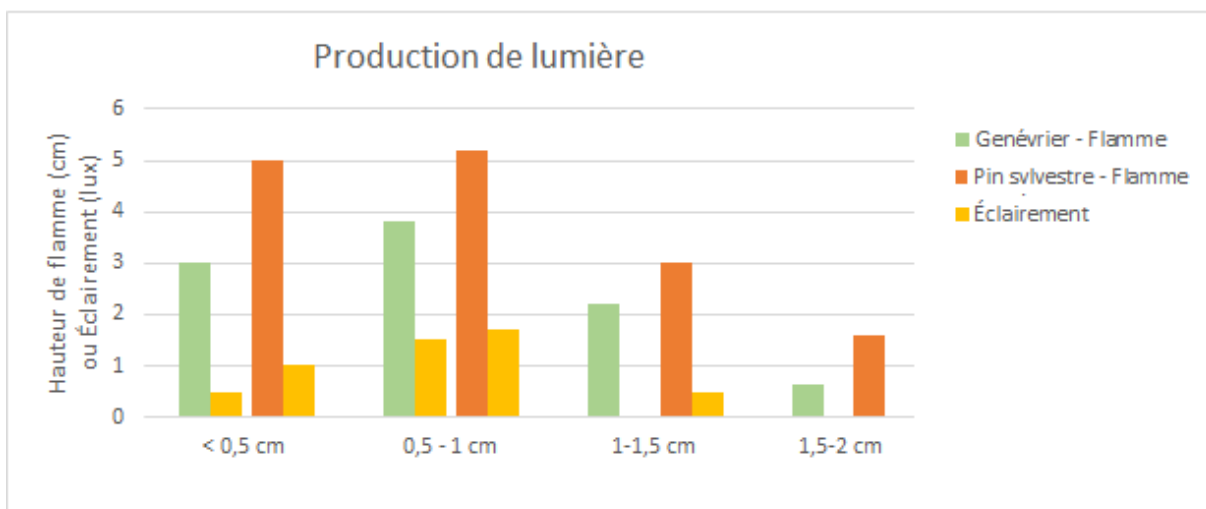


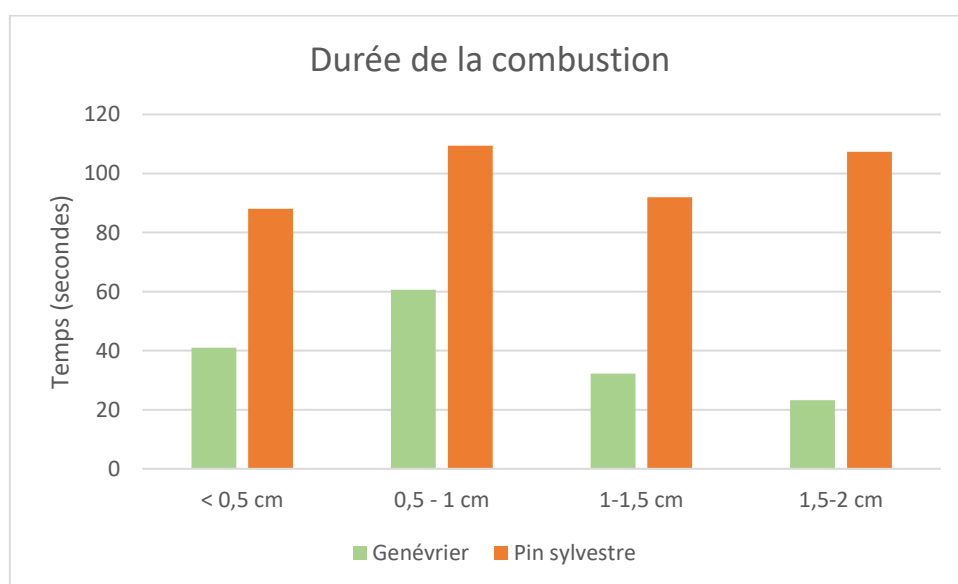
Figure 70 : Exemple de torche réalisée avec des branches en pin sylvestre (cl. C. Ferrier).

d) Dimension des brins

Nous avons par la suite testé la combustion individuelle de brins de différents diamètres maximums, de 0,5 à 2 cm. Chaque calibre de brin a été testé au moins trois fois. Les graphiques ci-dessous montrent la durée de la combustion (Graphique 7) et la production de lumière (Graphique 6) moyennée pour les différentes dimensions de brins de genévrier et de pin sylvestre (l'ensemble des données est disponible en Annexe 1).



Graphique 6 : Production de lumière (en lux ou en hauteur de flamme) en fonction de la nature et du diamètre des brins.



Graphique 7 : Durée de la combustion en fonction de la nature et du diamètre des brins.

Ces graphiques montrent tout d'abord que l'éclairage est positivement corrélé à la production de flamme, et que le calibre optimal semble être situé entre 0,5 et 1 cm de diamètre pour le pin sylvestre comme pour le genévrier. Cependant, quel que soit le diamètre maximum du brin, le pin sylvestre semble toujours produire un éclairage plus puissant que le genévrier (Graphique 6). À cela s'ajoute une durée de combustion plus faible dans le cas des brins de genévrier (Graphique 7). Nous avons également pu remarquer que le genévrier est plus difficile à enflammer, en effet dans le pin sylvestre, la présence de résine permet une mise en combustion très rapide et d'entretenir la flamme plus longtemps.

e) Dimension des torches

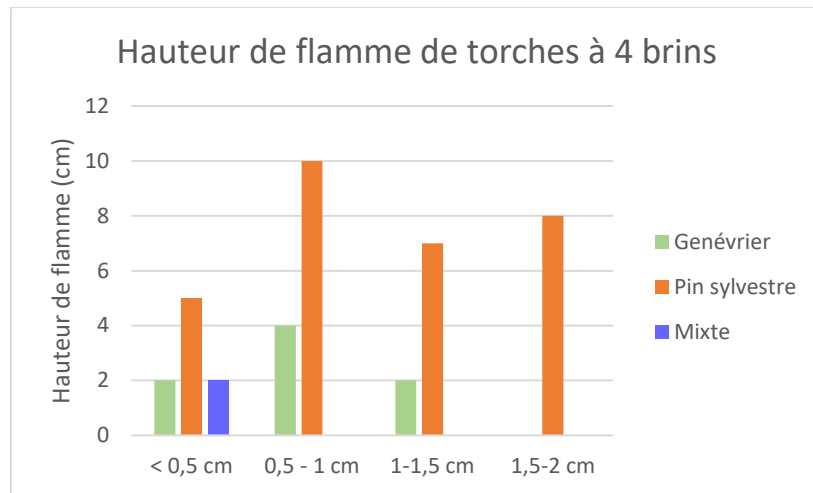
Par la suite, nous avons réalisé des torches avec des brins de différents calibres en pin sylvestre, en genévrier et des torches dites « mixtes », composées de pin sylvestre et de genévrier, (détail en Annexe 1) afin de répondre aux questions suivantes :

- Quel calibre de brins permet une production de lumière et une durée de combustion maximales ?
- Le pin sylvestre est-il plus adapté que le genévrier ? Qu'en est-il des torches constituées de pin et de genévrier ?
- Quelles sont les dimensions minimales et maximales d'une torche maniable ?

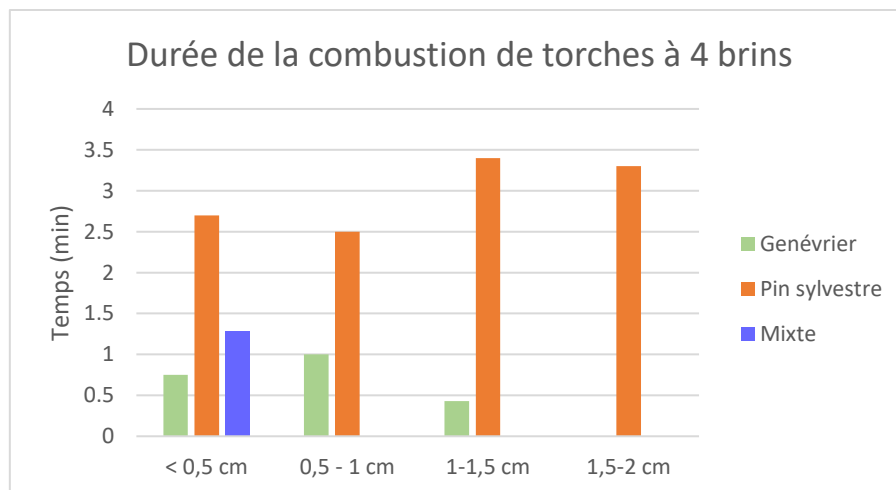
Torches à quatre brins

Dans un premier temps, nous avons comparé la production de flamme et la durée de combustion de petites torches constituées de quatre brins de divers calibres (Graphique 8, Graphique 9).

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation



Graphique 8 : Production de lumière (en hauteur de flamme) en fonction de la nature et du diamètre des brins dans des torches composées de quatre brins.

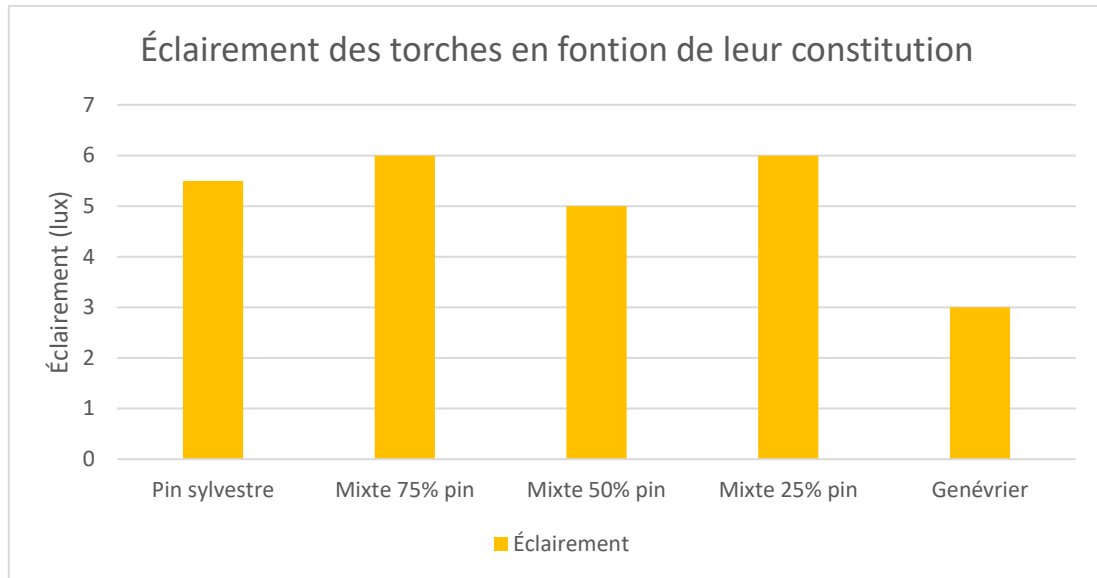


Graphique 9 : Durée de la combustion en fonction de la nature et du diamètre des brins dans des torches composées de quatre brins.

Ces premiers graphiques nous permettent de confirmer que le diamètre pour une production de lumière idéale semble être entre 0,5 et 1 centimètre. Pour des raisons de quantité limitée des brins de ce calibre, **dans la suite de nos expérimentations, nous allons utiliser des brins de diamètres entre 0,5 et 1,5 cm.** La durée de combustion semble par contre s'équilibrer entre les différents calibres de brins. Le pin semble permettre à la fois une production de lumière et une durée de combustion plus importante que le genévrier. Seule une torche mixte a été réalisée, et semble avoir des propriétés proches du genévrier ou intermédiaires.

Torches à 8 brins

Les torches suivantes ont été réalisées avec 8 brins, en pin sylvestre, genévrier, ou un mélange des deux, avec diverses proportions de chaque essence (Graphique 10).

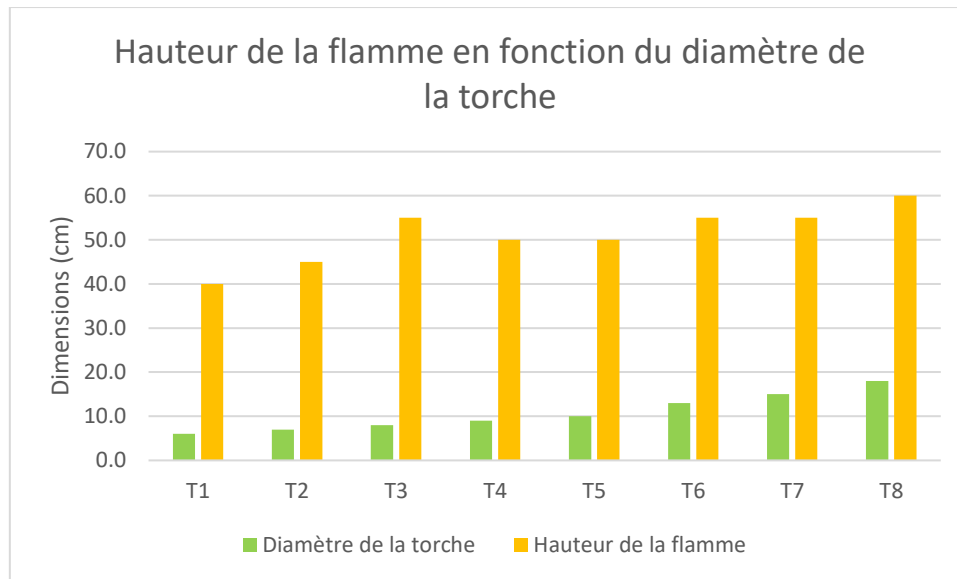


Graphique 10 : Comparaison de l'éclairage de torches constituées de diverses proportions de brins en pin sylvestre et/ou genévrier.

Cette expérience permet d'observer que les torches uniquement constituées de genévrier ont une production de lumière inférieure aux autres, mais qu'aucune différence significative ne semble exister concernant les torches mixtes ou en pin. En ce qui concerne la durée de la combustion, elle se prolonge jusqu'à la combustion complète des brins et est donc dépendante de la longueur des brins : plus ces derniers seront longs, et plus la torche durera longtemps.

Torches à plus de 12 brins

La dernière expérience a consisté à créer des torches de différents diamètres avec des brins calibrés entre 0,5 et 1,5 cm de diamètre maximum (Graphique 11). L'objectif était de tester la production de lumière et la maniabilité des dispositifs afin de sélectionner pour nos tests en milieu souterrain et nos mesures, les torches permettant le meilleur équilibre entre les deux. Les torches, en pin sylvestre, faisaient toutes environ 50 cm de long, ce qui leur permettait de fonctionner pendant environ 30 minutes.



Graphique 11 : Relation entre diamètre d'une torche et hauteur de la flamme produite.

Le graphique précédent montre une tendance à l'augmentation de la flamme produite avec l'augmentation du diamètre de la torche (et donc du nombre de brins). La limite à la dimension de la torche repose donc essentiellement sur sa maniabilité, ce qui va varier d'un individu à l'autre. Nous avons remarqué, en ce qui nous concerne, que les torches les plus maniables à une main sont celles qui pèsent un kilogramme. Cela correspond aux torches du type T4, soit d'environ 9 cm de diamètre et environ pour 18 brins. Nous n'avons pas été au-delà des torches du type T8 (environ 18 cm de diamètre pour jusqu'à 30 brins) qui sont notre limite de maniabilité à une main.

Nous avons testé une torche du type T4 en genévrier et celle-ci a brûlé aussi longtemps et avec la même intensité que la torche T4 en pin sylvestre. Il semblerait que la présence d'un nombre important de brins dans une torche permette de compenser l'essoufflement des torches en genévrier, bien que des expérimentations plus approfondies seraient nécessaires pour le confirmer.

f) Présentation des torches mesurées

Nous avons choisi, pour les tests en milieu souterrain et pour les mesures, de ne réaliser que des torches mixtes (50 % pin sylvestre, 50 % genévrier) et en pin sylvestre pur afin de nous affranchir des résultats incertains concernant les torches en genévrier. Le diamètre maximal des

brins est compris entre 0,5 et 1,5 centimètre. Pour les torches testées en milieu souterrain, nous avons essayé de les faire les plus longues possible afin d'en optimiser la durée, mais pour garder un bon maintien, nous ne les avons pas faites trop épaisses. On obtient alors des dimensions moyennes autour de 9 cm de diamètre (soit entre 14 et 17 brins), pour une longueur moyenne des brins de 50 cm et un poids de la torche d'environ 1 kg, ce qui permet une bonne maniabilité de la torche sans soutien pendant une demi-heure par un individu adulte moderne non entraîné et non sportif (le détail des dimensions des torches réalisées est présenté en Annexe 2). Lors des mesures, nous étions limités dans le temps et avons donc choisi de fabriquer des torches plus courtes mais plus épaisses, donc plus lumineuses. Nous avons donc fabriqué des torches d'un diamètre moyen de 18 cm (soit entre 19 et 30 brins), pour une longueur moyenne des brins de 40 cm, ce qui en fait des torches d'un kilogramme également. Ces choix dans les dimensions des torches sont bien sûr arbitraires et dépendent de notre force physique, mais les Préhistoriques ont pu adapter les dimensions de leurs torches en fonction de leurs besoins et de leurs ressources en bois. Notre objectif ici est de reproduire un modèle de torche simple, permettant d'émettre un maximum de lumière tout en restant mobile.

g) Discussion

Pour fabriquer les torches, nous avons utilisé le même procédé que celui proposé par A. Aubourg et P. Galant (*op. cit.*), mais l'ajout d'un manche¹⁶ pour y ficher les brins permet une meilleure prise en main de l'objet (ce procédé n'est pas développé dans les articles précédents).

Nous avons remarqué que le diamètre idéal pour les brins composants la torche est d'un à deux centimètres, ce qui correspond au diamètre des brins retrouvés à Lascaux, ce qui pourrait plaider en faveur de restes de torches dans cette grotte. L'absence de mouchages pouvant être expliqué par plusieurs hypothèses : lors d'un déplacement, il n'y a pas besoin de moucher la torche, les charbons tombant avec le mouvement de la torche (celles-ci ont donc pu être utilisées uniquement à des fins de déplacement), mais aussi les mouchages peuvent être réalisés autrement qu'en frottant la torche contre une paroi, notamment en tapant sur le bout de la torche, à la main ou à l'aide d'une branche, cet acte étant toutefois moins pratique, il pourrait être interprété comme la volonté de ne pas marquer la paroi.

¹⁶ Idée proposée par J. C. Leblanc lors de nos expérimentations.

3. Reproductions en milieu souterrain

Avant de procéder aux mesures de spectre et d'éclairage, nous avons testé les éclairages sélectionnés dans une carrière, en condition de stationnement et de déplacement. L'objectif était de vérifier l'adéquation de ce type de source lumineuse avec un stationnement ou un déplacement en milieu souterrain. Pour cela, les dispositifs ont été créés et utilisés dans la grande carrière de Lugasson (Gironde), qui présente des galeries longues de plusieurs mètres, voire dizaines de mètres et larges jusqu'à trois mètres.

a) *Déplacement*

En ce qui concerne le déplacement, les lampes à graisse sont très peu pratiques puisque la flamme projette l'ombre du support calcaire sur le sol, ce qui rend ce dernier non visible. Le déplacement peut alors se révéler incertain, voire dangereux (Figure 71). Cependant, les lampes à graisse peuvent être posées et permettent de créer une sorte de balisage lumineux. Il est alors possible de se déplacer autour de la ou des source(s) dans un rayon d'environ 5 mètres, dans le cadre de déplacements au sein d'une salle ou d'un espace délimité, ou pour franchir un obstacle lors d'une progression individuelle. La lampe à graisse trouve également son utilité lors d'un déplacement dans une galerie très basse.

À l'inverse, les torches sont particulièrement efficaces pour circuler dans des espaces larges et/ou chaotiques. En effet, nous avons pu parcourir plusieurs centaines de mètres dans la carrière uniquement à l'aide d'une torche (Torche T10, Annexe 2), 500 mètres (soit quelques minutes de marche) ayant alors consommé environ un tiers de la torche. La plupart des charbons qui se créent à l'extrémité des brins tombent pendant le déplacement, très peu de mouchages sont alors nécessaires. Notre cheminement peut être suivi par les charbons tombés au sol, dont le diamètre correspond à celui du brin utilisé, et dont la quantité totale peut être mise en relation avec le volume de bois présent dans la torche. Les longueurs de ces charbons sont cependant réduites, souvent inférieures à 2 cm, ce qui peut limiter leur conservation dans le temps et contribuer à la difficulté à les retrouver en contexte archéologique. Nous n'avons eu aucune difficulté lors du déplacement (nous étions un groupe de sept personnes) car la torche éclairait des volumes assez grands (galeries larges et hautes de plusieurs mètres, longues de plusieurs dizaines de

mètres, Figure 71), où parois, sols et plafonds étaient suffisamment éclairés. La fumée dégagée n'était pas suffisamment importante pour être gênante, ni pour le porteur, ni pour les accompagnants. Cependant, nous avons pu remarquer qu'il est plus difficile pour le porteur de torche de voir au loin, et donc de s'orienter, car il est ébloui par la flamme. Ce type de torche permet de faire des mouvements à la fois amples et brusques sans qu'elle ne s'éteigne, et si elle s'éteint, il est possible de la rallumer en soufflant dessus. La torche a été arrêtée après 31 minutes de fonctionnement, son efficacité ayant fortement diminué. Elle était tout de même toujours maniable malgré le fait que tous les liens végétaux se soient consumés. Il s'agit donc d'un éclairage très efficace et sûr pour le déplacement d'un groupe de personnes et pour l'exploration de l'espace souterrain.



Figure 71 : En haut : port d'une lampe à graisse (composée de graisse de cheval et d'une mèche en amadou) de nuit en extérieur, cl. P. Mora. En bas : déplacement dans la carrière à l'aide d'une torche en pin sylvestre, cl. C. Ferrier.

b) Stationnement

Pour qu'une torche brûle correctement, elle doit être portée, et nos torches ont une autonomie d'environ une demi-heure, ce qui peut rendre cet éclairage peu pratique lors d'un stationnement prolongé, de plusieurs heures par exemple. Il est tout de même possible de disposer de plusieurs torches (celles-ci ne sont pas très encombrantes et il est possible d'en apporter plusieurs dans la cavité) et d'allumer la suivante à l'aide d'une première torche déjà allumée. En stationnement, les charbons créés au bout des brins étouffent la flamme car ils ne tombent pas naturellement, on observe donc une diminution progressive de l'intensité de la torche, qui doit être régulièrement ravivée à l'aide de mouchages pour faire tomber les charbons. Ainsi, la première torche testée en position stationnaire (Torche T9, Annexe 2) a brûlé pendant 29,30 minutes et a nécessité six mouchages, et la seconde (Torche T11, Annexe 2) a brûlé pendant 34 minutes et a nécessité sept mouchages. La plupart ont été réalisés sur la paroi ou un bloc calcaire (Figure 72c) et ressemblent à ce qui peut être retrouvé en contexte souterrain (Figure 72d). L'ensemble de l'espace où la torche est tenue est clairement illuminé dans un rayon de quelques mètres (Figure 72b), et il est possible de distinguer des obstacles jusqu'à environ 15 m, selon les observateurs, bien qu'à cette distance il ne soit pas possible de reconnaître des détails ou des couleurs. À l'inverse, une personne située à 15 m de la source la voit très bien, ainsi que les détails des personnes et parois situées autour d'elle (jusqu'à 3 ou 4 mètres environ). Les torches peuvent être ponctuellement posées, mais il semble dans ce cas plus intéressant de ficher la torche au sol ou en paroi plutôt que de la poser sur l'argile, cette dernière pouvant se coller aux brins et ainsi diminuer l'efficacité de l'éclairage.

Si les lampes ne semblaient pas très efficaces pour le déplacement, elles trouvent leur utilité dans le stationnement. En effet, elles peuvent être posées et leur durée de vie est illimitée tant que de la graisse est régulièrement ajoutée. On observe qu'avec 30 grammes de graisse, une lampe peut fonctionner pendant une heure, nos lampes devant être réapprovisionnées toutes les demi-heures environ. Les lampes éclairent suffisamment dans un rayon d'environ cinq mètres pour s'y déplacer et y effectuer diverses tâches, comme préparer une autre lampe, ou broyer des pigments, par exemple. Les activités plus fines, comme la lecture, sont possibles mais dans un rayon plus restreint d'environ un ou deux mètres autour de la source. Il est également possible de disposer plusieurs lampes dans l'espace afin d'en éclairer l'ensemble et de permettre à un groupe d'individus de vaquer à diverses occupations (Figure 72a).

Aucune différence notable n'a été remarquée entre les torches mixtes ou en pin, ni entre les lampes à mèche en pin ou en amadou, ou entre les différentes graisses utilisées.



Figure 72 : a) Salle éclairée par des lampes à graisse (cl. A. Jouteau), b) Salle éclairée par une torche (cl. A. Jouteau), c) Mouchage de torche expérimental (cl. C. Ferrier), d) Mouchage de torche sur un bloc calcaire à Cussac (cl. M. Peyroux).

c) *Discussion*

On observe une véritable complémentarité entre ces deux dispositifs d'éclairage, les torches semblant plus performantes dans la production de lumière et se révèlent donc particulièrement efficaces dans le cadre de déplacements, d'éclairages de grands espaces ou d'un groupe d'individus, et pour des stationnements de durée limitée. À l'inverse, les lampes trouvent leur utilité dans le stationnement de longue durée (nous n'avons pas observé de difficulté à porter l'éclairage à cause de la chauffe du support malgré plusieurs heures de fonctionnement), la présence d'activités nécessitant l'usage des deux mains, l'éclairage d'espaces restreints ou encore le déplacement dans des galeries basses. Les lampes disposent également d'un autre avantage, elles sont économes en ressources : une mèche de quelques centimètres de côté et 30 grammes de graisse permettent d'éclairer pendant une heure alors que pour qu'une torche soit efficace pendant une heure elle nécessite environ 2 kg de bois travaillé. Cette économie de ressources est également associée à une fabrication du luminaire plus rapide et qui ne nécessite aucun prérequis physique ou de savoir-faire, contrairement à la fabrication des torches.

4. Perspectives

En s'inspirant des études qui nous ont précédée, nous avons mis en place un protocole expérimental permettant la réalisation de lampes à graisse et de torches. L'objectif était avant tout méthodologique : nous souhaitons proposer un modèle qui soit répétable et quantifiable, c'est pourquoi nous n'avons sélectionné qu'un type de morphologie de lampe (lampe creuse d'environ 30 ml de contenance) et de torche (torche simple, réalisée par la combinaison de brins standardisés). Bien sûr, il serait à l'avenir pertinent de tester d'autres modèles de lampes et de torches, comme par exemple les lampes dites « plates » présentes à Lascaux.

Nous avons fait le choix, pour ne pas augmenter le nombre de variables, de ne sélectionner que des mèches non préparées. Ainsi, seuls l'amadouvier et le bois mort permettent d'assurer une belle flamme. Cependant, il serait intéressant dans de futures expérimentation d'investiguer l'utilisation de mèches préparées, en mousses ou lichens par exemple, ou encore de développer une méthodologie pour étudier le fonctionnement de l'os en tant que mèche.

En ce qui concerne l'analyse des graisses, les différentes graisses testées n'ont pas impacté la durée de la combustion ou la hauteur de flamme. Si des mesures au spectre et au luxmètre seront proposées dans le chapitre suivant (Sous-chapitre 2.1.E. *Les sources d'éclairages mobiles paléolithiques : mesures*) afin de vérifier qu'il n'existe pas de différence de couleur ou de puissance entre les graisses utilisées, il serait tout de même intéressant de pousser l'analyse sur des graisses d'animaux proches de ceux présents au Paléolithique récent (à la fois en termes de phylogénie et de mode de vie), comme le bison ou l'ovibos, le cheval (de Przewalski par exemple) ou encore le renne.

Pour fabriquer des torches, nous n'avons testé que le pin et le genévrier car ce sont les deux essences les plus retrouvées en contexte archéologique souterrain. Cependant, ce ne sont pas les seules (Groenen, 2016) et il serait enrichissant à l'avenir de prendre en compte de nouvelles essences.

Enfin, si nos essais de stationnement et de déplacement en milieu souterrain nous ont permis de mieux cerner les capacités et la complémentarité de ces deux types d'éclairage, cela pourrait être intéressant de réaliser des tests en grotte afin d'avoir une meilleure idée des dynamiques de déplacement imposées par ces éclairages dans un environnement au sol et aux parois plus accidentés que ceux d'une carrière.

D'autre part, une étude expérimentale portant spécifiquement sur la production de charbons et de mouchages lors d'une utilisation des torches en grotte, conjointe à celle de la conservation des charbons dans ce milieu et des charbons et mouchages effectivement découverts en milieu souterrain pourrait être tout à fait pertinente afin de mieux comprendre les rythmes de déplacement, de stationnement, et de marquage du milieu souterrain par les Préhistoriques. Il serait aussi possible de quantifier la quantité de charbons produits et tombés au sol (Figure 73), ainsi que leurs dimensions, afin de les comparer aux charbons découverts en contexte paléolithique.



Figure 73 : Fragments de charbons produits lors de la combustion complète d'une torche expérimentale.

E. Les sources d'éclairages mobiles paléolithiques : mesures

1. Protocole des mesures

a) Installation du matériel

Choix du matériel

Suite à la sélection des éclairages préhistoriques qui nous ont semblés, de façon subjective, les plus performants, nous avons procédé à leur mesure à l'aide d'un luxmètre pour l'éclairage et d'un spectroradiomètre pour mesurer le spectre émis. Le spectroradiomètre est le même que celui utilisé lors des mesures sur parois (*Konica Minolta CS-2000*, Figure 74), et fonctionne selon le même principe, mais au lieu de viser une paroi, la mesure est réalisée sur une source secondaire orthotrope (ou diffuseur parfait, dont la caractéristique est de renvoyer l'ensemble du flux lumineux reçu dans toutes les directions ; Figure 74) située à proximité immédiate de la source de lumière afin de renvoyer l'ensemble du spectre lumineux produit par celle-ci. Le luxmètre (*Chauvin Arnoux 1110*), est composé d'un capteur (Figure 74) qui permet de mesurer l'éclairage (en lux) à raison d'une mesure par seconde à partir de 0,1 lux et avec une incertitude de 3 % sur les sources incandescentes. Ce capteur est relié à un boîtier numérique indiquant l'éclairage reçu en temps réel, lui-même pouvant être relié à un ordinateur afin d'enregistrer l'éclairage au fur et à mesure à l'aide du logiciel *Data Logger Transfer*, disponible en libre accès (https://catalog.chauvin-arnoux.com/fr_fr/c-a-1110-luxmetre-3541.html).



Figure 74 : Matériel utilisé lors des mesures. De gauche à droite : Spectroradiomètre Konica Minolta CS-2000 (cl. P. Mora), Diffuseur parfait (cl. P. Mora), Luxmètre Chauvin Arnoux 1110.

Mise en place du matériel

Les mesures ont été réalisées de nuit en extérieur afin de s'affranchir de la réflexion d'éventuelles parois et de l'influence du Soleil. La Lune était à 96 % visible, le placement des mesures a donc été conçu pour minimiser son impact au maximum (Figure 75). La source était posée au-dessus d'une colonne de blocs calcaires d'un mètre de hauteur, à 1,42 m du spectroradiomètre et à 1,23 m d'un luxmètre fixe sur un même plan horizontal (Figure 75). Un second luxmètre a été utilisé pour prendre des mesures en divers points autour de la source, sur un plan horizontal ou vertical, toujours dans un rayon d'un mètre de distance. Le pointeur du spectroradiomètre était dirigé dans la direction opposée à la Lune, vers le diffuseur parfait sur lequel les mesures de spectre ont été réalisées¹⁷. Le luxmètre fixe était situé à l'opposé du spectroradiomètre, donc face à la Lune. Des mesures ont été réalisées avant la mise en place des sources lumineuses, et l'éclairement obtenu étant nul, cela nous a assuré de l'absence d'influence de la Lune sur nos résultats. L'ensemble des mesures ont été filmées à environ 2 mètres de la source, mais seuls les enregistrements de torches sont exploitables car les lampes produisaient trop peu de lumière. Des photographies de l'ensemble des mesures ont également été prises¹⁸.

¹⁷ Nous renouvelons ici nos remerciements envers S. Konik (CNP et PACEA) qui a accepté de réaliser les mesures de spectres avec son spectrophotomètre puis de nous transmettre les résultats.

¹⁸ Nous remercions par ailleurs P. Mora (Archéovision Production) d'avoir accepté de photographier les sources et l'installation du matériel avec son appareil.

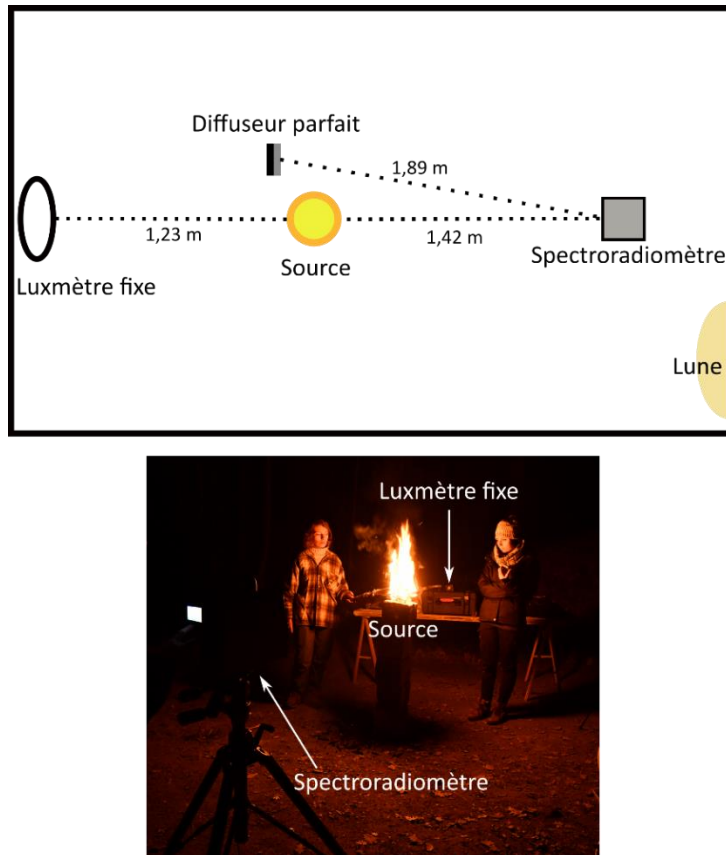


Figure 75 : Schéma et photographie de l'installation du matériel fixe pour les mesures (cl. P. Mora).

Les mesures ayant été réalisées en extérieur, le vent a parfois eu une influence négative sur les mesures d'éclairage des lampes en balayant les flammes produites (Figure 76). Ce problème n'a cependant pas affecté toutes les lampes, et n'a pas affecté les torches.

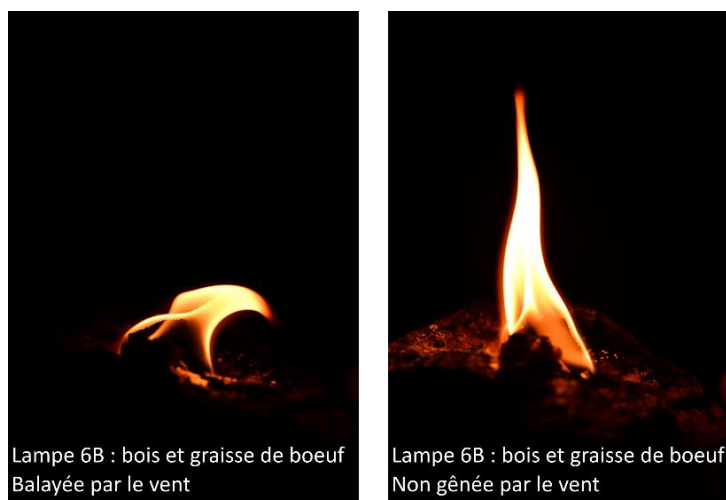


Figure 76 : Influence du vent sur la flamme d'une même lampe à graisse (cl. P. Mora).

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

Luminaires mesurés

Afin d'obtenir un échantillon de la variabilité du spectre et de l'éclairement émis par un même dispositif, deux mesures ont été enregistrées par source, et chaque dispositif a été créé en au moins deux exemplaires. Des mesures ont ainsi été réalisées sur quatre torches et treize lampes à graisse (Tableau 10, Tableau 11).

Numéro	Lampe	Graisse	Mèche
1A	Cussac 1	Cheval (30 g)	Amadou (2,5x2x1,5 cm ; 3,2 g)
2A	Cussac 3	Cerf (30 g)	Amadou (2,5x2x1,5 cm ; 4 g)
3A	Cussac 4	Bœuf (30 g)	Amadou (2,5x2x1,5 cm ; 3,9 g)
4A	Cussac 5	Cheval (30 g)	Aubier (2,5x2x1,5 cm ; 4,1 g)
5A	Cussac 6	Cerf (30 g)	Aubier (2,5x2x1,5 cm ; 4,4 g)
6A	Cussac 7	Bœuf (30 g)	Aubier (2,5x2x1,5 cm ; 5,4 g)
1B	Cussac 1	Cheval (30 g)	Amadou (2,5x2x1,5 cm ; 3,5 g)
2B	Cussac 3	Cerf (30 g)	Amadou (2,5x2x1,5 cm ; 4,1 g)
3B	Cussac 4	Bœuf (30 g)	Amadou (2,5x2x1,5 cm ; 2,9 g)
4B	Cussac 5	Cheval (30 g)	Aubier (2,5x2x1,5 cm ; 4,1 g)
5B	Cussac 6	Cerf (30 g)	Aubier (2,5x2x1,5 cm ; 4,3 g)
6B	Cussac 7	Bœuf (30 g)	Aubier (2,5x2x1,5 cm ; 4,1 g)
1C	Cussac 1	Cheval (30 g)	Amadou (2,5x2x1,5 cm ; 4 g)

Tableau 10 : Liste des lampes mesurées et de leurs composants.

N° Torche	Essence	Nombre brins	Diamètre moyen brins (cm)	Diamètre moyen torche (cm)	Longueur moyen brins (cm)	Poids des brins (g)
T1	Pin sylvestre	20	1	18	45	765
T2	Pin sylvestre	19	1	17	40	780
T3	Pin sylvestre et Genévrier	30	1	18	35	800
T4	Pin sylvestre et Genévrier	22	1	18	40	790

Tableau 11 : Liste des torches mesurées, de leurs composants, leurs dimensions et de celles de leurs brins.

b) Mesures réalisées

Les lampes

Les lampes produisent une flamme symétrique suivant le plan vertical mais il existe une forte disparité sur le plan horizontal de par la présence du support calcaire qui bloque les rayons lumineux émis. De ce fait, nous avons utilisé le luxmètre mobile afin de prendre des mesures ponctuelles dans un arc de cercle d'un mètre de rayon autour des lampes sur un plan vertical, de 180° (au sol) jusqu'à 0° (au-dessus de la flamme, Figure 77). Ces mesures ponctuelles correspondent en réalité à la moyenne de l'éclairage observé sur le terrain pendant quelques secondes d'affilée. La lampe 1C, contrairement aux autres lampes à graisse, n'a pas bénéficié de mesures ponctuelles mais d'une mesure continue pendant plusieurs minutes.

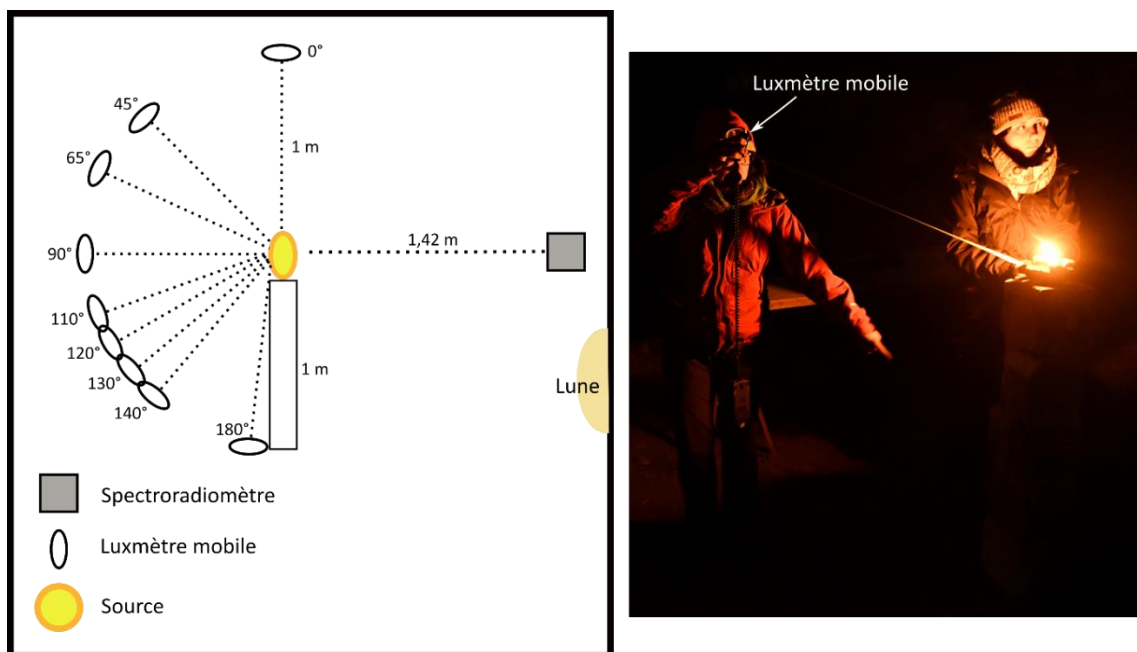


Figure 77 : Schéma et photographie du luxmètre mobile lors des mesures sur les lampes (cl. P. Mora).

Les torches

Dans la mesure où les torches se portent légèrement inclinées et que la présence d'un porteur peut faire office d'écran, nous avons décidé de mesurer la variabilité de l'éclairage sur un plan horizontal. Pour cela, deux mesures ponctuelles ont été réalisées (d'après les mêmes modalités que les mesures ponctuelles réalisées sur les lampes à graisse) en quatre points autour

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

de la source sur un même plan horizontal (Figure 78). Dans le même temps, nous avons procédé à l'enregistrement continu (à raison d'une mesure par seconde) du fonctionnement des torches pendant leurs dix premières minutes de fonctionnement (hors période d'allumage). En outre, comme pour les lampes, les torches ont bénéficié de deux mesures spectrales chacune.

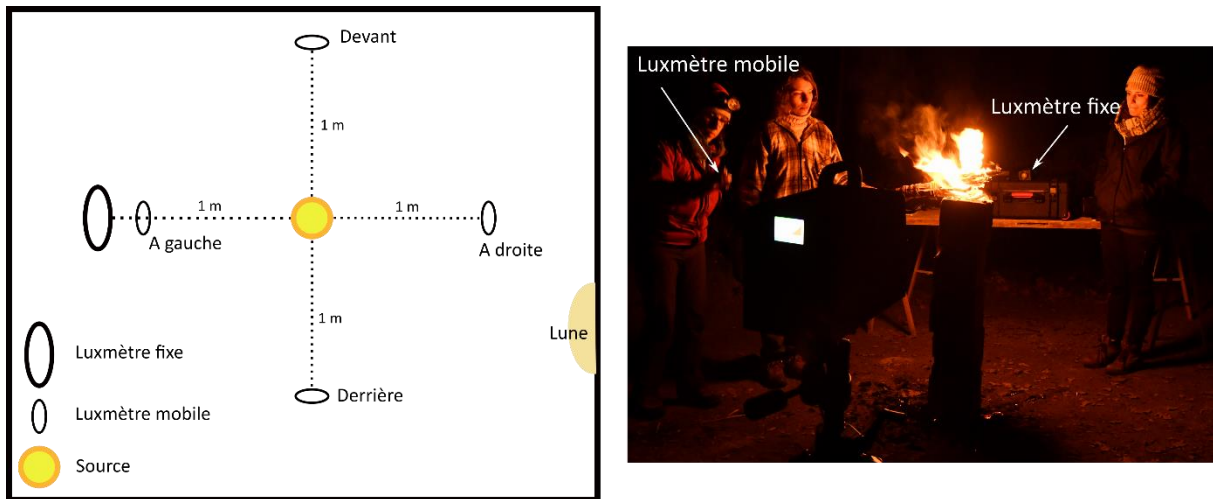


Figure 78 : Schéma et photographie de l'organisation des luxmètres fixes et mobiles lors des mesures sur les torches (cl. P. Mora).

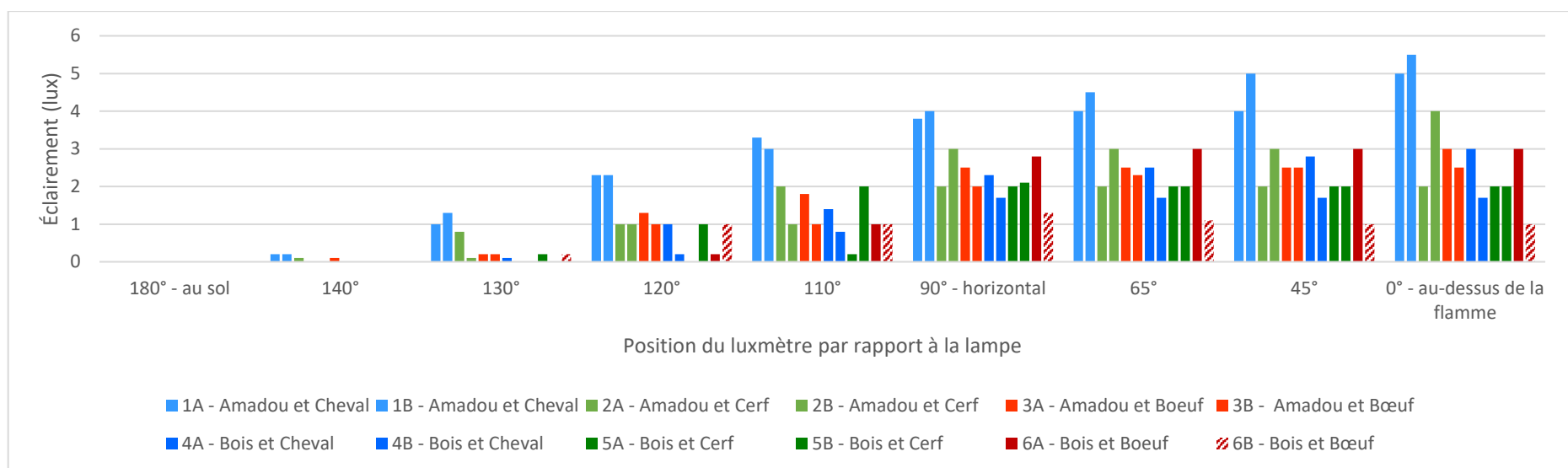
2. Mesures d'éclairage sur lampes à graisse

a) Mesures ponctuelles

Le Tableau 12 et le Graphique 12 présentent l'ensemble des résultats obtenus à l'aide du luxmètre pour neuf valeurs d'angles différentes, seule une lampe n'a pu donner de résultats exploitables à cause de la présence de vent : la lampe 6B.

	180° - au sol	140°	130°	120°	110°	90° - horizontal	65°	45°	0° - au-dessus de la flamme
1A - Amadou et Cheval	0	0,2	1,0	2,3	3,3	3,8	4,0	4,0	5,0
1B - Amadou et Cheval	0,0	0,2	1,3	2,3	3,0	4,0	4,5	5,0	5,5
2A - Amadou et Cerf	0	0,1	0,8	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
2B - Amadou et Cerf	0,0	0,0	0,1	1,0	1,0	3,0	3,0	3,0	4,0
3A - Amadou et Boeuf	0	0	0,2	1,3	1,8	2,5	2,5	2,5	3,0
3B - Amadou et Bœuf	0,0	0,1	0,2	1,0	1	2,0	2,3	2,5	2,5
4A - Bois et Cheval	0	0,0	0,1	1,0	1,4	2,3	2,5	2,8	3,0
4B - Bois et Cheval	0,0	0,0	0,0	0,2	0,8	1,7	1,7	1,7	1,7
5A - Bois et Cerf	0	0,0	0,0	0,0	0,2	2,0	2,0	2,0	2,0
5B - Bois et Cerf	0,0	0,0	0,2	1,0	2,0	2,1	2,0	2,0	2,0
6A - Bois et Boeuf	0	0,0	0,0	0,2	1,0	2,8	3,0	3,0	3,0
6B - Bois et Bœuf	0,0	0,0	0,2	1,0	1,0	1,3	1,1	1,0	1,0

Tableau 12 : Valeur « moyenne » de l'éclairage obtenu pour chaque lampe à graisse.

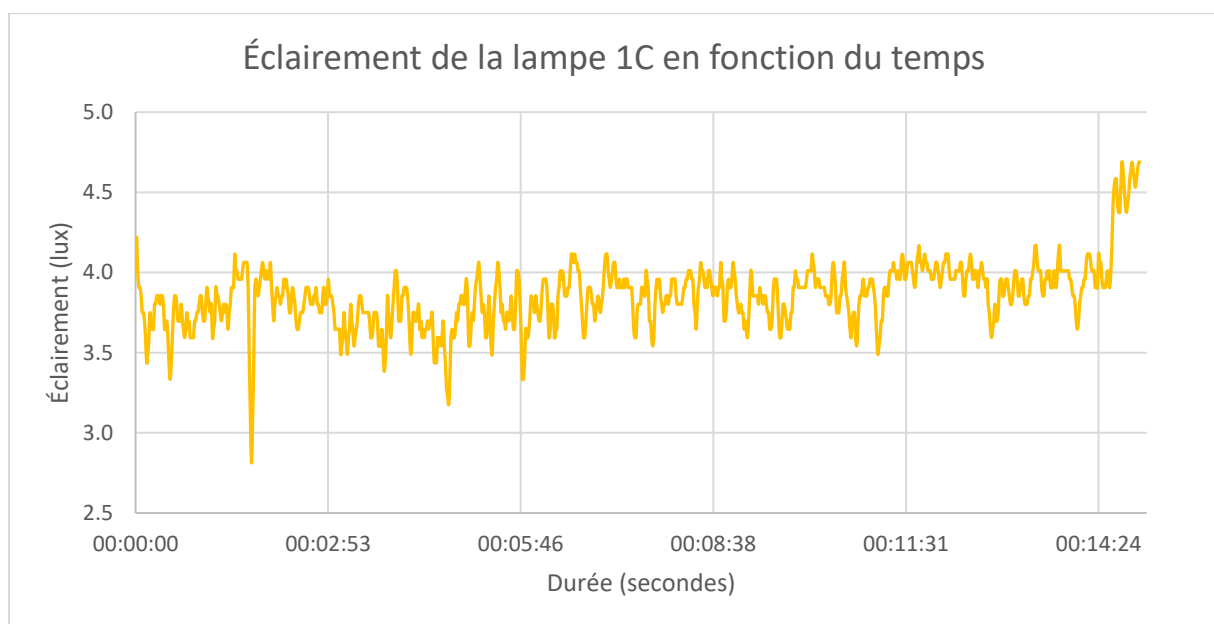


Graphique 12 : Évolution de l'éclairage produit par des lampes à graisse différentes en fonction de l'angle de la mesure.

Le Graphique 12 montre que les valeurs d'éclairement augmentent progressivement entre 180° et 0°, avec un éclairement plutôt stable entre 90° et 0° (soit entre l'horizontale et vers le haut), ce qui illustre bien la difficulté d'éclairer le sol à l'aide d'un tel éclairage. Les plus hautes valeurs (jusqu'à 5,5 lux) concernent les lampes du type 1, associant graisse de cheval et mèche en amadou. Les autres lampes, c'est-à-dire constituées de graisses de bœuf ou de cerf ou d'une mèche en bois associée à de la graisse de cheval, ont des valeurs d'éclairement qui ne peuvent être significativement distinguées, avec des maximums situés entre 2 et 4 lux au-dessus de l'horizontale. Si les mèches en amadou semblent plus efficaces que le bois lorsque associées à de la graisse de cheval, la nature de la mèche ne semble pas avoir beaucoup d'influence sur l'éclairement produit avec les autres graisses.

b) Mesures continues

Une lampe à graisse (n°1C), a été mesurée de manière continue pendant quinze minutes (Graphique 13). La lampe était composée d'une mèche en amadou et de graisse de cheval. Le luxmètre a été, pour cette mesure, disposé à un mètre de distance de la lampe, sur un même plan horizontal.



Graphique 13 : Moyenne glissée de l'éclairement de la lampe 1C en fonction du temps.

Sur cette durée de quinze minutes, l'éclairage moyen est de 3,9 lx, avec un éclairage minimum de 2,7 lx et maximum de 4,7 lx. Ces valeurs sont cohérentes avec les mesures ponctuelles préalablement réalisées, puisque à l'horizontale (90°) les lampes 1A et 1B produisaient respectivement environ 3,8 et 4,0 lux.

Le Graphique 13 nous permet d'observer que les variations d'éclairage d'une lampe sont assez faibles, avec une variation moyenne de 0,16 lx d'une seconde à l'autre.

c) *Discussion*

Ces mesures nous permettent d'observer que l'association de la graisse de cheval et d'une mèche en amadou semble être la plus efficace sans que nous puissions l'expliquer avec certitude, la différence de température de fonte des graisses et la différence de porosité entre ces deux types de mèches (amadou et bois) étant des pistes à explorer. L'introduction de nouvelles variables (comme le degré de décomposition du bois) et la production d'un nombre plus important de lampes permettrait de mener une étude plus aboutie, de mieux comprendre les phénomènes en jeu et d'obtenir des statistiques plus complètes qui permettraient de valider ou d'infirmer nos observations. Notre objectif initial était d'obtenir l'éclairage sur de potentielles lampes paléolithiques, ce qui a été atteint, nous permettant d'intégrer ces mesures à nos simulations. L'éclairage produit par une lampe est très peu variable sur la durée, mais produit un vacillement régulier de la flamme, de quelques dixièmes de lux autour de sa moyenne. Enfin, il est à noter que les mesures maximales obtenues sur les différentes lampes (entre 1,7 et 5,5 lux) sont supérieures aux mesures précédemment réalisées sur des lampes à graisse (de Beaune, 1983, 1987b) et supérieures à l'éclairage produit par une bougie moderne (d'environ 1 lux).

3. Mesures d'éclairage sur torches

a) *Mesures ponctuelles*

Le Tableau 13 regroupe les valeurs de l'éclairage pris à un moment donné en quatre points autour des torches. On peut ainsi attester que la flamme d'une torche n'est pas symétrique sur le plan horizontal (Figure 79). La position *Derrière* semble avoir des mesures d'éclairage

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

plus faibles que les autres (il s'agit de la valeur minimale dans cinq cas sur neuf) mais cela n'est pas systématique (cette position est même la plus élevée dans trois cas) et peut varier pour une même torche. Cette première observation devra être vérifiée par de nouvelles mesures sur un échantillon plus important de torches avant de pouvoir être confirmée. De manière générale, on observe une variabilité entre les quatre côtés mesurés d'une torche et entre les torches. Cela est peut-être dû à l'organisation des brins au sein des torches.

Torche	Moment	À gauche	Derrière	À droite	Devant
Torche 1	Entre 3 et 4 min	75	56	65	73
	Entre 6,30 et 7,30 min	10	9	16	14
	Entre 2,30 et 3,30 min	54	43		46
Torche 2	Entre 7,30 et 8 min	38	25	51	32
	Entre 10,30 et 11 min	21	26	21	16
Torche 3	Entre 3 et 4 min	53	40	42	46
	Entre 8 et 8,30 min	24,4	25,4	20,8	19,2
Torche 4	Entre 3 et 3,30 min	30	45	34	33
	Entre 6 et 6,30 min	54	47	41	56

Tableau 13 : Mesures d'éclairage des torches à différents moments de leur combustion, depuis quatre localisations.

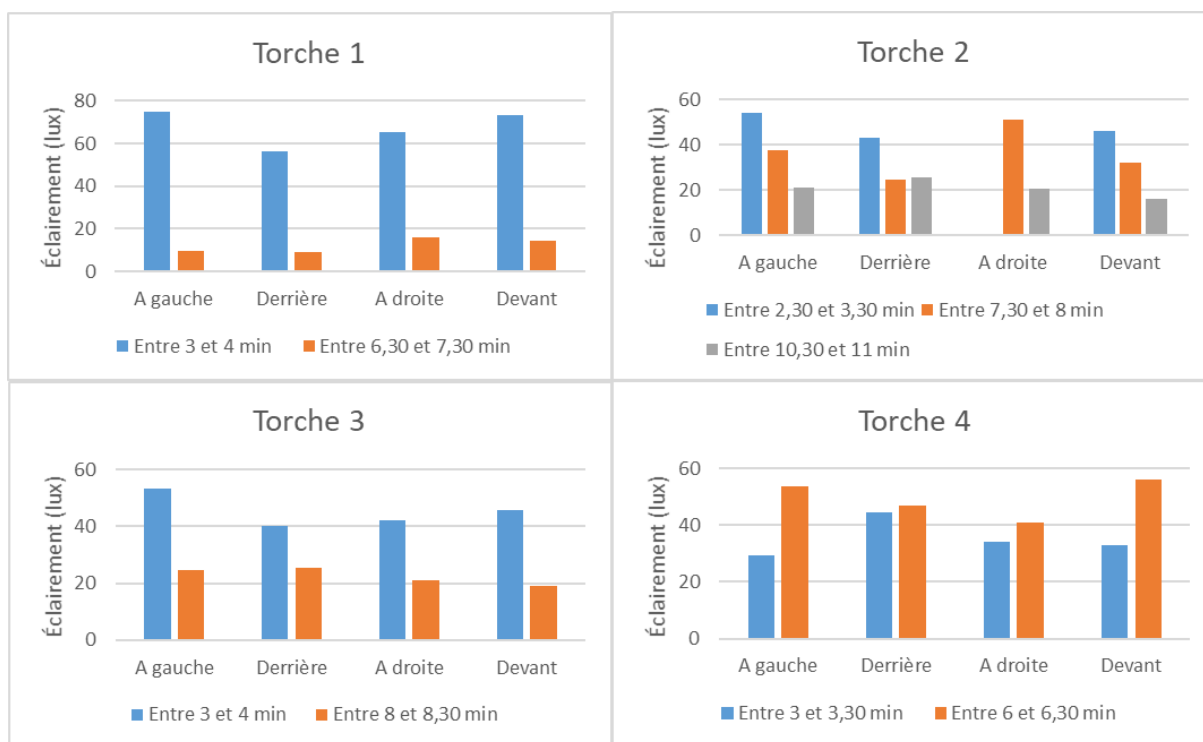
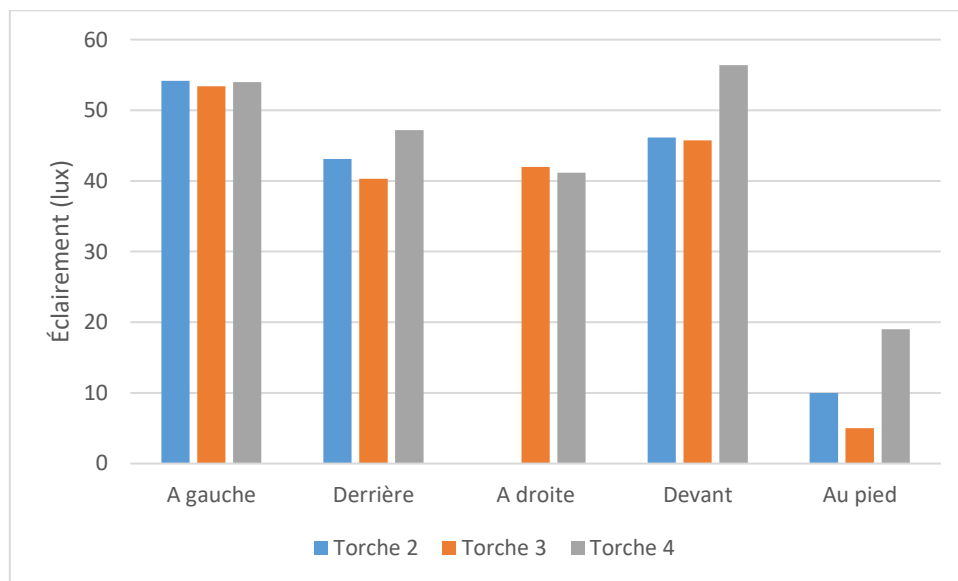


Figure 79 : Éclairage des torches en fonction de la position du luxmètre dans l'espace.

Trois mesures ont également été réalisées à un mètre au pied de la source (Tableau 14, Graphique 14). Ces quelques valeurs permettent d'observer que la distribution verticale est asymétrique, beaucoup plus faible au pied de la torche qu'à son horizontale. Cependant, l'éclairage n'est jamais nul et est même toujours supérieur à celui d'une lampe à graisse. Aucun enregistrement n'a pu être effectué au-dessus de la flamme, pour des raisons de sécurité, car celle-ci s'élevait trop haut.

Torche	À gauche	Derrière	À droite	Devant	Au pied
Torche 2	54	43		46	10
Torche 3	53	40	42	46	5
Torche 4	54	47	41	56	19

Tableau 14 : Valeurs d'éclairage à un moment donné autour et au pied des torches.



Graphique 14 : Éclairage à un moment donné autour et au pied des torches.

b) Mesures continues

L'enregistrement continu des torches au luxmètre a été traité sous *Excel* afin de supprimer les valeurs aberrantes (p. ex. Figure 80) dues à la présence d'une lampe moderne allumée (valeurs hautes) ou à l'éloignement de la torche du luxmètre pour réaliser un mouchage (valeurs à 0). Cela a été rendu possible car la séquence d'éclairage de chaque torche a été filmée.

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation



Figure 80 : Mise en évidence des valeurs extrêmes dues à la réalisation d'un mouchage ou à l'occultation du luxmètre par exemple.

Dans un second temps, les valeurs, qui ont été mesurées à 1,23 m de la source, ont été recalculées pour correspondre à une distance de 1 m, puisque c'est cette valeur qui sera insérée dans le logiciel. L'éclairement étant inversement proportionnel au carré de la distance de la source de la lumière, pour connaître l'éclairement à un mètre de distance, il suffit d'appliquer la formule suivante :

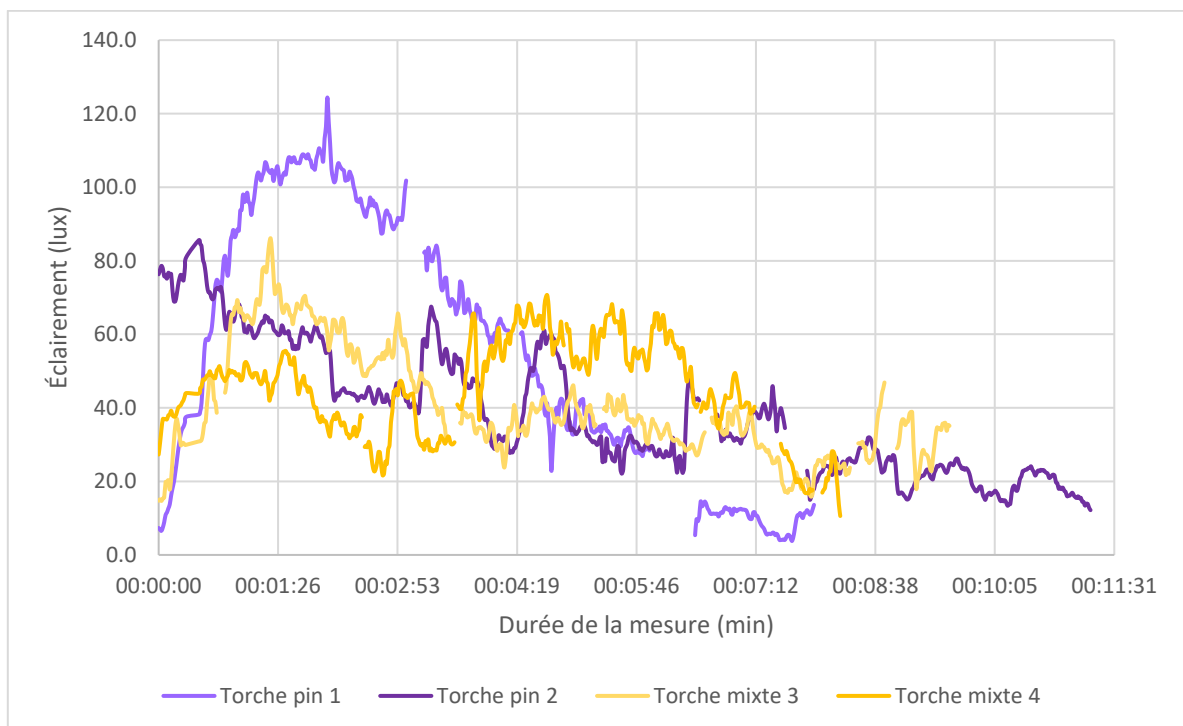
$$E1 = E2 \times D^2$$

Avec E1 l'éclairement à un mètre de distance, E2 l'éclairement réellement mesuré et D la distance entre le luxmètre et la source lors de la mesure.

Le Graphique 15 présente l'éclairement à 1 m de distance corrigé des quatre torches, et le Tableau 15 leurs valeurs moyennes, minimales et maximales.

	T1	T2	T3	T4
Moyenne (lux)	56,3	38,5	40,4	45,2
Valeur minimale (lux)	3,8	10,4	10,0	7,1
Valeur maximale (lux)	127,8	91,5	87,1	78,2

Tableau 15 : Éclairage moyen, minimal et maximal des quatre torches à un mètre de distance.



Graphique 15 : Moyenne glissante de l'éclairage de la source à un mètre de distance.

Les torches semblent atteindre leur éclairage maximal au début de leur fonctionnement avec des valeurs atteignant jusqu'à 127,8 lux pour la T1, puis la lumière produite diminue et atteint un régime plutôt stable, autour d'une quarantaine de lux, avant de diminuer autour d'une vingtaine de lux peu de temps avant l'extinction de la torche (les durées de fonctionnement de ces torches sont d'environ 15 minutes, bien inférieures aux torches testées sous terre car plus courtes). Comme ces sources étaient fixes lors des mesures, elles ont nécessité quelques mouchages (respectivement 3, 1, 5, et 6 pour les torches T1, T2, T3 et T4) qui provoquent une remontée de l'éclairage.

c) Discussion

Les mesures permettent de mieux comprendre la répartition spatiale de la lumière et son évolution dans le temps. Ainsi on peut observer que les variations horizontales sont peu importantes, et semblent surtout liées à la présence du porteur qui fait écran à la flamme. La localisation du porteur par rapport à la torche est donc une donnée qui devra être pensée dans les simulations. La seule variation verticale qui ait été enregistrée montre que la lumière produite est nettement plus faible sous la torche qu'à son horizontale, cependant, contrairement aux lampes à graisse, le sol est éclairé. Les mesures montrent également une diminution progressive de l'éclairement au cours de la vie de la torche, en particulier au début et à la fin.

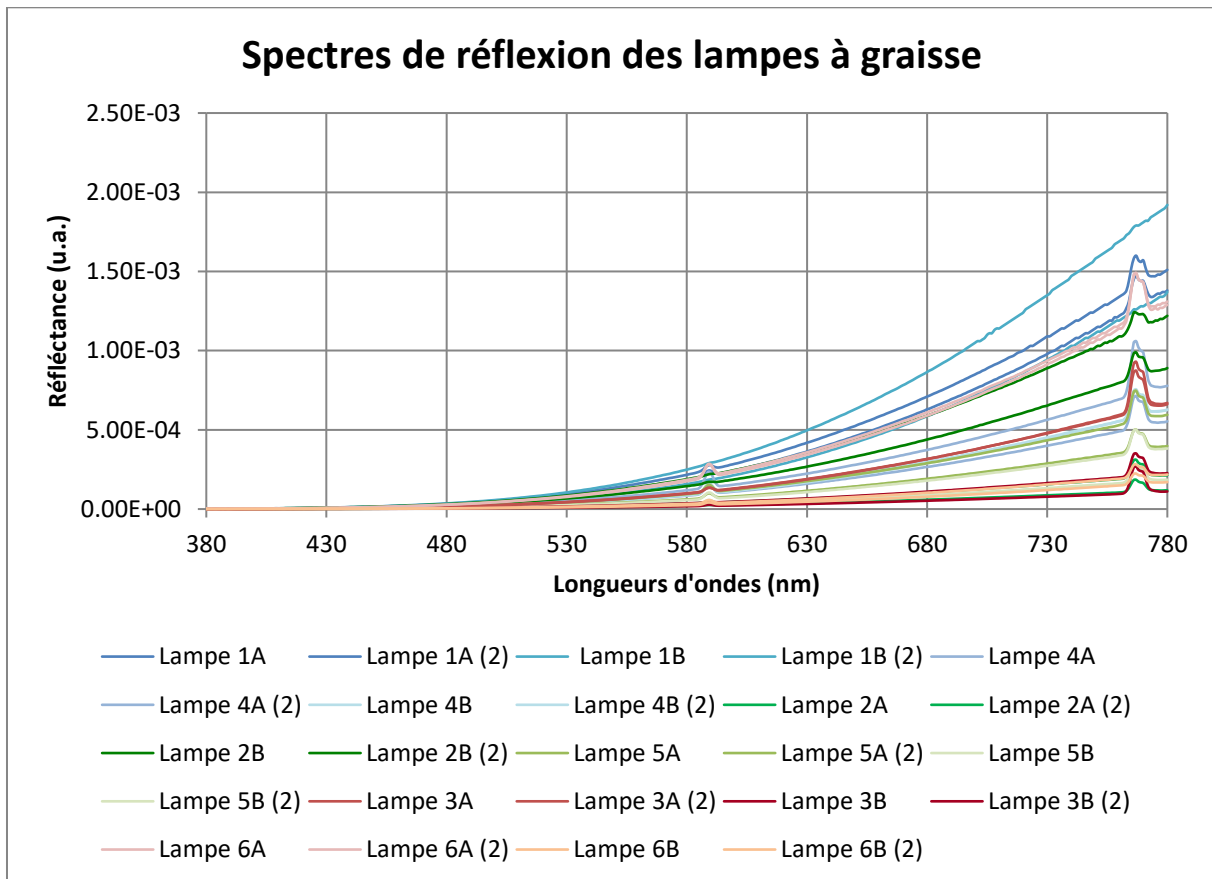
L'éclairement produit est toujours supérieur à celui des lampes à graisse, avec une valeur moyenne comprise entre 38 et 56 lux. À titre de comparaison, l'éclairement à 1 m de distance et au centre du faisceau d'une lampe frontale *Scurion 1500* en mode Diffus, ou Progression, est de 128 lx en moyenne, 200 lx au maximum, et en mode Spot de 9 000 lx au centre du faisceau (Balacey, 2016). L'éclairement produit est donc assez puissant pour se déplacer (légèrement inférieur au mode Progression de la lampe *Scurion 1500*), d'autant plus que l'éclairement est produit dans toutes les directions autour de la source. Il faut tout de même noter que les dimensions des torches en bois, et donc leur puissance, sont personnalisables, et nous avons fait le choix ici de mesurer des valeurs hautes pour ce type de dispositif en créant des torches de grandes dimensions.

Aucune différence significative n'a été remarquée entre les deux types de torches (en pin sylvestre ou en pin sylvestre et genévrier), mais il serait nécessaire de confirmer cette observation par la mesure d'un nombre plus important de torches. Il serait également intéressant de poursuivre ces mesures en intégrant des torches uniquement composées de genévrier, ou d'autres essences de bois disponibles au Paléolithique récent.

4. Données spectrales

a) Lampes à graisse

Les premiers résultats, sous la forme d'un spectre de réflexion (Graphique 16), montrent que les couleurs émises sont très chaudes, avec des courbes qui se lèvent à partir de 480 nm, soit à partir du cyan, quel que soit le type de lampe à graisse. Vers 770 nm, un décrochement de la courbe est observable, peut-être lié à la nature de la combustion, à moins qu'il ne s'agisse d'une anomalie lors de la prise de la mesure. Quelle qu'en soit la raison, la limite de visibilité de l'œil humain est estimée entre 750 et 800 nm, selon les individus et les conditions d'observation, ce pic à 770 nm aura donc très peu, voire pas d'influence sur nos observations ultérieures.



Graphique 16 : Spectres de réflexion des lampes à graisse mesurés via un réflecteur parfait.

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

Le diagramme de chromaticité (Figure 81) représente l'ensemble des couleurs en deux dimensions, ce qui permet de s'affranchir de la puissance de l'éclairage produit. La distribution semble surtout dépendre de la graisse utilisée (ce qui est cohérent, puisque les mèches ne se consomment pas) : les lampes à graisse de cerf ont globalement des y plus élevés et des x plus faibles (donc une couleur plus proche du jaune ; Figure 82), celles à graisse de cheval, des y plus faibles et des x plus élevés (valeurs plus proches du rouge ; Figure 82), tandis que les lampes à graisse de bœuf ont des mesures intermédiaires. Cependant, ces différences sont extrêmement faibles (Figure 82) et on observe aussi un chevauchement entre toutes ces mesures. Seul un nombre plus important de mesures permettrait de confirmer cette première observation, et des simulations pour valider ou invalider leur influence sur la couleur perçue de l'environnement.

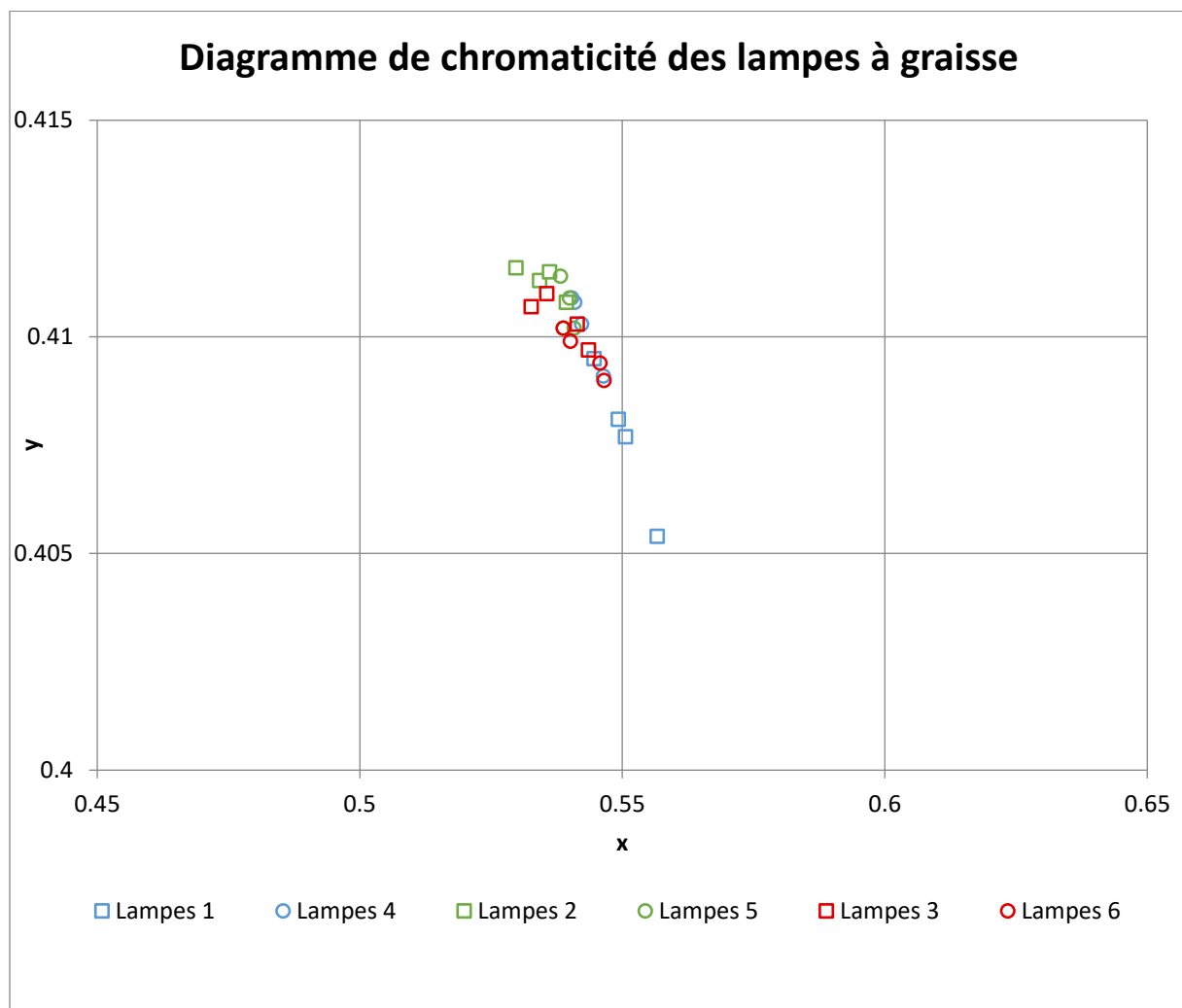


Figure 81 : Diagramme de chromaticité des lampes à graisse.

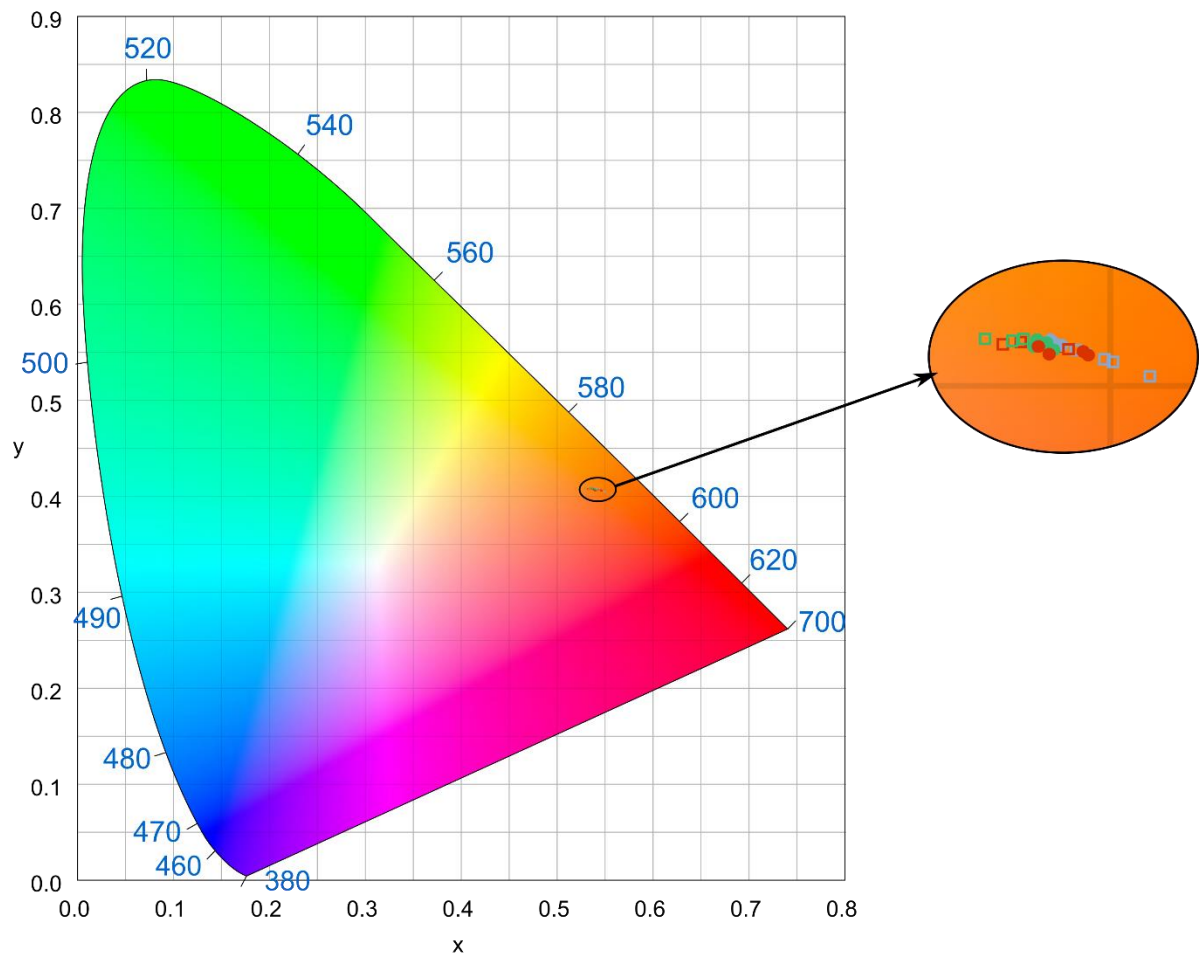
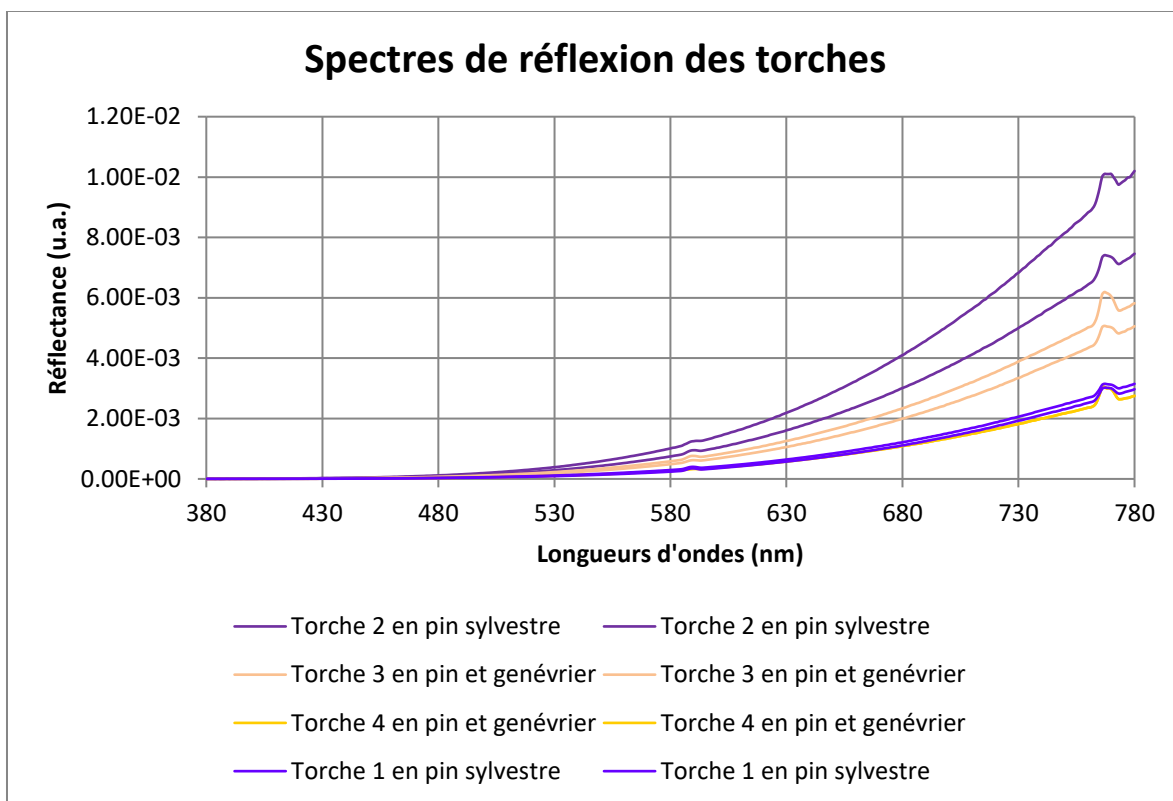


Figure 82 : Localisation des spectres des lampes à graisse sur le diagramme de chromaticité CIE xy.

b) Spectres des torches

Les spectres des torches ont également été enregistrés depuis un réflecteur parfait, et comme pour les lampes à graisse, les spectres de réflexion (Graphique 17) montrent que les couleurs émises sont très chaudes, avec des courbes qui se lèvent à partir de 480 nm et un décrochement autour de 770 nm.



Graphique 17 : Spectres de réflexion des torches mesurés via un réflecteur parfait.

Le diagramme de chromaticité des torches (Figure 83) ne montre pas de distribution préférentielle évidente du spectre selon la nature des combustibles. De plus, les différences sont là encore extrêmement faibles (Figure 84) et probablement non perceptibles à l'œil nu (Figure 84). Le groupe des spectres de torches semble cependant se distinguer du groupe formé par les spectres de lampes à graisse (Figure 84), mais il reste difficile d'estimer si cette différence est ou non perceptible à l'œil nu.

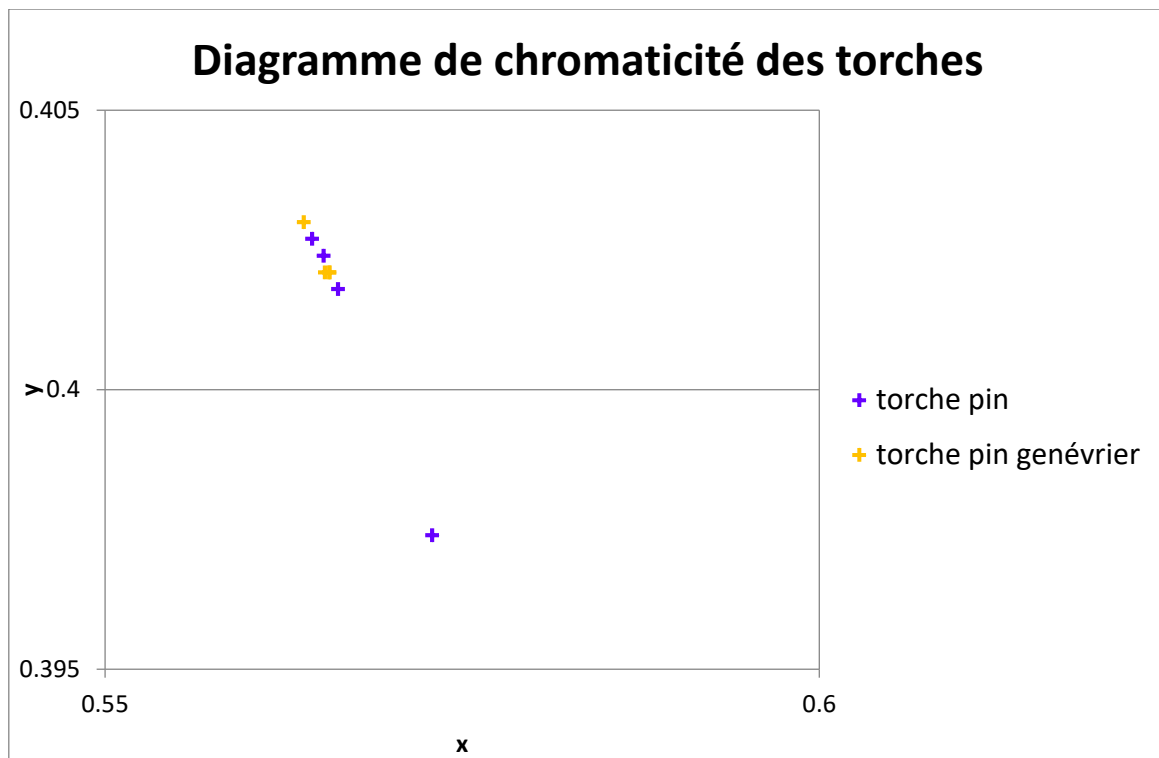


Figure 83 : Diagramme de chromaticité des torches.

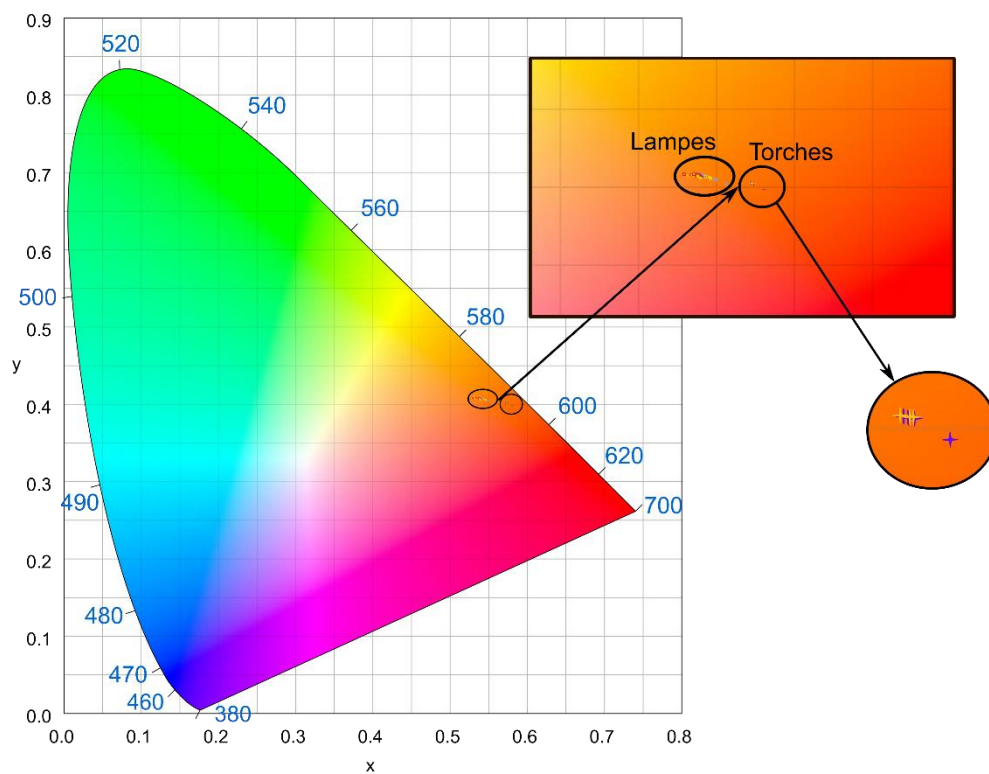


Figure 84 : Comparaison de la localisation des spectres des torches et des lampes à graisse sur le diagramme de chromaticité CIE x,y.

5. Discussion

a) *Les lampes à graisse*

Parmi les six compositions de lampes à graisse, seule l'association entre de la graisse de cheval et une mèche en amadou semble produire un éclairage nettement plus puissant que les autres. Les différences de spectres observées semblent extrêmement ténues, mais seule une intégration au logiciel *Phanie* permettra de vérifier si la graisse utilisée a, ou non, une influence sur la visibilité des couleurs en grotte.

Les lampes à graisse les plus puissantes ainsi créées permettent d'obtenir jusqu'à 5,5 lux (4 lux à l'horizontale de la lampe), au lieu de à peine plus d'un lux dans les expérimentations précédentes (Delluc et Delluc, 1979a et de Beaune, 1983). Avec un tel éclairage, il reste difficile de se déplacer dans le milieu souterrain, en particulier car le sol est très peu éclairé, mais il est tout à fait possible de vaquer à différentes occupations autour de la source et même d'effectuer des tâches fines, comme de la gravure ou la préparation de pigments, dans un rayon plus restreint (un à deux mètres). Il est cependant important de rappeler que ces distances ne sont données qu'à titre indicatif. En effet, la quantité de lumière nécessaire pour se déplacer ou pour réaliser diverses tâches varie en fonction des individus.

b) *Les torches*

Nous n'avons observé aucune différence notable dans les mesures d'éclairement et de spectre entre les torches composées de pin et celles composées de pin et de genévrier. La présence de résine dans le pin apporte une production de flammes plus rapide et plus puissante sans altérer la durée de la combustion, nous nous posons alors la question de l'apport du genévrier : les Préhistoriques l'ont-ils choisi pour son caractère odorant ? Y attachaient-ils des vertus particulières, spirituelles ou purifiantes par exemple ? Ou bien était-il plus présent dans leur environnement, ou plus facile à se procurer ?

c) *Conclusion*

Notre objectif était de proposer un protocole reproductible permettant la fabrication de lampes à graisse et de torches à partir de matériaux et d'outils disponibles au Paléolithique. Nous avons fait le choix de mettre l'accent sur ce protocole, afin qu'il puisse éventuellement servir de point de départ à d'autres travaux sur le sujet plutôt que d'explorer davantage de matières premières. De ce fait, nous avons limité le nombre de types de lampes et de torches à enregistrer. Tout le champ des possibles n'a pas été exploré et de nombreuses perspectives restent ouvertes sur ce travail (voir Section 2.1.D.4. *Perspectives* du Sous-chapitre 2.1.D. *Les sources d'éclairages mobiles paléolithiques : expérimentations*). Pour les mesures, nous avons choisi de reproduire plusieurs lampes et torches du même type afin d'être certain de n'intégrer que des mesures qui s'inscrivent dans la variabilité de ces types de sources. Les résultats que nous avons ainsi obtenus vont nous permettre d'incorporer ces exemples de lampes et de torches préhistoriques dans le logiciel *Phanie*. Il faudrait cependant réaliser et mesurer un nombre de lampes et de torches identiques plus important afin d'être certain que les différences observées soient de véritables tendances et non pas des artefacts.

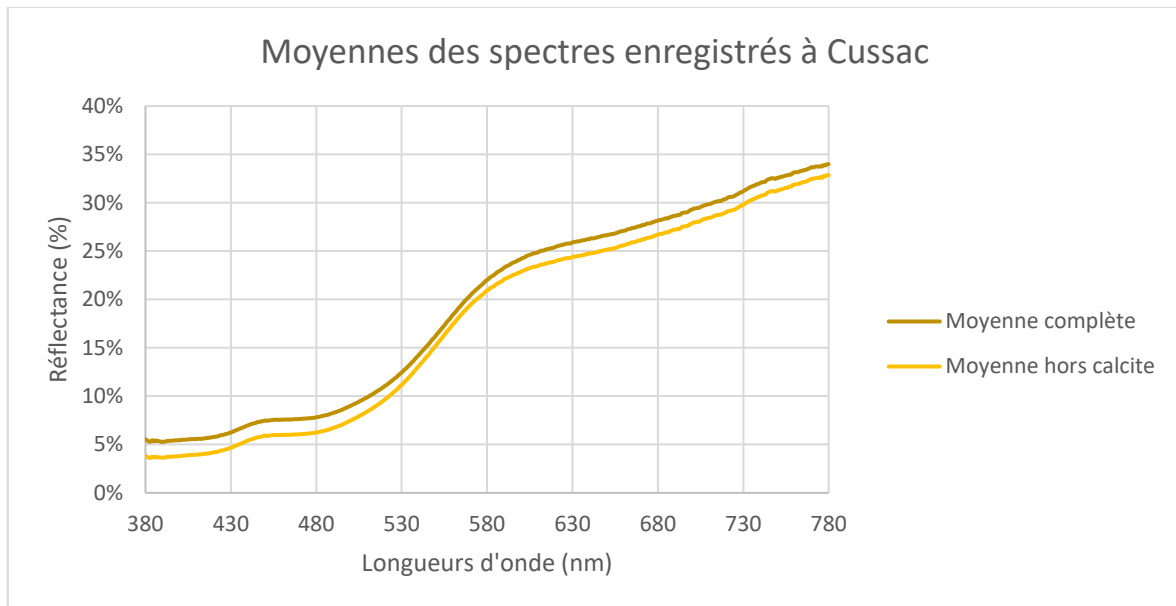
F. Choix des luminaires intégrés dans *Phanie*

1. Comparaison des matériaux

Les matériaux présents dans les grottes ont été, pour cette étude, considérés comme diffus (Section 2.1.C.2. *Résultats des mesures*), et ne sont donc caractérisés dans *Phanie* que par une convolution entre le signal RVB de la texture du modèle 3D et un spectre associé. Il est à l'heure actuelle impossible d'associer chaque matériau à un spectre, c'est pourquoi nous avons décidé d'attribuer un correctif global pour chaque cavité. Nos observations précédentes (Section 2.1.C.2. *Résultats des mesures*) nous ont permis de comprendre que les calcaires d'un même site ont un comportement semblable, ce qui conforte notre choix.

a) *Cussac*

Pour les simulations ayant lieu dans le modèle 3D de la grotte de Cussac, nous avons testé deux types de correctif spectral : un premier correctif complet, c'est-à-dire constitué de la moyenne de l'ensemble des mesures réalisées sur site, et un correctif hors-calcite, c'est-à-dire intégrant l'ensemble des données hormis celles réalisées sur de la calcite, car les résultats précédents ont montré une plus grande variabilité sur ce type de matériaux (Graphique 18).



Graphique 18 : Moyennes des spectres enregistrés dans Cussac, intégrant ou non les mesures réalisées sur de la calcite.

Les résultats (Figure 85) ne montrent aucune différence selon le spectre utilisé lors de la simulation de deux scènes différentes disposant d'un éclairage constitué d'une torche en pin et genévrier. C'est pourquoi nous avons fait le choix, dans les simulations qui vont suivre, d'appliquer le correctif composé de la moyenne de l'ensemble des spectres mesurés (Graphique 19).

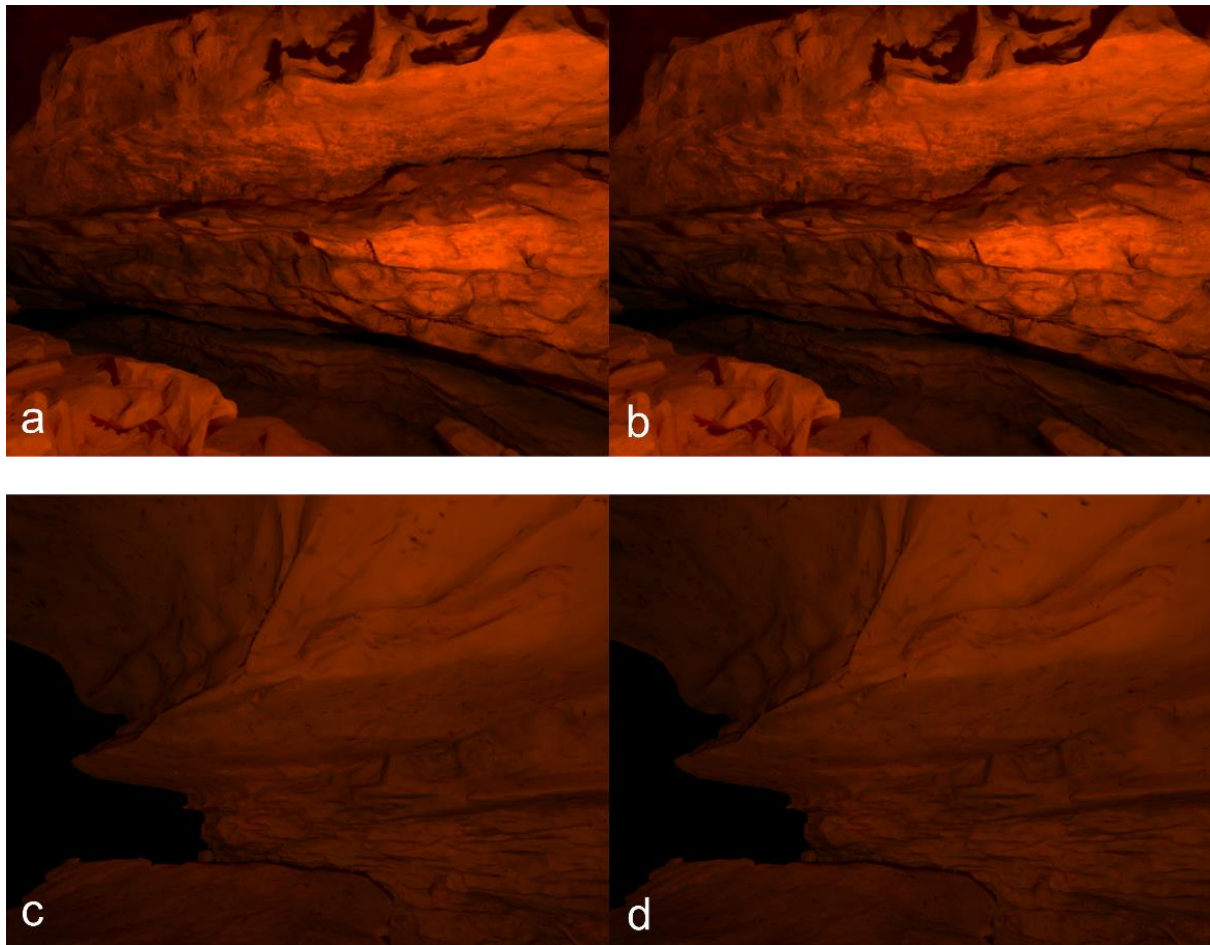
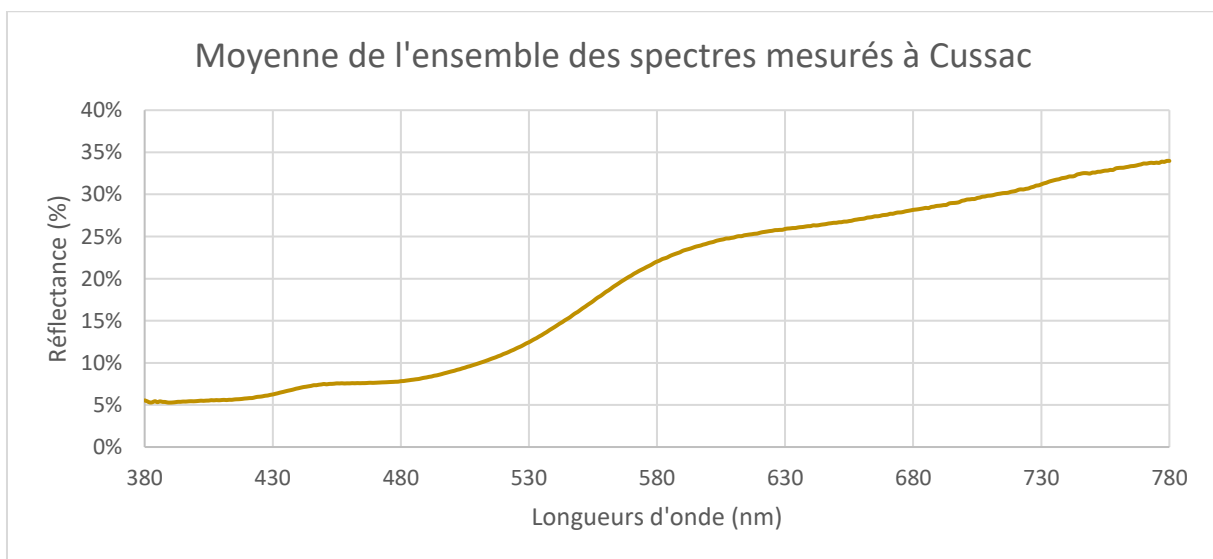


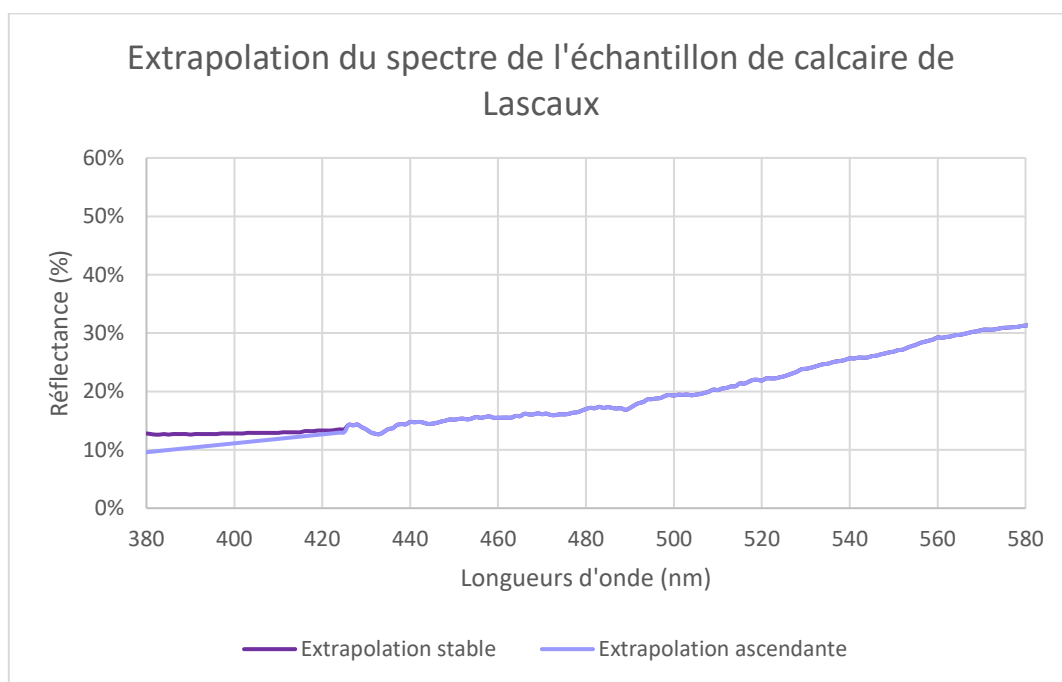
Figure 85 : Comparaison d'une même scène simulée à l'aide d'un éclairage de type torche préhistorique avec un spectre de réflexion des surface différent : a) entrée de la Salle du Panneau de la Découverte, paroi Gauche, spectre sans calcite ; b) entrée de la Salle du Panneau de la Découverte, paroi Gauche, spectre complet ; c) vue sur le Panneau de la Découverte depuis l'amont, spectre sans calcite ; d) vue sur le Panneau de la Découverte depuis l'amont, spectre complet.



Graphique 19 : Spectre intégré dans Phanie lors des simulations dans le modèle 3D de la grotte de Cussac.

b) *Lascaux*

À Lascaux, seules deux mesures sont disponibles, issues d'un échantillon, mesuré sec et humide. Nous avons précédemment sélectionné les mesures humides, mais celles-ci devaient être corrigées. En particulier, une extrapolation des mesures entre 380 et 425 nm a dû être réalisée. Deux hypothèses ont de nouveau été proposées, avec une extrapolation horizontale ou une extrapolation en pente, suivant la pente moyenne des mesures entre 430 et 530 nm (Graphique 20).



Graphique 20 : Extrapolation de la réflectance entre 380 et 425 nm selon deux hypothèses.

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

Les résultats (Figure 86) ne montrent pas de différence visible sur les deux scènes testées, nous avons donc fait le choix, dans les simulations suivantes, d'utiliser pour correctif le spectre avec une extrapolation en forme de pente (Graphique 21).

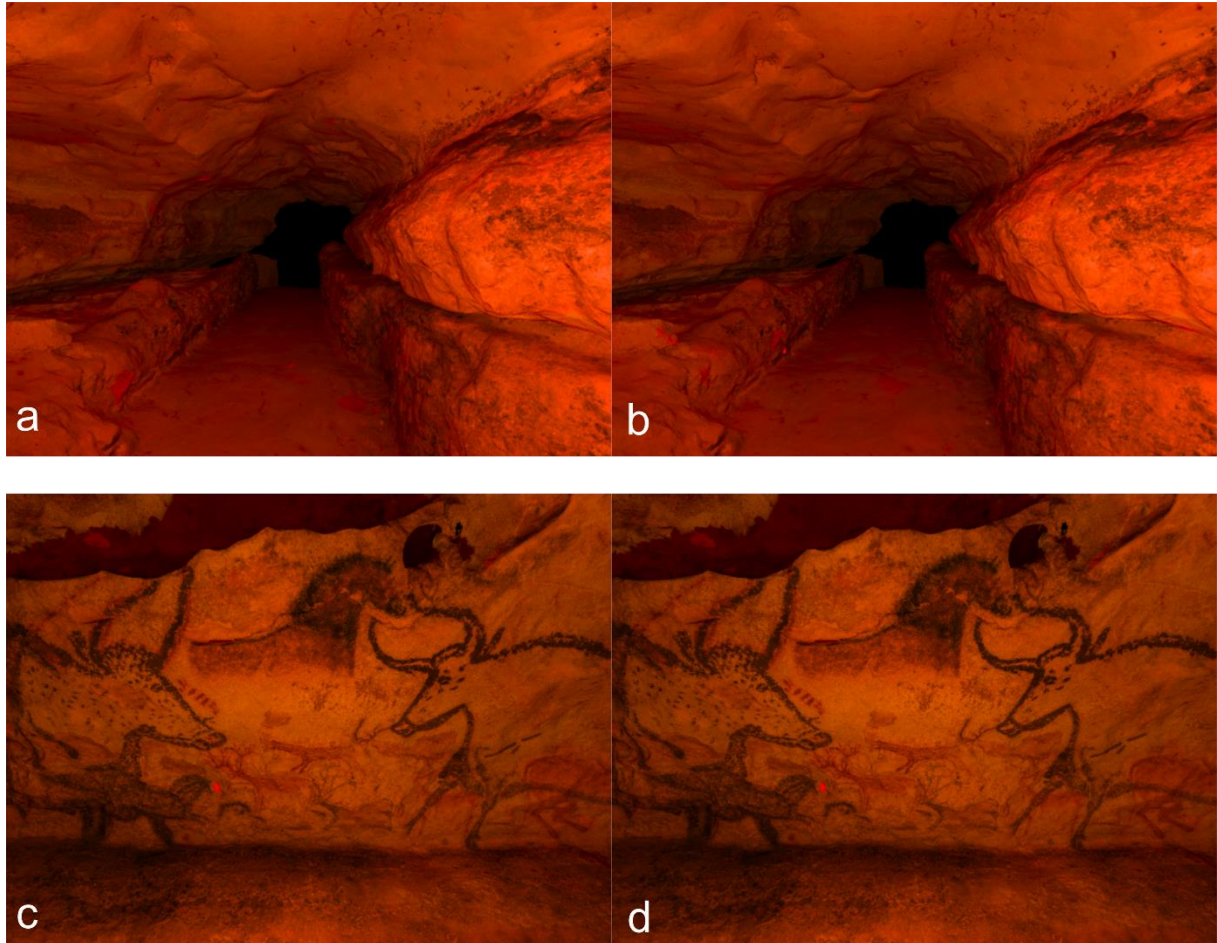
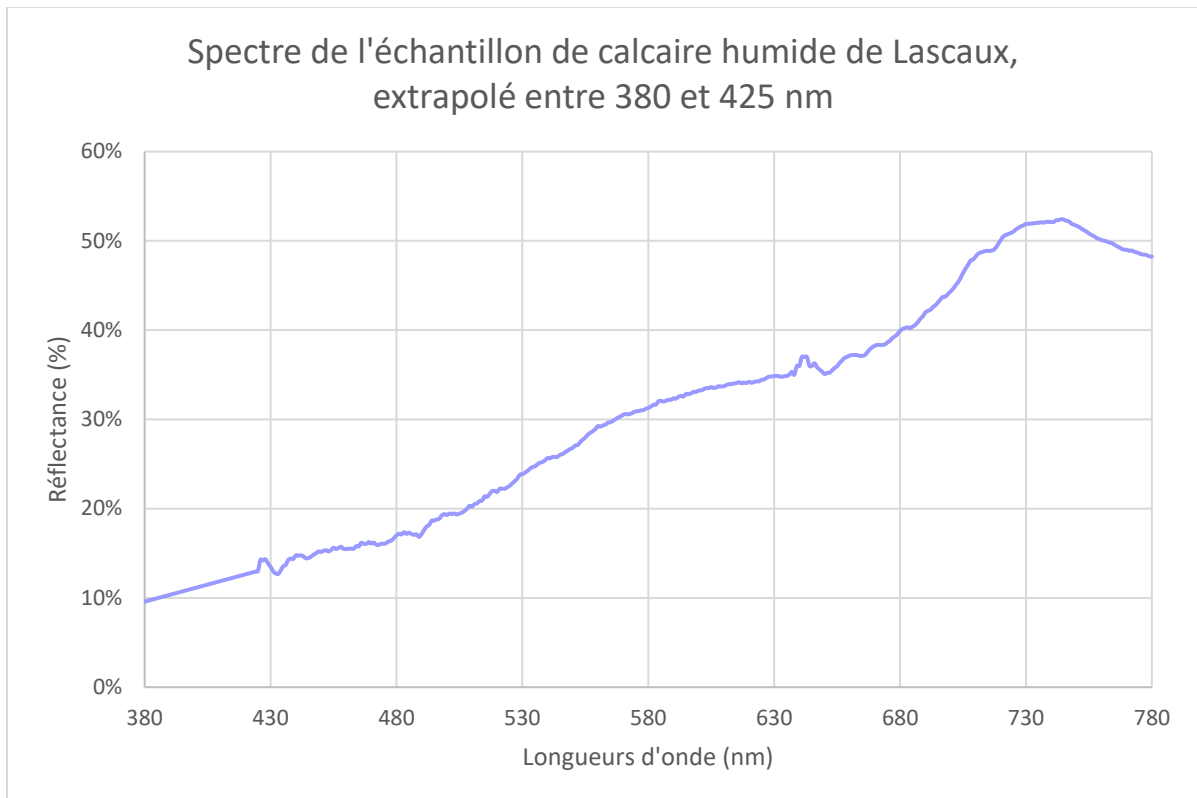


Figure 86 : Comparaison d'une même scène simulée à l'aide d'un éclairage de type torche préhistorique avec un spectre de réflexion des surfaces différent : a) entrée du Passage, spectre avec une extrapolation en forme de pente ; b) entrée du Passage, spectre avec une extrapolation stable ; c) Salle des Taureaux, extrapolation en forme de pente ; d) Salle des Taureaux, extrapolation stable.



Graphique 21 : Spectre intégré dans *Phanie* lors des simulations dans le modèle 3D de la grotte de Lascaux.

c) Conclusion

Ces quelques comparaisons entre différentes hypothèses de correction spectrales ont permis de montrer que de si faibles différences (moins de 10 %) ne sont pas remarquables à l'œil nu. L'utilisation d'un éclairage très chaud, donc très « coloré » accentue peut-être encore ce phénomène.

2. Influence du spectre de l'éclairage

Afin de vérifier si les différences de spectres enregistrées entre les divers types de torches et de lampes à graisse ont un impact sur la lecture d'une image, nous avons simulé une même scène éclairée par un éclairage de même puissance (basée sur la Torche 3) mais dont les spectres sont associés aux diverses torches et lampes à graisses. Cela permettra de sélectionner les spectres qui seront ultérieurement intégrés aux simulations.

a) Résultats

La Figure 87 propose la restitution d'un extrait du panneau de la Salle des Taureaux (Lascaux) éclairé, pour une même intensité lumineuse, selon les spectres des différentes lampes à graisse enregistrées. On peut alors observer que les lampes n°1 et n°6 induisent un rendu légèrement plus orangé que les autres lampes, ceci étant surtout prononcé pour la lampe n° 1 (pour une meilleure estimation des nuances, la figure originale est disponible en Annexe 3).



Figure 87 : Extrait de la Salle des Taureaux éclairée par six spectres différents, correspondants aux spectres moyens des six lampes à graisses enregistrées.

La Figure 88 permet de comparer une partie de la Salle des Taureaux (Lascaux) éclairée par les différentes torches (mais de même intensité lumineuse). L'observation de cette figure ne permet pas de déceler de différence, tant sur les contrastes que sur les couleurs perçues, entre les différents éclairages. Nous émettons alors l'hypothèse que les différences de spectre entre les différentes torches ne sont pas perçues par l'œil humain.



Figure 88 : Extrait de la Salle des Taureaux éclairée par quatre spectres différents, correspondants aux spectres moyens des quatre torches mesurées.

b) Conclusion

Les observations précédentes montrent que les spectres associés aux lampes n°1 et n°6 sont légèrement différents, plus orangés que les autres spectres, cela étant plus marqué pour la lampe n°1, ce qui est cohérent avec la distribution spectrale des lampes à graisse (Section 2.1.E.4. *Données spectrales*). Cela ne semble pas avoir d'incidence sur la lecture des figures, mais dans un souci de transparence le spectre utilisé dans les simulations ultérieures sera systématiquement précisé.

En ce qui concerne les torches, les différents spectres ne semblent pas suffisamment variés pour induire des différences visibles par l'œil humain, c'est pourquoi cette donnée ne sera pas nécessairement précisée lors des futures simulations.

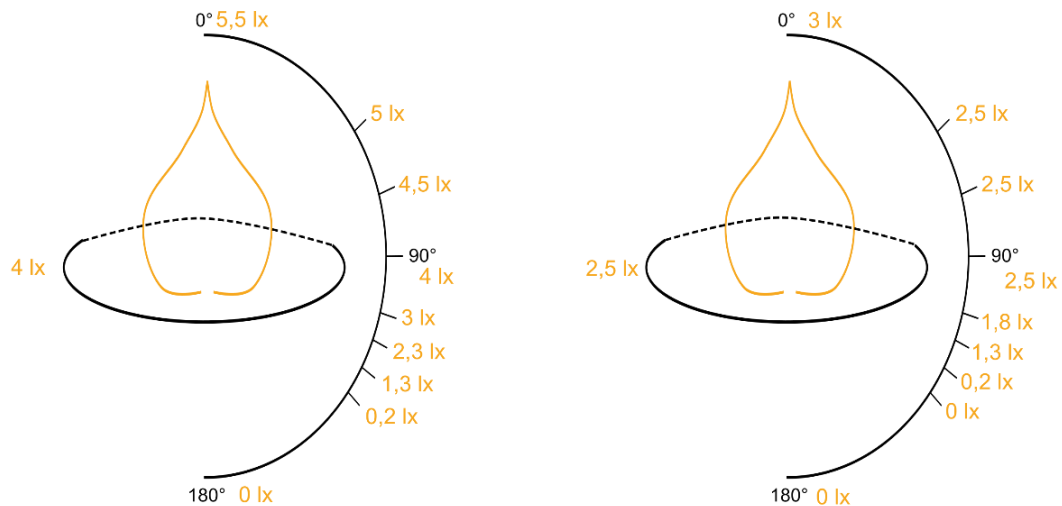
Enfin, il faut noter que les spectres des torches sont visiblement plus orangés que les spectres des lampes, ce qui peut induire, pour une même puissance d'éclairage, des différences significatives dans l'observation d'entités graphiques. Cependant, la différence de puissance entre lampes à graisse et torches est nettement plus conséquente et modifiera la perception des figures et de l'environnement souterrain avec beaucoup plus d'impact.

3. Éclairages intégrés à *Phanie*

a) Lampes à graisse

Les lampes à graisse ont un éclairage très stable dans le temps, nous avons donc intégré :

- Une lampe de type 1B (composée d'amadou et de graisse de cheval) car il s'agit de la lampe la plus puissante que nous ayons enregistrée, et dont le spectre se situe dans le pôle orangé.
- Une lampe de type 3A (composée d'amadou et de graisse de bœuf) car cette lampe nous semble représentative de l'éclairage et du spectre des autres lampes à graisse. La Figure 89 représente les valeurs d'éclairage intégrées au logiciel.



Lampe 1B : Amadou et graisse de Cheval

Lampe 3A : Amadou et graisse de Boeuf

Figure 89 : Valeurs d'éclairage intégrées dans *Phanie* pour caractériser les lampes à graisse.

b) Torches

Nous avons observé précédemment que les spectres émis par les torches sont tous extrêmement proches et produisent une couleur d'éclairage identique à l'œil nu.

Afin de simplifier les simulations qui vont suivre, nous avons décidé de n'intégrer au logiciel que trois types de torches dans *Phanie* (le choix de la torche utilisée sera précisé pour chaque simulation) : la Torche n°4 vers 4 min 30 de fonctionnement, ce qui correspond à la valeur d'éclairage d'un plateau haut, la moyenne de la Torche n°3, associée à la moyenne globale de fonctionnement d'une torche, et la Torche n°2 vers 10 min de fonctionnement, ce qui concorde avec une torche en fin de régime. La Figure 90 précise les valeurs d'éclairage intégrées dans *Phanie*.

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

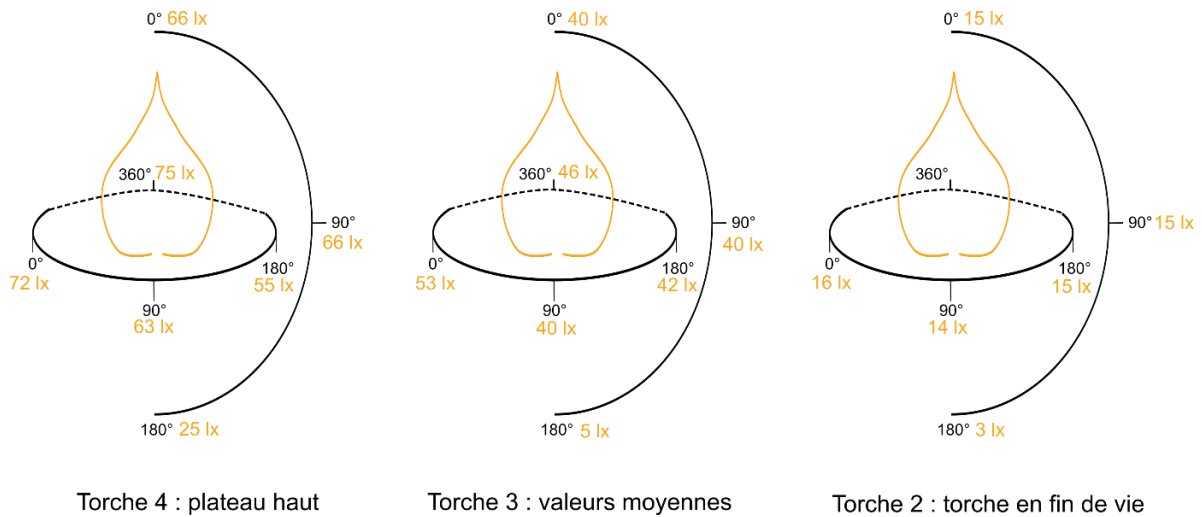


Figure 90 : Valeurs d'éclairage des torches intégrées dans Phanie.

4. Conclusion

Afin de simplifier l'utilisation du logiciel, nous avons décidé de n'intégrer qu'un spectre pour corriger les parois de Cussac, et un autre pour les parois de Lascaux. De la même manière, afin de ne pas avoir dix sources différentes possibles, sans différence nette entre elles, nous avons réalisé une sélection des sources incorporées à *Phanie*. Nous avons ainsi intégré trois torches, de puissance forte, moyenne, ou faible et de spectre identique, ainsi que deux lampes à graisses correspondant aux lampes 1B, puissante et plus orangée, et 3A, de puissance et de spectre moyen.

CHAPITRE 2 - *ICARE*, LOGICIEL DE SIMULATION ACOUSTIQUE

Comme il a déjà été souligné, réaliser des simulations dans des modèles 3D au lieu d'effectuer des mesures *in situ* prend tout son sens dans un cadre conservatoire de plus en plus strict avec des accès aux cavités limités dans le temps, l'espace, et les actions qui peuvent y être menées. Les simulations permettent de surcroît de simuler l'environnement paléolithique de la grotte, et donc d'obtenir des résultats qui s'approchent des conditions de l'époque. Afin de s'approcher au maximum de la réalité, les simulations acoustiques doivent être réalisées à partir de calculs qui intègrent les phénomènes physiques entrant en jeu lors de l'émission et de la propagation des sons : caractéristiques physiques du ou des sons émis, comportement biologique de l'oreille humaine, et influence de la morphologie et de la nature des parois et sols des cavités sur la diffusion du son. L'objectif de ces simulations est d'apporter des éléments concernant la perception et l'appropriation du milieu souterrain par les Paléolithiques : l'écholocalisation (capacité à s'orienter en émettant des sons) pouvait-elle constituer une aide au déplacement et à la compréhension de la topographie souterraine (Reznikoff, 2008, 2012) ? Y-a-t-il un lien entre espace graphiquement investi et qualités sonores de ce même espace ?

Devant l'absence de logiciel commercial permettant de répondre à ces questions, nous avons travaillé en partenariat avec le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) basé à Marne-la-Vallée (Seine-et-Marne) afin d'utiliser *Icare*, un logiciel de simulation acoustique en contexte urbain ou d'habitat en développement au CSTB (Noé *et al.*, 2009 ; 2012), de nous y former puis de l'adapter à nos besoins¹⁹.

Dans ce chapitre sur le logiciel *Icare*, nous proposons de décrire l'ensemble des étapes qui ont été nécessaires à sa mise en œuvre : fonctionnement du logiciel, données qu'il a été nécessaire d'acquérir, et mesures et simulations réalisées afin de rendre le logiciel opérationnel dans le cadre de notre étude, tout en commençant par la description des phénomènes impliqués dans l'acoustique.

¹⁹ Nous souhaitons ici renouveler nos remerciements envers Nicolas Noé qui nous a formé au logiciel et qui nous a aidé à l'adapter à nos besoins.

A. Phénomènes impliqués²⁰

1. Le son

Le son provient de la perturbation physique d'un milieu fluide (comme l'air) qui amène à de rapides fluctuations de sa pression se propageant sous la forme d'une onde. La vitesse du son dépend de la densité du milieu, de son taux d'humidité et de sa température. Le son, depuis son émission, se propage en ligne droite dans toutes les directions. Il est caractérisé par sa fréquence, son intensité et son timbre. Un son est constitué d'une seule fréquence mais l'ensemble des sons de l'environnement produit un spectre qui, perçu par le cerveau, va être interprété comme une image sonore. Ces caractéristiques sont dans un premier temps définies par la source sonore, qui correspond à un phénomène (d'origine biologique ou mécanique) qui provoque la vibration de l'air. Dans un second temps, ces caractéristiques vont être modifiées par les éventuels obstacles rencontrés par l'onde. Les objets rencontrés, selon leurs propriétés, vont absorber une partie du son (l'absorption est généralement plus importante pour les sons aigus que pour les graves) et en réfléchir ou diffuser une autre partie. En particulier, lorsque la longueur d'onde est de la même taille que l'obstacle ou que les irrégularités d'un support, il y aura diffusion (Figure 91).

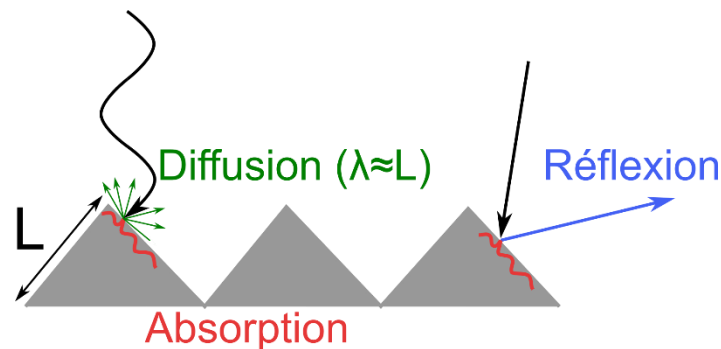


Figure 91 : Schéma de la diffusion, de la réflexion et de l'absorption d'une onde au contact avec un objet, Calvet, 2019.

²⁰ L'ensemble des informations concernant les phénomènes physiques décrits ici sont issues d'ouvrages généralistes ou à destination des étudiants : Calvet, 2019 ou Turrier, 2015.

2. Propriétés du son

Un son se distingue par quatre caractéristiques :

- La direction

Les ondes sonores se propagent en ligne droite à vitesse constante dans un même milieu (340 m/s dans l'air à 15° C.). La perception du son par l'oreille humaine permet d'interpréter la direction de sa source.

- L'intensité, ou volume sonore

L'intensité, ou volume, dépend de la pression acoustique créée par la source (c'est-à-dire du nombre de particules affectées par la vibration). Le volume sonore peut être exprimé en intensité acoustique (en watt/m²) ou en pression acoustique (en pascals, soit newton par mètre carré). Ces notions physiques ne prennent pas en compte la perception humaine et nous ne les utiliserons donc pas.

L'intensité peut également être exprimée en décibels (dB), de 0 dB, seuil de l'audition humaine, à plus de 120 dB, niveau très élevé, douloureux et nocif pour l'oreille (Tableau 16). C'est une grandeur sans dimension qui correspond au logarithme décimal de la puissance (pour une augmentation du volume de 10 dB, le son est perçu comme deux fois plus fort) dont l'unité de base (1 décibel) correspond à peu près à la plus petite variation de volume sonore perceptible par l'être humain. Ainsi, l'oreille humaine standard (c'est-à-dire d'un homme adulte en bonne santé) peut discerner une différence de niveau de 1 dB.

Le volume du son s'atténue en se propageant, cet amortissement étant plus marqué, à intensité égale, sur les hautes fréquences (sons aigus) que sur les basses (sons graves).

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

0 dB	Seuil de l'audition, au-dessous duquel aucun son n'est perceptible chez l'humain
0 à 10 dB	Volume ambiant dans un local d'essais acoustiques
20-25 dB	Studio d'enregistrement, jardin, bruit des oiseaux ou des insectes
25 à 35 dB	Conversation chuchotée, chambre calme
35 à 55 dB	Bureau, salles de classe, rue
55 à 75 dB	Conversation, lieux de vie, aspirateur, intérieur de voiture
75 à 90 dB	Voix criée, rue animée, trafic routier
90 à 110 dB	Concert, tronçonneuse à chaîne
110 dB et plus	Avion au décollage, engin industriel, arme à feu

Tableau 16 : Exemples du niveau de quelques ambiances sonores à proximité immédiate de la source (Calvet, 2019, Turrier, 2015).

- La hauteur, ou fréquence

La hauteur est définie par la fréquence de vibration de l'objet créant le son : plus l'objet vibre rapidement, plus le son sera aigu. Le nombre de vibrations par seconde s'exprime en hertz. Le spectre audible par l'humain (de 16 Hz à 20 000 Hz environ, au-dessus on parle d'ultrasons et au-dessous d'infrasons) est divisé en octaves, une octave représentant l'intervalle séparant deux fréquences dont l'une est le double de l'autre.

La plupart des sources sonores produisent des sons complexes, composés d'une fréquence fondamentale et d'harmoniques (multiples entiers de cette fréquence fondamentale).

- Le timbre, ou couleur

Le timbre est ce qui permet d'identifier la source. Il est entre autres caractérisé par le nombre et l'intensité des harmoniques qui composent le son. Par exemple, deux instruments différents peuvent jouer un La 440 Hz à même puissance, mais si la fréquence fondamentale (440) est la même, le nombre et l'intensité de leurs harmoniques respectives seront différentes et permettront à l'oreille de distinguer les deux instruments.

Le timbre est une caractéristique complexe qui prend également en compte les relations entre les parties du spectre, l'évolution dynamique globale du son et de chacun des éléments, etc.

3. Fonctionnement de l'oreille humaine

L'oreille est l'organe qui nous permet de percevoir les sons. Elle est composée de trois parties :

- L'oreille externe, qui comprend le pavillon et le conduit auditif (Figure 92). Le pavillon collecte les sons et permet de déterminer l'angle d'arrivée du son, tandis que le conduit auditif les guide jusqu'au tympan qui est mis en vibration.
- L'oreille moyenne, constituée du marteau, de l'enclume et de l'étrier, qui transmettent les mouvements du tympan à l'oreille interne.
- L'oreille interne, qui contient entre autres la cochlée, organe de l'audition abritant environ 15 000 cellules ciliées qui vont vibrer sous l'action du marteau et de l'enclume. Elles vont ensuite transformer les sons en influx nerveux jusqu'au nerf auditif, qui va transmettre l'information au cerveau.

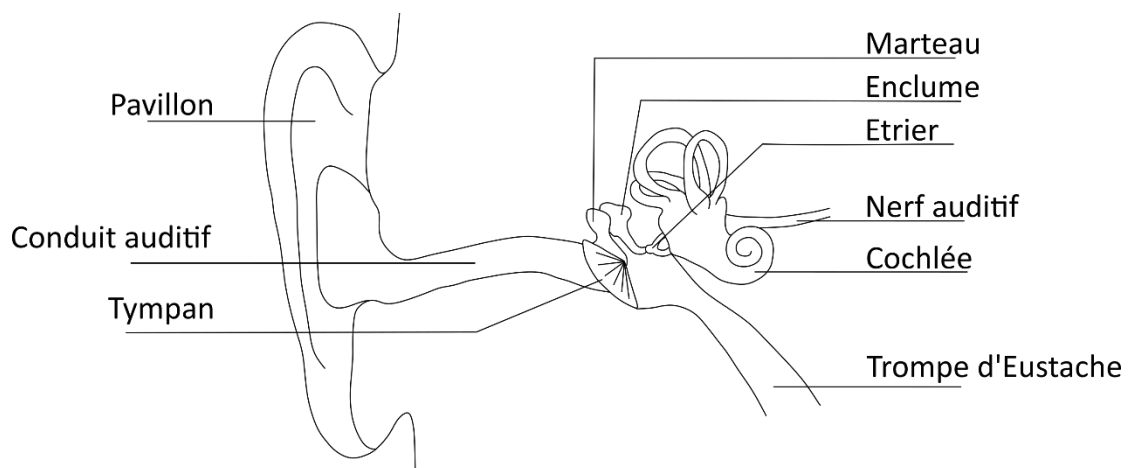


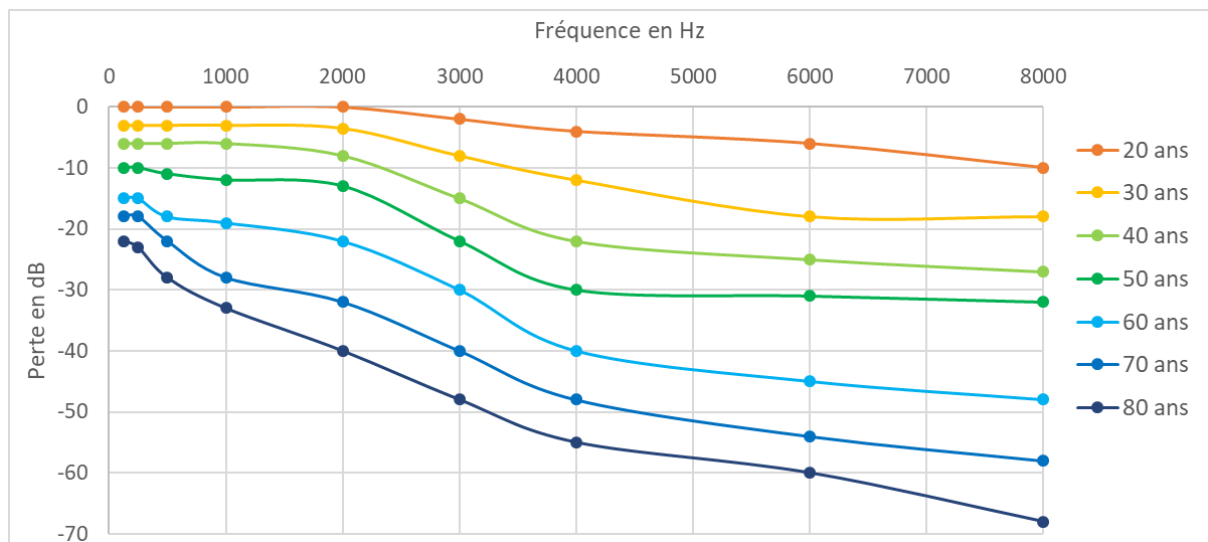
Figure 92 : Schéma des organes de l'audition chez l'humain, d'après Turrier, 2015.

Nos deux oreilles sont placées des deux côtés de la tête, écartées d'environ 15 à 20 cm. De ce fait, le son n'y arrive pas en même temps, ce décalage étant interprété par le cerveau pour localiser la source du son.

Comme pour la vue, l'ouïe varie en fonction de l'âge, et la sensibilité de notre oreille dépend de la fréquence. Ainsi, la sensibilité maximale de l'oreille est située aux environs de 1 000 Hz, et est perçue dès 0 dB, alors que les fréquences très hautes nécessitent une intensité plus

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

importante pour être perçue, selon l'âge de l'individu (Graphique 22). Une discussion normale étant située entre 20 et 50 dB, l'âge impacte surtout la distinction des harmoniques des voix humaines. En effet, si les fréquences fondamentales de la voix humaine sont comprises entre 60 Hz (pour les basses les plus graves) et plus de 1 200 Hz (pour les sopranos les plus aigües), le spectre moyen est situé autour de 125 Hz pour les hommes adultes, 210 Hz pour les femmes et de 300 Hz pour les enfants (chez les populations occidentales modernes) mais les harmoniques émises peuvent atteindre plus de 15 000 Hz.



Graphique 22 : Courbe audiométrique de la perte auditive moyenne en fonction de l'âge et des fréquences. D'après Guinchard et al., 2017.

Si l'âge a une influence sur la perception des sons, d'autres facteurs influent sur l'identification de ces derniers, en particulier des phénomènes d'ordre culturel, de l'expérience individuelle voire de l'entraînement ou encore de l'environnement naturel. Puisque nous appartenons à la même espèce, il peut être admis que l'oreille et le fonctionnement cérébral des Préhistoriques était morphologiquement semblables à ceux de l'Homme actuel et que leur fonctionnement était identique (Davis W., 1986 ; Holloway, 1999), cependant nous ne pouvons pas savoir dans quelle mesure son environnement tant naturel que culturel a pu ou non influencer leur perception et leur interprétation des sons.

4. L'acoustique architecturale

L'acoustique architecturale est la science qui étudie la propagation des sons dans les bâtiments. Elle dispose d'outils qui vont permettre d'aider à la prise de décision lors de la conception d'une salle de spectacle ou de tout autre bâtiment (gare, lieu de travail, salles de cinéma, etc.).

Le temps de réverbération (TR) est le premier critère qui va permettre de décrire l'acoustique d'un espace clos, puisqu'il est directement lié aux propriétés d'absorption et de réflexion des parois. Cependant, d'autres mesures permettent de décrire l'acoustique d'un espace : la clarté de la voix (C50 et C80), le temps de décroissance précoce (« *Early Decay Time* » ou EDT), ou encore la définition des sons (D50). L'ensemble de ces critères est déduit de la réponse impulsionnelle (RI). Celle-ci est une mesure réalisée en divers points de l'espace étudié, et consiste à produire une impulsion sonore couvrant un large panel de fréquences et à enregistrer la réponse du milieu en fonction du temps et de la fréquence (Figure 93).

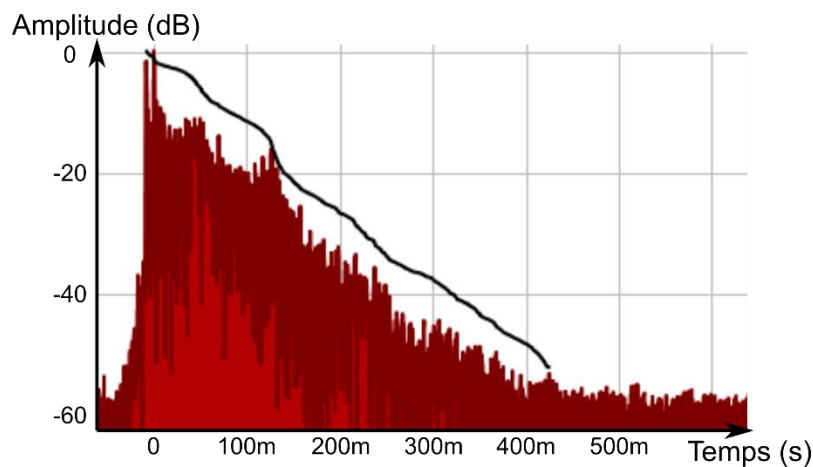


Figure 93 : Schéma d'une réponse impulsionnelle basée sur la RI de la Salle Froide de la grotte de Leye (24).

B. Le logiciel *Icare*

1. Besoins initiaux

Comme pour l'éclairage, nous avons dans un premier temps listé nos besoins puis cherché un logiciel capable de les satisfaire. Ainsi, le logiciel recherché devait pouvoir :

- Prendre en compte un modèle 3D à la morphologie complexe.
- Tenir compte de la nature des différents matériaux présents dans un contexte karstique et de leur influence sur la réflexion du son.
- Calculer la réponse impulsionnelle afin d'analyser l'espace à travers des critères d'acoustique architecturale.
- Proposer une restitution sonore (auralisation)
 - o en simulant divers sons (voix humaines de fréquences variées, instruments de musiques) ;
 - o en proposant un récepteur du signal sonore se comportant comme l'oreille humaine, soit deux récepteurs (deux oreilles) orientés.
- Simuler une ou plusieurs sources fixes ou mobiles.
- Simuler un ou plusieurs récepteurs fixes ou mobiles.
- Simuler des échos.
- Simuler un groupe de personnes et considérer son influence sur l'acoustique d'un espace.

Comme pour la simulation d'éclairage, nous avons été confrontée à l'absence de logiciels aisément accessibles qui permettent de couvrir l'ensemble de nos besoins. Nous avons donc de nouveau fait appel au CSTB dont le département Acoustique et Éclairage développe un logiciel, « *Icare* », qui permet de simuler des sons dans un modèle 3D complexe, et propose à la fois une restitution des sons simulés (auralisation) et le résultat de la RI sous forme d'un diagramme. Cependant, trois critères ont dû être écartés : « simuler une source ou un récepteur **mobile** », « Simuler un groupe de personnes et considérer son influence sur l'acoustique de l'espace » et « Simuler des échos », points techniquement impossibles à l'heure actuelle avec ce logiciel.

Le logiciel *Icare* permet de calculer des effets de propagation acoustique dans un environnement complexe, à condition de disposer d'un modèle 3D de cet environnement et des caractéristiques acoustiques de chacun de ses composants. Le modèle 3D peut être bouché ou ouvert sans que cela ne fausse les calculs tant que cela correspond à la réalité. Il permet notamment de calculer les effets de réflexion, de diffusion et d'absorption qui ont lieu entre une source et un récepteur à l'aide des méthodes combinées dites du tir de faisceau et du lancer de particules.

2. Données d'entrée

Icare nécessite trois types de données d'entrée pour pouvoir fonctionner : une source, un récepteur, et un modèle 3D auquel sont attachées les caractéristiques acoustiques des matériaux présents selon un découpage spatial. Par exemple, le sol virtuel sera lié à la caractéristique acoustique de sédiments tels que l'argile ou du sable, les parois calcaires à la caractéristique acoustique du calcaire, etc.

La source peut être représentée par une impulsion basique préenregistrée dans le logiciel, mais aussi par des enregistrements de sons divers et de durées variables qui doivent avoir été enregistrés en chambre anéchoïque (salle dont les parois absorbent toutes les ondes sonores, de sorte que seul le signal émis par la source est enregistré). De tels enregistrements sont surtout utilisés dans le cadre de l'auralisation alors que l'impulsion basique est utilisée pour calculer la réponse impulsionnelle.

Les récepteurs peuvent être uni ou binauraux, cette dernière solution permettant une meilleure auralisation puisqu'elle reproduit l'influence de la tête et des oreilles sur la perception sonore. Pour cela, des mesures doivent être réalisées sur un témoin.

Enfin, *Icare* nécessite un modèle 3D où chaque matériau présent est associé à sa réponse acoustique. Pour cela, il faut attribuer à chaque type de matériau présent son coefficient d'absorption acoustique sous la forme d'une texture associée au modèle 3D.

3. Fonctionnement du logiciel

Pour pouvoir simuler des sons dans un logiciel, une source virtuelle simule une émission d'ondes sonores dont les caractéristiques (fréquence, intensité, timbre) sont connues, pour que le logiciel puisse calculer les trajets empruntés par l'ensemble de ces ondes en tenant compte de l'influence d'éventuels obstacles jusqu'à l'arrivée de ces ondes au récepteur. Cependant les méthodes de calcul exactes sont très longues, nécessitent un maillage particulièrement fin et une très bonne précision des caractéristiques des matériaux. De plus, il est impossible de réaliser ce calcul pour toutes les ondes, celles-ci étant en nombre infini dans la réalité.

Icare, pour simplifier l'étape de calcul, combine deux méthodes : le début de la réponse impulsionnelle, marqué par les pics les plus importants (Figure 94), est calculé à l'aide de la méthode du « tir de faisceau » où chaque trajet est précisément calculé. Le nombre N de trajets est choisi par l'utilisateur : plus il sera important, plus le signal sera précis, mais plus le temps de calcul sera long. La seconde partie de la RI, marquée par les réflexions spéculaires tardives et les phénomènes de diffusion, est calculée par la méthode du « lancer de particules ». Pour ce faire, la source émet un nombre de particules très important mais fini (plusieurs millions, dont le nombre exact est également choisi par l'utilisateur) et le logiciel compte le nombre de particules présentes autour du récepteur en fonction du temps, ce nombre étant proportionnel à l'intensité acoustique perçue.

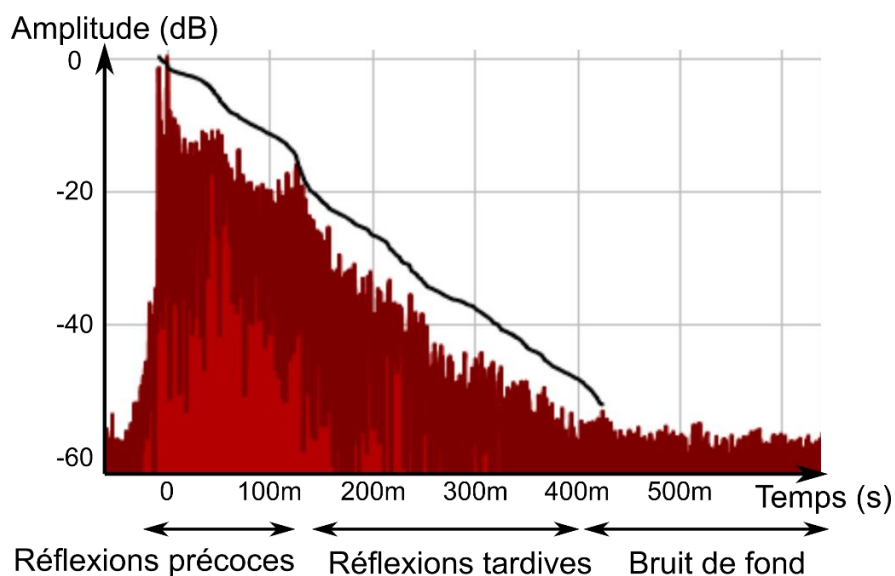


Figure 94 : Schéma d'une réponse impulsionnelle mesurée dans la Salle Froide de grotte de Leye avec réflexions précoces et réflexions tardives et diffuses.

Les étapes d'utilisation du logiciel depuis l'obtention des données d'entrée jusqu'au calcul des réponses impulsionnelles et du rendu audio sont résumées par la figure suivante (Figure 95) :

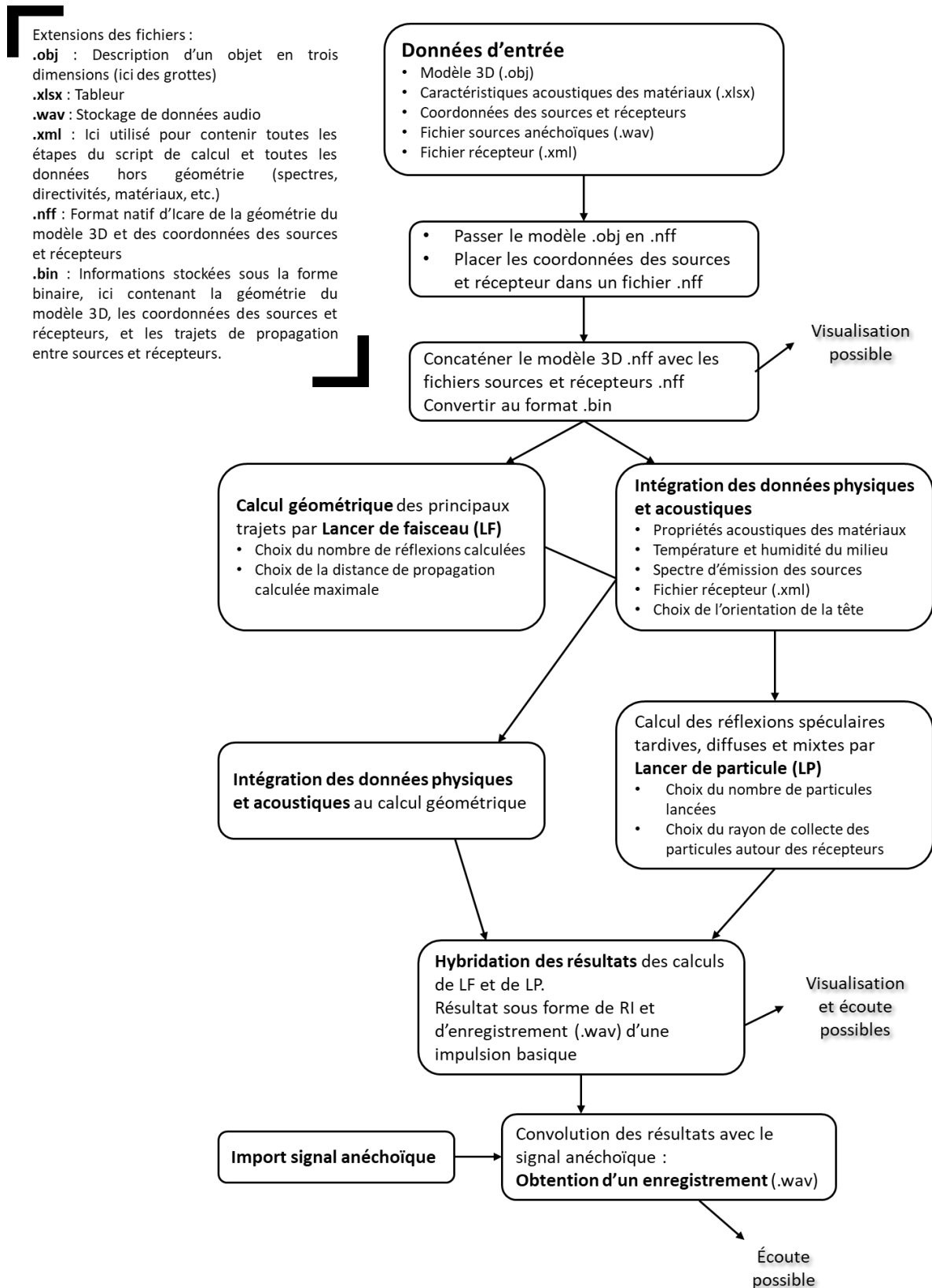


Figure 95 : Étapes de fonctionnement du logiciel Icare.

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

On peut ainsi observer qu'il est possible de modifier plusieurs données (outre les données d'entrée :

- Des données spécifiques à la grotte modélisée (température et taux d'humidité du milieu).
- Des données qui vont agir sur le rapport rapidité/précision du calcul (nombre de réflexions précisément calculées et distance de propagation maximale des ondes calculées lors de la phase de lancer de faisceau, choix du nombre de particules lancées et du rayon de collecte de ces particules autour des récepteurs dans le calcul par lancer de particules).
- Des données uniques au calcul (orientation du récepteur, donc de la tête et des oreilles).

4. Données de sortie

L'ensemble des calculs débouche d'une part sur la création du diagramme de la réponse impulsionnelle, et d'autre part sur la restitution du son envoyé par la source à la position du ou des récepteurs au format .wav. Pour une meilleure interprétation du résultat, l'auralisation doit être écoutée au casque.

C. Choix et méthode d'obtention des données d'entrée

Comme nous l'avons vu précédemment, *Icare* nécessite plusieurs données d'entrée : des sources (format .wav) enregistrées en chambre anéchoïque, un récepteur (dont les caractéristiques correspondent à celle de la tête et des oreilles humaines, enregistrées sous le format .xml), et un modèle 3D (au format .obj) auquel sont rattachées les propriétés acoustiques des matériaux présents.

1. Enregistrements anéchoïques

Une chambre anéchoïque acoustique (ou « chambre sourde » ; Figure 96) est un espace fermé dont les parois absorbent la quasi-totalité des ondes sonores. L'intérêt d'un enregistrement effectué dans ces conditions est d'obtenir un signal source pur, c'est-à-dire non influencé par d'éventuelles réverbérations sur des parois. Dans notre cas, l'influence des parois sur la propagation du son est calculée par le logiciel, nous avons donc besoin d'un signal source qui ne soit pas déjà influencé par d'éventuelles réverbérations.

De tels enregistrements peuvent être effectués après réservation d'un local, mais quelques enregistrements sont disponibles en libre accès en ligne (par exemple : <https://odeon.dk/downloads/anechoic-recordings/>, <https://research.cs.aalto.fi/acoustics/virtual-acoustics/research/acoustic-measurement-and-analysis/85-anechoic-recordings.html>). Nous avons décidé, dans un premier temps, de n'utiliser que des enregistrements disponibles en libre accès afin de disposer d'un premier aperçu des possibilités du logiciel et de définir dans quelles circonstances il serait pertinent de simuler des sons particuliers, tels des instruments de musique préhistoriques.

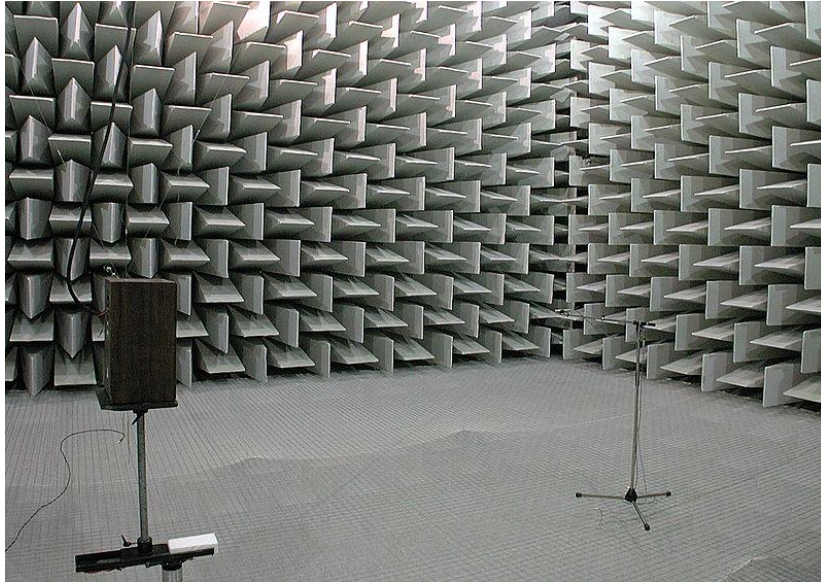


Figure 96 : Chambre anéchoïque du Laboratoire national de métrologie et d'essais (Paris ; J.-P. Roche)

2. Le récepteur

Le récepteur peut consister en une récupération brute du résultat sonore, mais cette méthode produit un rendu monophonique, qui, de plus, ne prend pas en compte l'influence de la morphologie de l'oreille externe (en particulier de l'orientation du pavillon) et de son implantation sur la tête. Pour proposer une restitution prenant en compte ces points, il est nécessaire de se procurer des mesures préalablement réalisées sur un témoin. Les morphologies individuelles du pavillon de l'oreille et de la tête ont très peu d'influence sur la perception et l'interprétation des sons au regard de la morphologie interne des oreilles et de l'expérience individuelle. C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser un échantillon d'oreilles pré-enregistrées au CSTB qui sera utilisé lors des auralisations. Les réceptions monophoniques vont également être utilisées lorsque seule la mesure du temps de réponse sera recherchée, puisque la biphonie n'a pas particulièrement d'influence sur cette mesure et cela permet de raccourcir la durée du calcul.

3. Propriétés acoustiques des matériaux

Un coefficient d'absorption acoustique des matériaux doit être intégré dans le modèle 3D. Pour cela, les matériaux peuvent être analysés en laboratoire, mais comme il est impossible de réaliser un échantillonnage exhaustif de tous les matériaux présents dans les deux cavités qui nous intéressent, à savoir Lascaux et Cussac, nous avons mis en place une méthodologie à deux volets. Quelques échantillons de matériaux ont été prélevés pour être mesurés au tube de Kundt, mais leur petit nombre (dû à la difficulté d'effectuer des prélèvements dans le milieu souterrain, plus particulièrement en contexte orné) nous a amené, en parallèle, à réaliser des mesures de réponse impulsionnelle sur le terrain dans les grottes de Cussac et de Leye. Les mesures réalisées sur les matériaux ont permis au logiciel de calculer des réponses impulsionnelles, et de les comparer avec celles réellement mesurées sur le terrain. Il a alors été possible d'affiner les propriétés acoustiques des matériaux afin d'obtenir des réponses se rapprochant au maximum de la réalité.

D. Mesures des propriétés acoustiques des matériaux

1. Mesures au tube de Kundt

Trois types de roches calcaires issues des sites de Leye, Cussac et Lascaux (ou à leur proximité), de la calcite du site de Coudoulous et de l'argile du site de Veyssou ont été envoyés pour mesure du coefficient d'absorption acoustique au tube de Kundt au département d'essais acoustiques du CSTB de Marne-La-Vallée²¹. Plus précisément, ce sont, six échantillons de Lascaux, quatre de Cussac, quatre de Leye, quatre blocs de calcite et près d'un kilogramme d'argile qui ont été fournis (photographies en Annexe 4).

a) Fonctionnement du tube de Kundt

Le tube de Kundt est un dispositif permettant de mesurer le coefficient d'absorption acoustique d'un matériau (Figure 97). Il s'agit d'une méthode dite de fonction de transfert régie par la norme NF EN ISO 10534-2. L'échantillon de matériau (aussi appelé « éprouvette »), de dimensions standardisées (ici entre 8 et 30 mm d'épaisseur et \varnothing 42 mm), est placé à une extrémité du tube. Un haut-parleur est placé à l'autre extrémité et émet des ondes sonores selon un balayage des basses aux hautes fréquences, de 200 à 4 000 Hz dans notre cas. L'onde émise, par réflexion entre les deux extrémités du tube, va former une onde stationnaire. Deux microphones disposés dans le tube enregistrent les variations entre le minimum et le maximum de pression dans le tube, ce qui permet de réaliser la fonction de transfert entre les positions des microphones (rapport des deux pressions). Il est alors possible de calculer le coefficient d'absorption du matériau. Le carottage des éprouvettes et la mesure ont été effectués par le CSTB à Marne-la-Vallée.

²¹ Nous souhaitons ici renouveler nos remerciements envers M. Thibaut Blinet qui s'est chargé de la réception des échantillons, de la mise en place et de la réalisation des mesures.

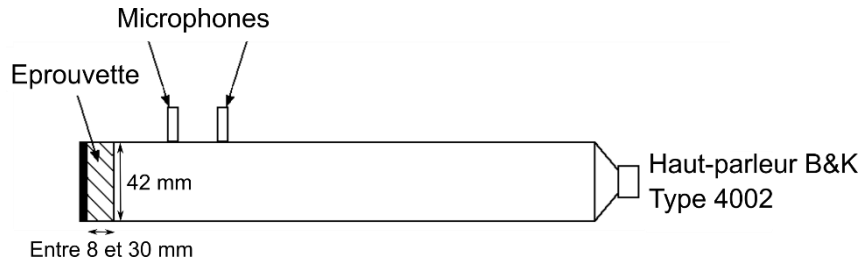


Figure 97 : Schéma du dispositif utilisé, dit tube de Kundt, T. Blinet et A. Jouteau

b) Description des éprouvettes

Comme l'environnement karstique est un milieu complexe, composé d'un large panel de matériaux différents (calcaires, argiles, sables, calcite, eau, oxydes...), il n'a pas été possible de mesurer tous les coefficients d'absorption acoustique en jeu. La mesure nécessitant de nombreux échantillons ou des échantillons de grandes dimensions (le calcaire et la calcite ont tendance à casser lors de la découpe en éprouvettes), il a été décidé de limiter les mesures à cinq types de matériaux²² (photographies des échantillons en Annexe 4) :

- Du calcaire représentatif des couches calcaires présentes à Lascaux (issu d'un bloc calcaire extrait d'un affleurement dégagé lors de l'installation de la réserve incendie sur la colline de Lascaux – cote altimétrique située entre 175 et 177 mètres NGF).
- Du calcaire issu des bancs présents à Cussac (les blocs proviennent des déblais du sondage effectué dans l'entrée de la cavité et entreposés à proximité immédiate du porche d'entrée. Les blocs correspondent à du calcaire lité, pouvant coïncider aux couches 2 ou 3 de l'intérieur de la grotte, qui portent la majorité des gravures).
- Du calcaire provenant de la grotte de Leye (les blocs ont été prélevés directement dans la grotte).
- De la calcite du site de Coudoulous (Lot).
- De l'argile dont la granulométrie est proche de celle présente à Cussac, prélevée directement dans la grotte de Veyssou (Dordogne ; Ledoux, 2019).

²² Je tiens ici à renouveler mes remerciements envers ceux qui m'ont transmis des matériaux ou qui m'ont accompagnée sur le terrain pour récolter des échantillons : Patrice Buraud, Catherine Ferrier, Delphine Lacanette, Lysianna Ledoux et Jean-Christophe Portais.

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

Les échantillons ont été carottés (Figure 98) pour obtenir des éprouvettes de 42 mm de diamètre à l'aide d'une scie cloche diamant. Après la découpe, les faces ont été aplanies pour pouvoir être insérées dans le dispositif et les deux faces de chaque éprouvette ont été mesurées acoustiquement. Les matériaux calcaires étaient cassants à la découpe, d'où un nombre d'éprouvettes limité et d'épaisseurs variables. La réalisation d'un minimum de trois éprouvettes de deux faces chacune par matériaux a cependant été possible.



Figure 98 : Carottage en cours d'un échantillon du site de Cussac (CSTB).

Calcaire de Lascaux

Cinq éprouvettes ont été réalisées avec les échantillons du calcaire de Lascaux, deux d'environ 8 mm d'épaisseur et trois d'environ 20 mm d'épaisseur (Figure 99).



Figure 99 : Éprouvettes issus des échantillons de Lascaux (CSTB).

Calcaire de Cussac

Trois éprouvettes ont été produites à partir des blocs calcaires de Cussac, de 9 mm, 12 mm et 18 mm (Figure 100).



Figure 100 : Éprouvettes issus des échantillons de Cussac (CSTB).

Calcaire de Leye

Trois éprouvettes ont été creusées dans les échantillons calcaires de Leye, deux d'environ 30 mm et une de 20 mm (Figure 101).



Figure 101 : Éprouvettes issus des échantillons de Leye (CSTB).

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

Calcite

La calcite était trop cassante, aucune éprouvette n'a pu être correctement réalisée (Figure 102).



Figure 102 : Tentatives de carottage d'échantillons dans de la calcite (CSTB).

Argile

L'argile issue de Veysou a été maintenue dans un environnement humide (72 % d'humidité) jusqu'à la mesure afin de se rapprocher des conditions hygrométriques ambiantes d'une grotte. Trois éprouvettes en ont été extraites, deux de 30 mm et une de 20 mm d'épaisseur (Figure 103). Chaque éprouvette a été mesurée avec un taux d'humidité ambiant de 70 % et de 90 % afin que les échantillons conservent leur humidité.



Figure 103 : Éprouvettes issus du bloc d'argile (CSTB).

c) *Mise en place des mesures*

Les éprouvettes ont été insérées dans un porte-éprouvette à fond rigide servant de terminaison au tube de Kundt. Pour chaque éprouvette les deux faces ont été mesurées selon les fréquences allant de 200 à 4 000 Hz, dans des conditions de température ambiante de 21,5° C et d'hygrométrie ambiante de 70 %. Les mesures de température et d'hygrométrie pouvant être

réglées sur *Icare*, il n'était pas indispensable de reproduire un environnement karstique, l'intérêt principal d'une hygrométrie élevée était d'éviter l'assèchement de l'argile.

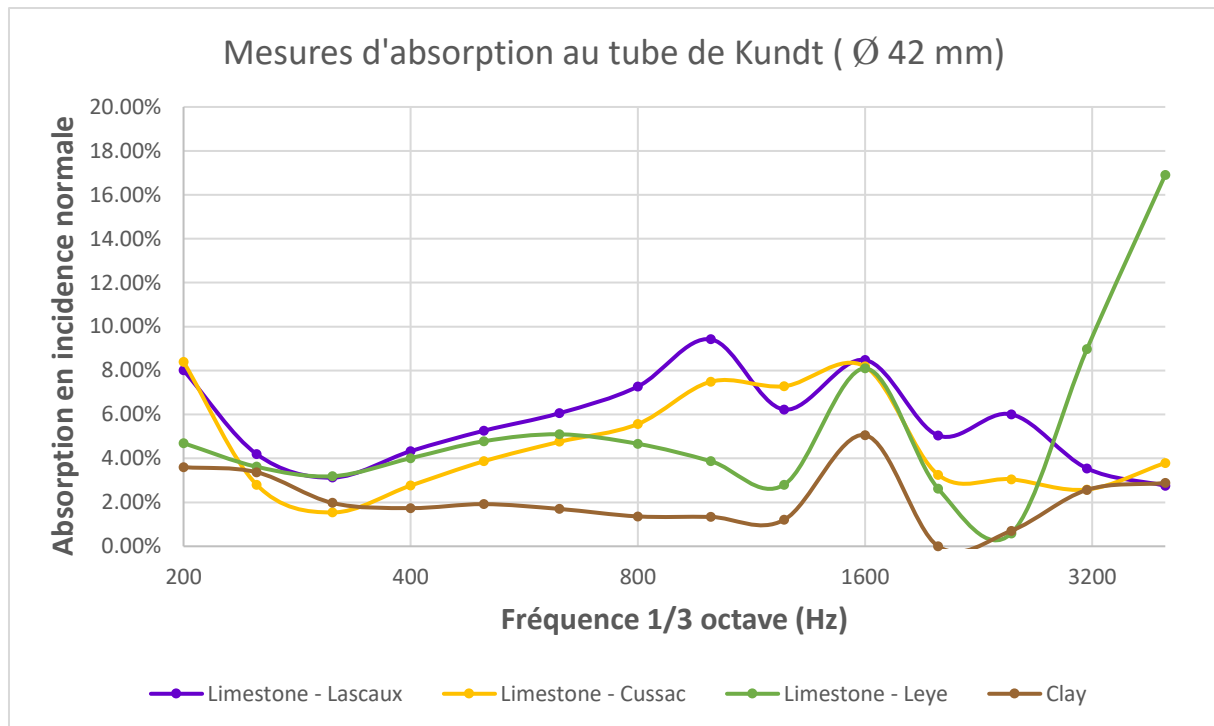
Le tube de Kundt utilisé a été conçu par le CSTB et les microphones et l'analyseur utilisés sont de la marque *Bruël et Kjør*.

d) Résultats

Toutes les mesures sont détaillées en Annexe 5, avec les mesures d'absorption acoustique pour chaque face et chaque tiers d'octave, mais le coefficient d'absorption acoustique moyen par tiers d'octave de chaque type de matériau est présenté ici (Tableau 17, Graphique 23). Plus le coefficient d'absorption acoustique s'approche de 0, plus le matériau concerné est réverbérant, à l'inverse plus la valeur est élevée et plus le matériau est absorbant.

Réf. Matériaux	Calcaire - Lascaux	Calcaire - Cussac	Calcaire - Leye	Argile
Fréq. (Hz)	Pourcentage d'absorption	Pourcentage d'absorption	Pourcentage d'absorption	Pourcentage d'absorption
200	8.01 %	8.39 %	4.70 %	3.60 %
250	4.20 %	2.80 %	3.62 %	3.37 %
315	3.13 %	1.54 %	3.19 %	1.97 %
400	4.33 %	2.77 %	4.01 %	1.74 %
500	5.26 %	3.87 %	4.78 %	1.92 %
630	6.06 %	4.76 %	5.10 %	1.70 %
800	7.27 %	5.57 %	4.67 %	1.36 %
1 000	9.42 %	7.49 %	3.87 %	1.34 %
1 250	6.22 %	7.29 %	2.80 %	1.20 %
1 600	8.48 %	8.18 %	8.10 %	5.06 %
2 000	5.04 %	3.26 %	2.63 %	0.00 %
2 500	6.01 %	3.05 %	0.59 %	0.71 %
3 150	3.55 %	2.58 %	8.98 %	2.57 %
4 000	2.76 %	3.79 %	16.91 %	2.88 %

Tableau 17 : Pourcentage d'absorption moyen au tube de Kundt (CSTB).



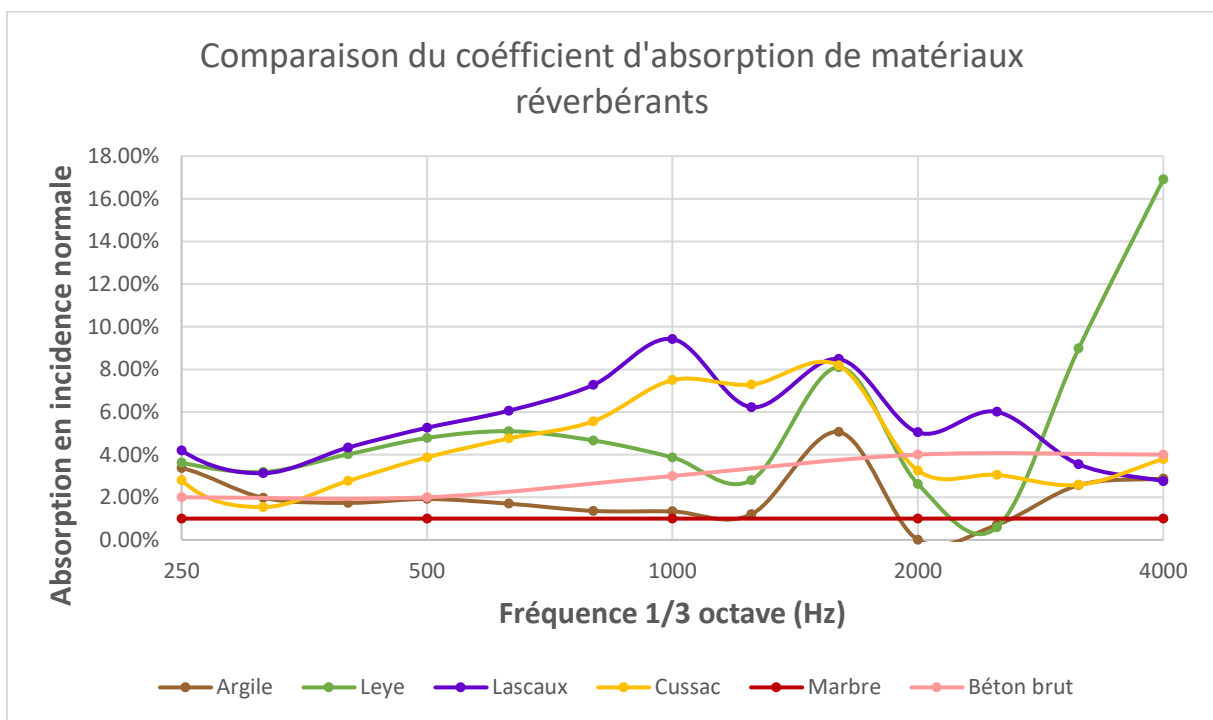
Graphique 23 : Mesures d'absorption moyennes au tube de Kundt des éprouvettes de calcaires de Lascaux, Cussac, Leye et d'argile.

e) Observations

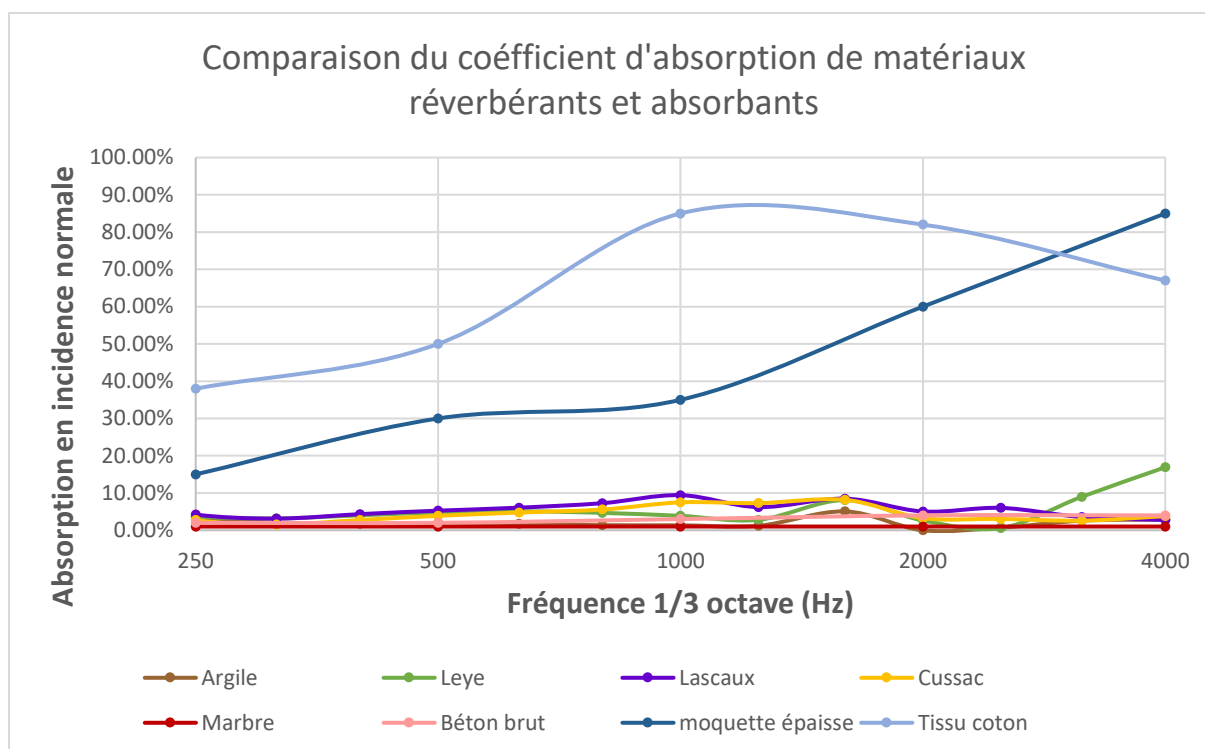
De manière générale, on observe que les courbes ont une évolution similaire et que les valeurs individuelles se recoupent fréquemment entre matériaux (Annexe 5), attestant d'un comportement acoustique proche entre les différents matériaux. En particulier, les courbes des calcaires de Lascaux et de Cussac ont une morphologie proche, le calcaire de Cussac étant légèrement plus réverbérant. L'argile a également un comportement proche, mais avec une réverbération globalement plus marquée. Le calcaire de la grotte de Leye semble présenter une absorption semblable aux autres calcaires jusqu'à 800 Hz, puis plus basse jusqu'à 2 500 Hz, avant d'augmenter sur les fréquences hautes, quel que soit l'échantillon considéré (voir Annexe 5). De par sa nature et son aspect cassant, il est possible, bien que cela n'ait pu être vérifié, que la calcite ait un comportement légèrement plus réverbérant que les calcaires présents ici.

Comparés à d'autres matériaux, on observe que les calcaires et l'argile ont un comportement réverbérant, puisque légèrement plus absorbant que des matériaux considérés comme très réverbérants (Graphique 24), et beaucoup moins que des matériaux isolants (Graphique 25).

Enfin, il est important de noter que les mesures réalisées ici sont issues d'un échantillonnage, et que les éprouvettes, pour pouvoir être intégrées au tube de Kundt, ont été lissées sur leur surface. De plus, il faut rappeler que les blocs de calcaire mesurés sont des fragments détachés de leur support, et qu'ils ont donc une histoire taphonomique (notamment en ce qui concerne leur altération, donc leur porosité, ou leur recouvrement par de l'argile ou de la calcite) différente des parois et que cela a pu en changer la réponse acoustique. Il semble donc peu acceptable d'intégrer directement ces mesures dans des simulations, une comparaison avec des mesures réalisées *in situ* semble alors inévitable.



Graphique 24 : Comparaison du coefficient d'absorption des matériaux calcaires et de l'argile avec des matériaux réverbérants : marbre et béton (données issues du site : <http://www.acouphile.fr/materiaux.html>).



Graphique 25 : Comparaison du coefficient d'absorption des matériaux calcaires et de l'argile avec des matériaux réverbérants : marbre et béton et des matériaux absorbants : moquette épaisse et tissu en coton (données issues du site : <http://www.acouphile.fr/materiaux.html>).

2. Mesures des Réponses Impulsionnelles (RI) et des Temps de Réverbération (TR)

Les mesures de réponses impulsionnelles réalisées sur le terrain ont pour objectif de comparer la réponse réelle du milieu avec les résultats des simulations basées sur les mesures des coefficients d'absorption précédemment obtenues, et ainsi de calibrer si nécessaire l'absorption des matériaux. Les mesures de RI doivent être réalisées *in situ* dans un espace silencieux, limitant nos possibilités à Cussac et à Leye (aucune mesure n'a pu être réalisée à Lascaux pour des raisons d'accès).

Les mesures réalisées à Cussac comme à Leye ont permis d'obtenir la RI de plusieurs espaces dans ces cavités. La RI permet à son tour d'obtenir d'autres propriétés acoustiques, en particulier elle permet de calculer le temps de décroissance précoce (ou EDT), les Temps de Réverbération (TR) T20 et T30, les propriétés de clarté de la voix (C50 et C80), et de définition des sons (D50). Une analyse détaillée des résultats et leur implication archéologique est présentée Sous-chapitre 3.1.E. *Propriétés acoustiques de la grotte de Cussac*, mais ne sont

présentées ici que les valeurs de TR, puisque ce sont ces valeurs, par tiers d'octave, qui seront comparées aux simulations afin de calibrer le coefficient d'absorption acoustique du milieu.

Le TR correspond au temps nécessaire au son pour décroître de 60 dB après l'arrêt de son émission. Ce moment d'arrêt de la source sonore correspond au début de la décroissance des décibels et est placée à l'origine du graphique de la réponse impulsionnelle (Figure 104), c'est pourquoi les mesures de décibels sont négatives. Il est souvent difficile d'obtenir une décroissance nette sur 60 dB, que ce soit à cause du bruit ambiant (Figure 104), d'une puissance limitée de l'émetteur ou d'une grande distance entre émetteur et récepteur. Le TR est donc calculé en extrapolant la courbe de décroissance (Figure 104), soit en multipliant par trois la droite comprise entre -5 et -25 dB (T20), soit en multipliant par deux la droite comprise entre -5 et -35 dB (T30). La valeur de T30 dispose d'une incertitude plus faible que celle du T20, cependant elle peut être biaisée si le bruit de fond est trop important. Il est donc nécessaire, avant de sélectionner le TR utilisé lors des comparaisons, de choisir lequel est le plus cohérent avec les RI obtenues.

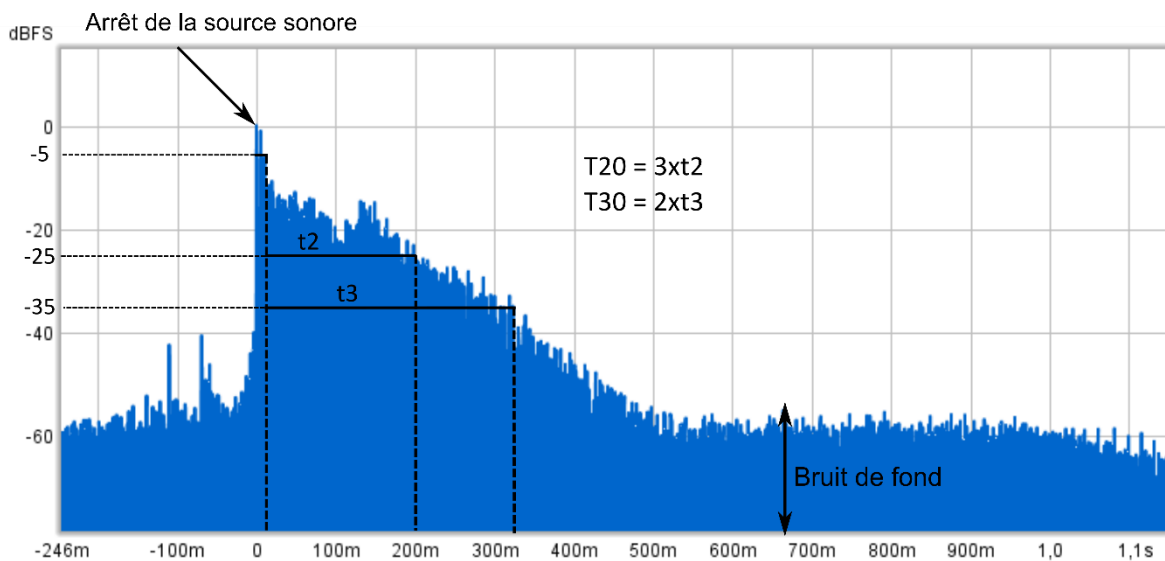


Figure 104 : Exemple de T20 et T30 sur une RI enregistrée à Cussac, près du Panneau de la Tête à l'Œil Ovalaire (première campagne de mesures).

a) Matériel utilisé

Les mesures de RI ont été réalisées sur place à l'aide d'un haut-parleur (ici une enceinte portable *Jabra Solemate*, Figure 105) connecté à un ordinateur portable par *Bluetooth* et d'un microphone (ici une webcam *Logitech HD C270*, Figure 105), relié au même ordinateur par câble USB. Ces instruments ont été sélectionnés bien qu'ils ne soient pas très puissants ni omnidirectionnels dans le cas du récepteur car le milieu karstique nécessite souvent de franchir des passages de dimensions réduites, voire des étroitures, il était donc nécessaire de disposer d'instruments légers et compacts. D'autre part, l'autonomie de plusieurs heures de l'enceinte était également une nécessité compte tenu de l'absence d'alimentation électrique sous terre. Les mesures ont été réalisées et traitées via le logiciel *REW* (<https://www.roomeqwizard.com/>) qui permet d'émettre et d'enregistrer des balayages de fréquences suivant un spectre de 0 à 24 000 Hz. Ces balayages ont permis d'obtenir la RI pour chaque point de localisation du couple émetteur-récepteur, et d'en déduire directement le TR selon la fréquence.



Figure 105 : Enceinte Jabra Solemate et webcam Logitech HD C270 (cl. A Jouteau).

b) Localisation des mesures

Grotte de Leye

Dans la grotte de Leye, entièrement modélisée, l'ensemble des secteurs a pu bénéficier de mesures (Figure 106, Tableau 18). Au total, ce sont douze mesures qui ont été réalisées dans six secteurs différents (deux mesures ont été effectuées à chaque fois : le récepteur restait à la même place tandis que l'émetteur était placé de part et d'autre). Deux balayages de fréquences ont été réalisés lors de chaque mesure, ce qui a permis de moyenniser la réponse impulsionnelle obtenue. Chaque balayage de fréquence ne nécessite que quelques secondes, un double balayage de fréquence peut donc être réalisé en environ une minute. La durée nécessaire à

l'installation du matériel est bien plus importante car celui-ci doit être maintenu sur un sol stable, à quelques décimètres des parois.

Lors des mesures, l'enceinte et le microphone étaient séparés de 2 m l'un de l'autre (± 5 cm), et posés à quelques dizaines de centimètres du sol (45 cm pour l'enceinte et 55 cm pour le microphone, Figure 107).

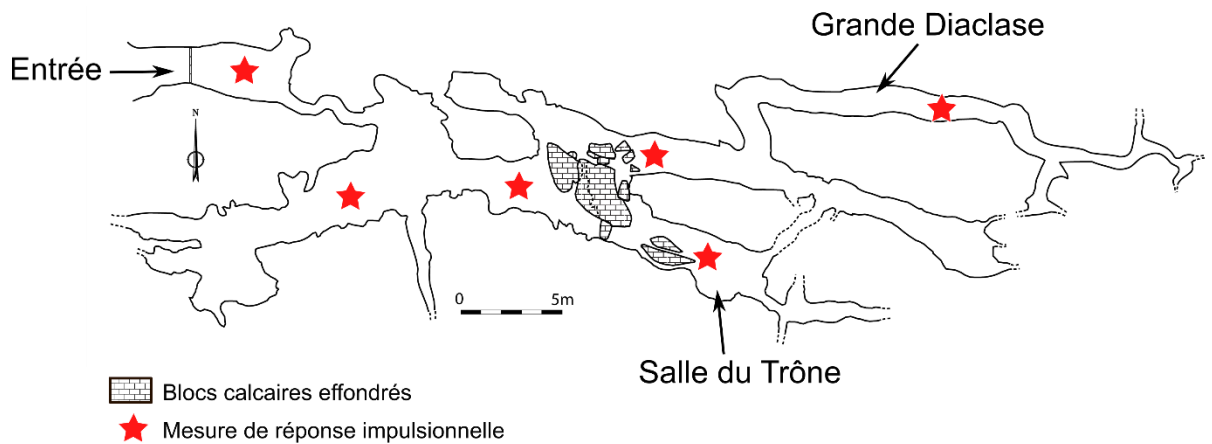


Figure 106 : Localisation des secteurs où des mesures de réponse impulsionnelle ont été réalisées (d'après le fond topographique C. Ferrier, D. Large, D. Lacanette)

Numéro de la mesure	Secteur
1	Salle Froide
2	Salle Froide
3	Grande Salle
4	Grande Salle
5	Salle du Trône
6	Salle du Trône
7	La Cathédrale
8	La Cathédrale
9	Grande Diaclase
10	Grande Diaclase
11	Entrée
12	Entrée

Tableau 18 : Numéro et localisation des mesures effectuées dans la grotte de Leye.

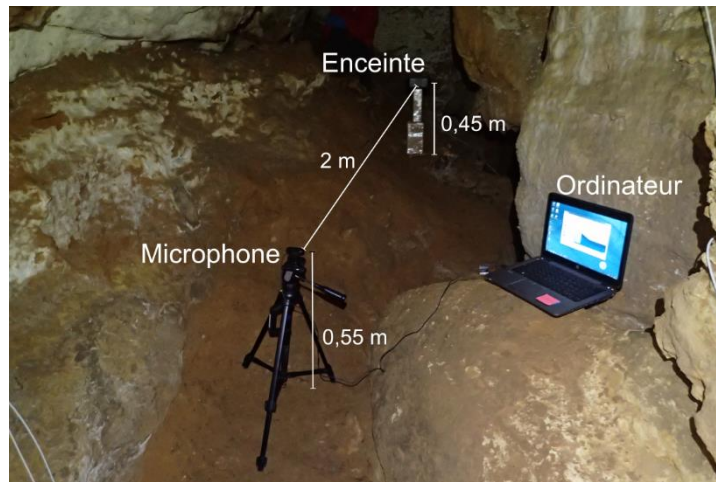


Figure 107 : Organisation des instruments de mesure dans la Salle du Trône (cl. A Jouteau).

Lors de chaque mesure, des photographies ont été enregistrées, ainsi que la localisation de l'émetteur et du récepteur sur un plan topographique afin de pouvoir retrouver leurs coordonnées sur les modèles 3D.

Grotte de Cussac

Les mesures effectuées à Cussac ont eu lieu lors de deux campagnes : la première avec un seul balayage de fréquence par mesure et l'autre avec deux balayages. Les résultats permettront ainsi de discuter de l'intérêt de procéder, ou non, à deux balayages de fréquences lors des mesures.

Les mesures ont été réalisées dans l'ensemble de la partie la plus accessible de la grotte, c'est-à-dire du Panneau du Puits au Grand Panneau en Aval (lors des deux campagnes de mesures) et de la Salle des Gours jusqu'au Panneau des Figures Féminines en Amont (uniquement lors de la seconde campagne de mesures). Une attention particulière a été portée sur le secteur modélisé par *Perazio Engineering* (du Panneau de la Découverte au Locus 2), puisqu'il s'agit du secteur dont la modélisation 3D est complète. Cependant, il s'agit également d'un secteur où une passerelle métallique a été installée pour pouvoir escalader de gros blocs en sécurité et circuler le long des locus. Nous avons essayé de réaliser les mesures en-dehors de ces passerelles ou dans des espaces suffisamment amples pour limiter leur interférence, mais cela n'a pas été possible pour les mesures 9 et 10 des deux campagnes de mesures qui ont eu lieu sous le Panneau de la Découverte.

Lors de la première campagne, ce sont 29 mesures qui ont été enregistrées (Figure 108, Tableau 19) dans 14 secteurs différents de la Branche Aval, dont dix mesures dans le secteur du Panneau de la Découverte et des locus 1 et 2.

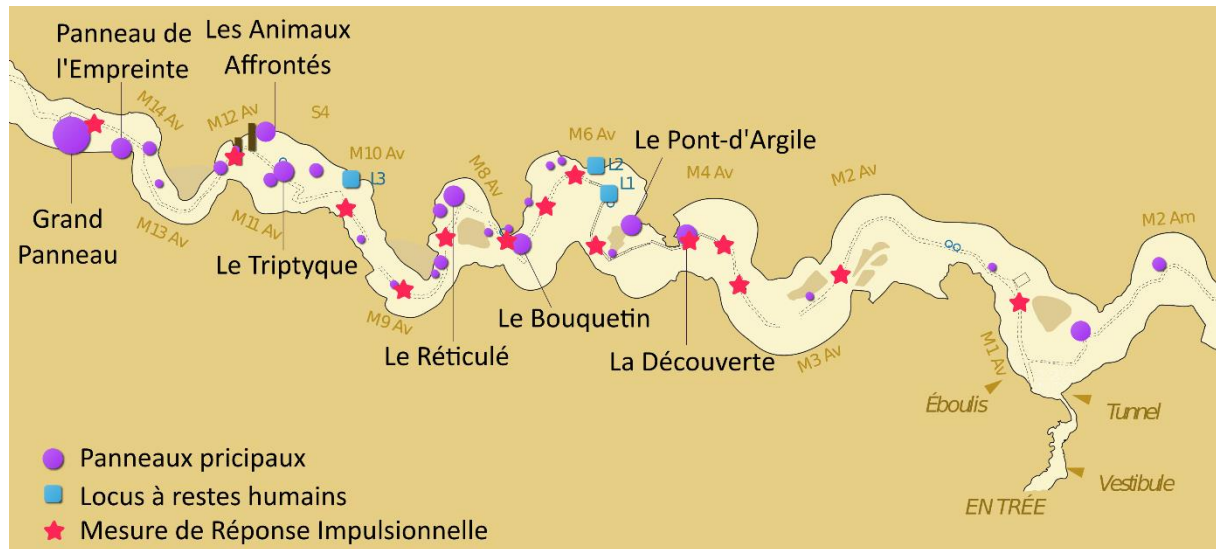


Figure 108 : Localisation des secteurs des mesures réalisées lors de la première campagne, © Dao F. Lacrampe-Cuyaubère (d'apr. relevés terrain H. Camus & coll./Protée et Durif-Delluc-Massoulier/Spéleo-club de Périgueux), PCR Cussac/Mc.

N°	Secteur	N°	Secteur	N°	Secteur
1	Panneau du Puits	11	Entre Pont d'argile et Locus 1	21	Locus 3
2	Panneau du Puits	12	Entre Pont d'argile et Locus 1	22	Locus 3
3	Les Trois Points Noirs	13	Aval du Locus 2	23	Mammouth Isolé
4	Les Trois Points Noirs	14	Aval du Locus 2	24	Mammouth Isolé
5	Entrée salle Panneau de la Découverte	15	By-Pass	25	Grand Panneau
6	Entrée salle Panneau de la Découverte	16	By-Pass	26	Grand Panneau
7	En bas du Panneau de la Découverte	17	Glissade du Bouquetin	27	Grand Panneau
8	En bas du Panneau de la Découverte	18	Glissade du Bouquetin	28	Bouquetin
9	Sous le Panneau de la Découverte	19	Animal Acéphale	29	Aval du Panneau de la Découverte
10	Sous le Panneau de la Découverte	20	Animal Acéphale		

Tableau 19 : Nom et numéro des mesures réalisées lors de la première campagne de mesures à Cussac.

Lors de la seconde campagne, 47 mesures ont été réalisées, dans 24 secteurs situés entre le Grand Panneau en Aval et le Panneau des Figures Féminines en Amont (Figure 109, Tableau 20) dont dix dans le secteur modélisé par *Perazio Engineering*.

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation



Figure 109 : Localisation des secteurs des mesures réalisées lors de la seconde campagne, © Dao F. Lacrampe-Cuyaubère (d'apr. relevés terrain H. Camus & coll./Protée et Durif-Delluc-Massoulier/Spéleo-club de Périgueux), PCR Cussac/Mc.

N°	Localisation	N°	Localisation	N°	Localisation
1	Panneau du Puits	17	Digitaux	33	Salle des Gours
2	Panneau du Puits	18	Digitaux	34	Salle des Gours
3	Les Trois Points Noirs	19	Animal Acéphale	35	Aval Griffades
4	Les Trois Points Noirs	20	Animal Acéphale	36	Aval Griffades
5	Entrée salle Panneau de la Découverte	21	Locus 3	37	Cavicorne
6	Entrée salle Panneau de la Découverte	22	Locus 3	38	Cavicorne
7	En bas du Panneau de la Découverte	23	En bas du Triptyque	39	Entre Cavicorne et Internacional
8	En bas du Panneau de la Découverte	24	En bas du Triptyque	40	Entre Cavicorne et Internacional
9	Sous le Panneau de la Découverte	25	Sous Triptyque	41	Intersection du Bloc au Campaniforme
10	Sous le Panneau de la Découverte	26	Sous Triptyque	42	Intersection du Bloc au Campaniforme
11	Entre Pont d'Argile et Locus 1	27	Mammouth Isolé	43	Sous le Rhinocéros
12	Entre Pont d'Argile et Locus 1	28	Mammouth Isolé	44	Entre Rhinocéros et Gros blocs
13	Aval du Locus 2	29	Pied du Grand Panneau	45	Entre Rhinocéros et Gros blocs
14	Aval du Locus 2	30	Pied du Grand Panneau	46	Figures Féminines
15	By-Pass	31	Sous l'Empreinte	47	Figures Féminines
16	By-Pass	32	Sous l'Empreinte		

Tableau 20 : Nom et numéro des mesures réalisées lors de la seconde campagne.

Chapitre 2 - *Icare*, logiciel de simulation acoustique

Comme lors des mesures réalisées dans la grotte de Leye, l'enceinte et le micro étaient séparés d'environ 2 m l'un de l'autre, et posés à quelques dizaines de centimètres du sol (40 cm pour l'enceinte et 55 cm pour le microphone pour l'ensemble des mesures, sauf celles situées immédiatement sous le Panneau de la Découverte, où, pour des raisons d'espace disponible, ces hauteurs ont été réduites à 30 cm, Figure 110). Enfin, trois mesures ont été réalisées avec un espacement plus grand (mesures n° 27, 28 et 29 et de la première campagne, voir Figure 112).

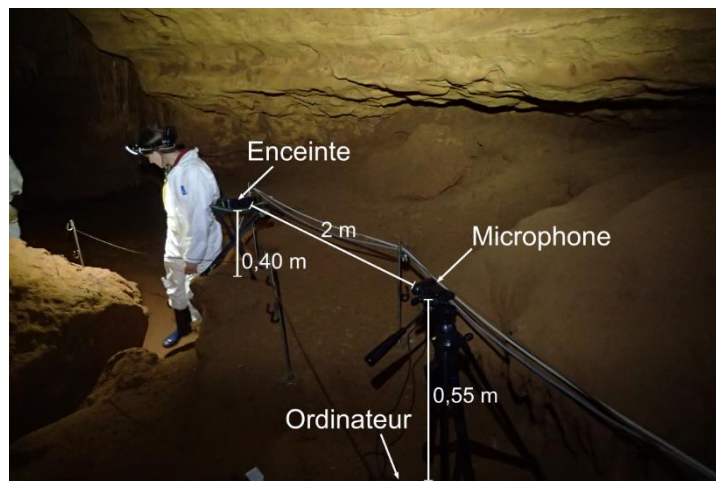


Figure 110 : Organisation des instruments de mesure au niveau du Panneau du Mammouth Isolé (4D3), cl. D. Lacanette

c) Résultats des mesures – grotte de Leye

Réponses impulsionnelles (RI)

Chaque mesure de RI réalisée bénéficie d'une fiche d'identité, disponible en Annexe 6. Ici seuls deux exemples sont détaillés (Figure 111).

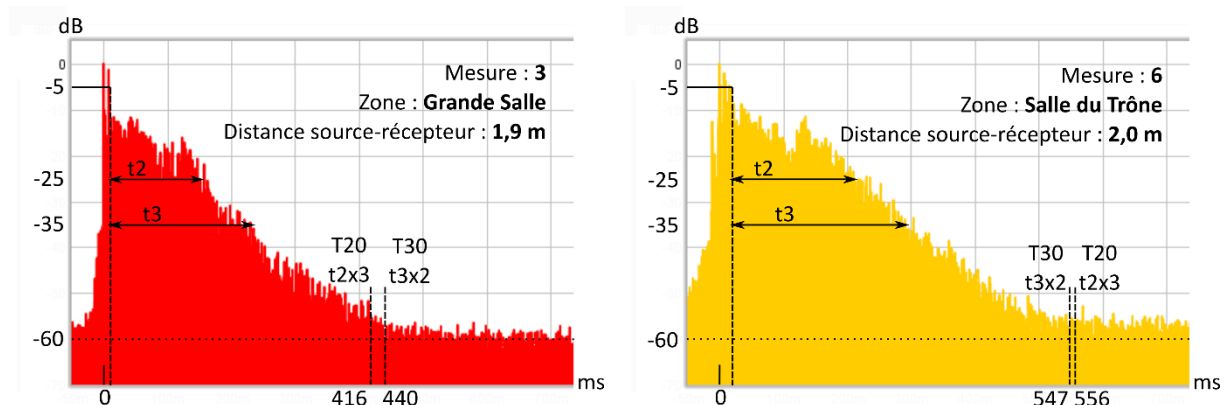
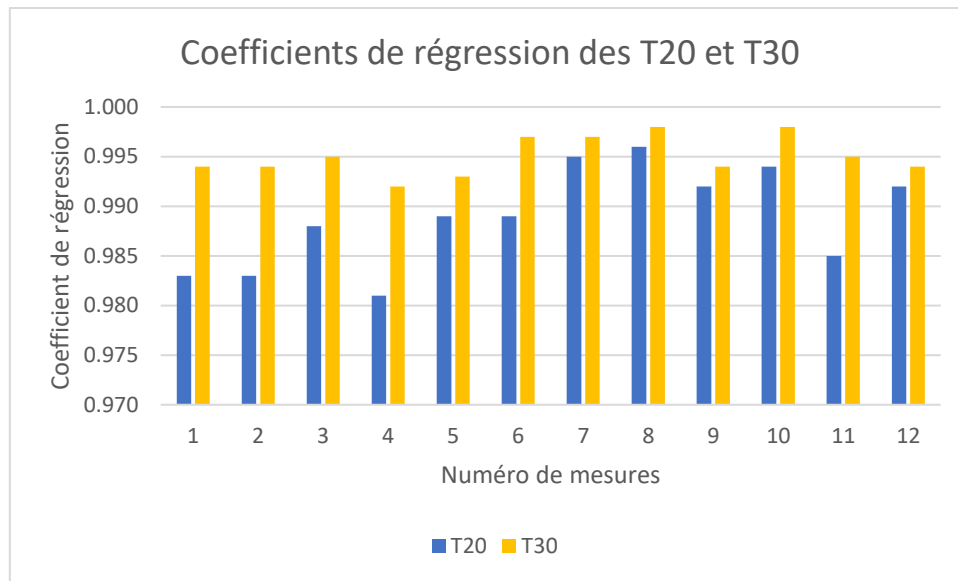


Figure 111 : Fiche d'identité des mesures de réponse impulsionnelle numéros 2 et 6 réalisées à Leye.

Temps de réverbération (TR) général

Les TR T_{20} et T_{30} ont pu être extraits de chaque RI mesurée. Les RI de Leye sont bruitées à partir de -55 dB en moyenne (Figure 111, Annexe 6), ce qui semble normal puisque le milieu souterrain est particulièrement silencieux, les T_{20} et T_{30} ne sont donc pas gênées par le bruit de fond. Nous avons par la suite choisi de travailler avec le T_{30} au lieu du T_{20} pour deux raisons :

- Puisque le T_{30} englobe une plus grande partie de la courbe, il est plus fiable que le T_{20} à condition qu'il ne soit pas du tout perturbé par le bruit de fond, ce qui est le cas ici.
- Le logiciel *REW* calcule un coefficient de régression pour estimer la fiabilité des T_{20} et T_{30} . Ce coefficient mesure à quel point les droites T_{20} et T_{30} se rapprochent de la courbe de la RI. Plus la valeur du coefficient est proche de 1 et plus le résultat est fiable, (https://www.roomeqwizard.com/help/help_en-GB/html/graph_rt60.html). Or, on observe (Graphique 26) que le T_{30} est plus fiable que le T_{20} sur l'ensemble des mesures.



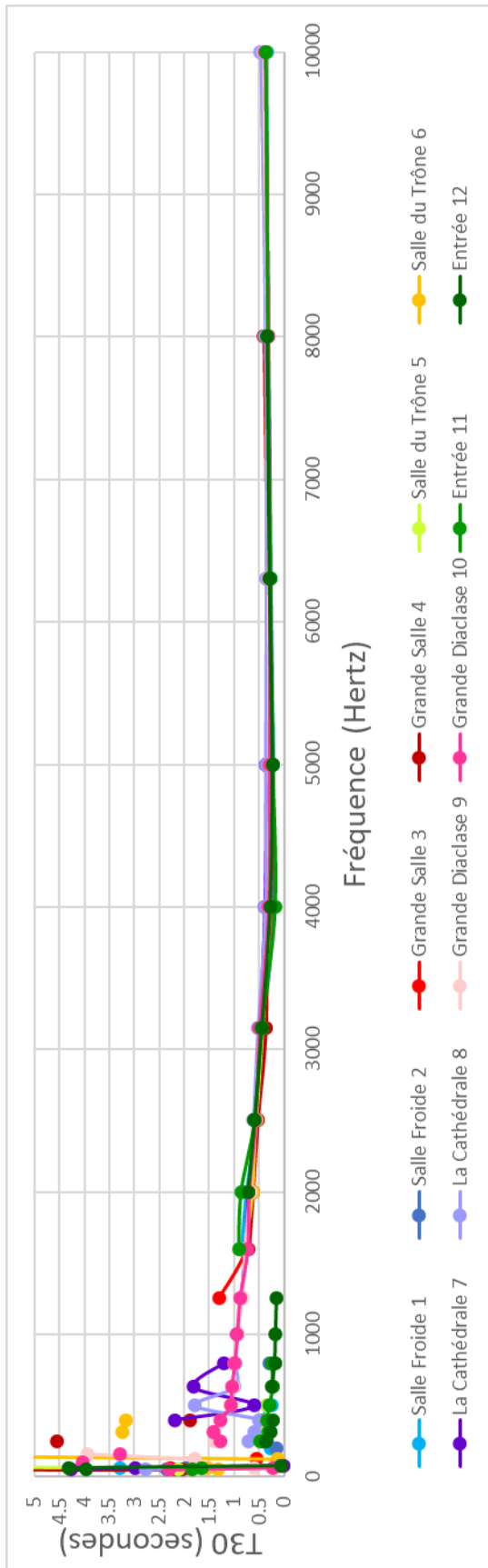
Graphique 26 : Coefficient de régression des T20 et T30 des mesures de la grotte de Leye.

Temps de réverbération par tiers d'octave

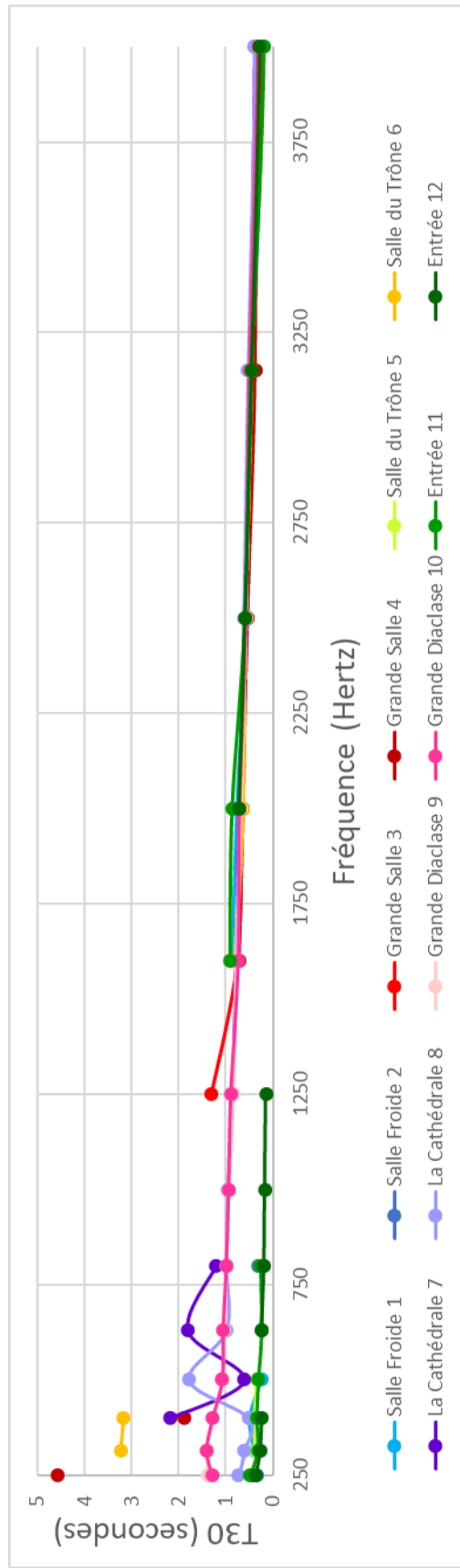
L'étape suivante a consisté à obtenir le T30 pour chaque tiers d'octave compris entre 50 et 10 000 Hz. Cette manipulation est automatique sous *REW* et est résumée ici sous forme de graphique.

Les mesures de T30 par tiers d'octave montrent que plus la fréquence est élevée et plus la variabilité des mesures diminue. En outre, les valeurs manquantes sont plus nombreuses dans les basses fréquences (30,6 % des données sont manquantes, dont 54 % des données entre 80 et 1 250 Hz, Graphique 28). Cela est probablement dû au matériel qui ne produisait pas assez de basses fréquences. Jusqu'à la valeur de 250 hertz, les mesures ne nous semblent pas suffisamment cohérentes pour être prises en compte dans les simulations qui vont suivre (Graphique 28). Entre 250 et 1 250 Hz, une variabilité existe, mais celle-ci semble être amplifiée par la présence de deux courbes : l'une autour de 0,3 s correspond aux courbes des mesures 11 et 12, réalisées dans l'entrée de la grotte, et l'autre autour de 1 s représente l'ensemble des autres mesures (Graphique 27). L'entrée du site étant ouverte, cette différence est normale et sera prise en compte lors des simulations. Au-delà de 800 Hz les mesures semblent véritablement affranchies de la qualité de l'émetteur.

Ces données seront par la suite utilisées pour calibrer le coefficient de réflexion des matériaux présents dans la grotte dans le logiciel, avec une fiabilité suffisante à partir de 250 Hz, et particulièrement précise à partir de 800 Hz.



Graphique 28 : Évolution, pour chaque mesure, du T30 par tiers d'octave, hors mesures supérieures à 5 secondes.



Graphique 27 : Évolution de T30 pour chaque mesure entre 250 et 4 000 Hertz.

d) *Résultats des mesures – grotte de Cussac*

Réponses impulsionnelles

Comme pour les mesures de la grotte de Leye, celles réalisées à Cussac lors des deux campagnes bénéficient d'une fiche d'identité, résumées ici avec quelques exemples (Figure 113). L'observation directe des RI nous permet d'observer des similitudes entre les deux campagnes de mesures :

- Le bruit de fond est très faible, souvent inférieur à -60 dB et toujours en-deçà de -50 dB (les seules mesures inexploitable à cause d'un bruit de fond trop important sont les mesures n° 27, 28 et 29 de la première campagne, pour lesquelles la distance entre émetteur et récepteur était supérieure à 2 m, Figure 112).
- Les profils sont similaires pour un même lieu d'enregistrement (Figure 113).

Une différence est cependant aussi observable :

- Les T20 et T30 calculés sont plus faibles lorsqu'ils sont issus de mesures avec deux balayages de fréquence (Figure 113), et semblent se rapprocher davantage du TR réel.

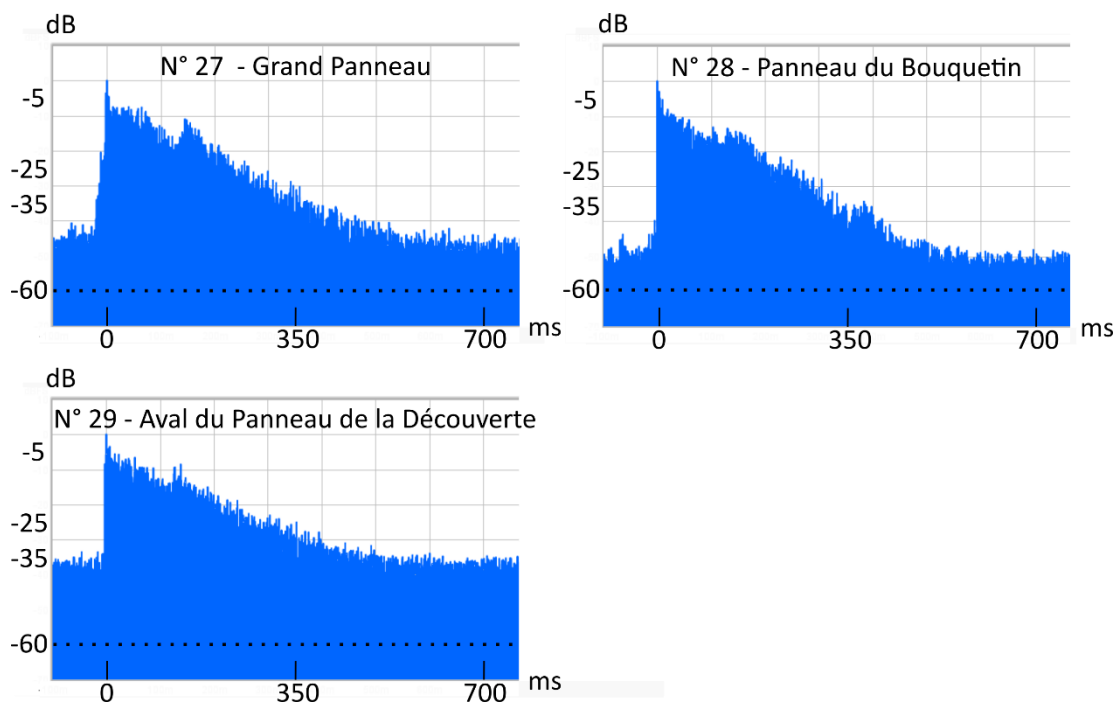


Figure 112 : Réponses impulsionnelles des mesures n° 27, 28 et 29 réalisées lors de la première campagne de mesures.

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

1^{ère} campagne de mesures

2^{nde} campagne de mesures

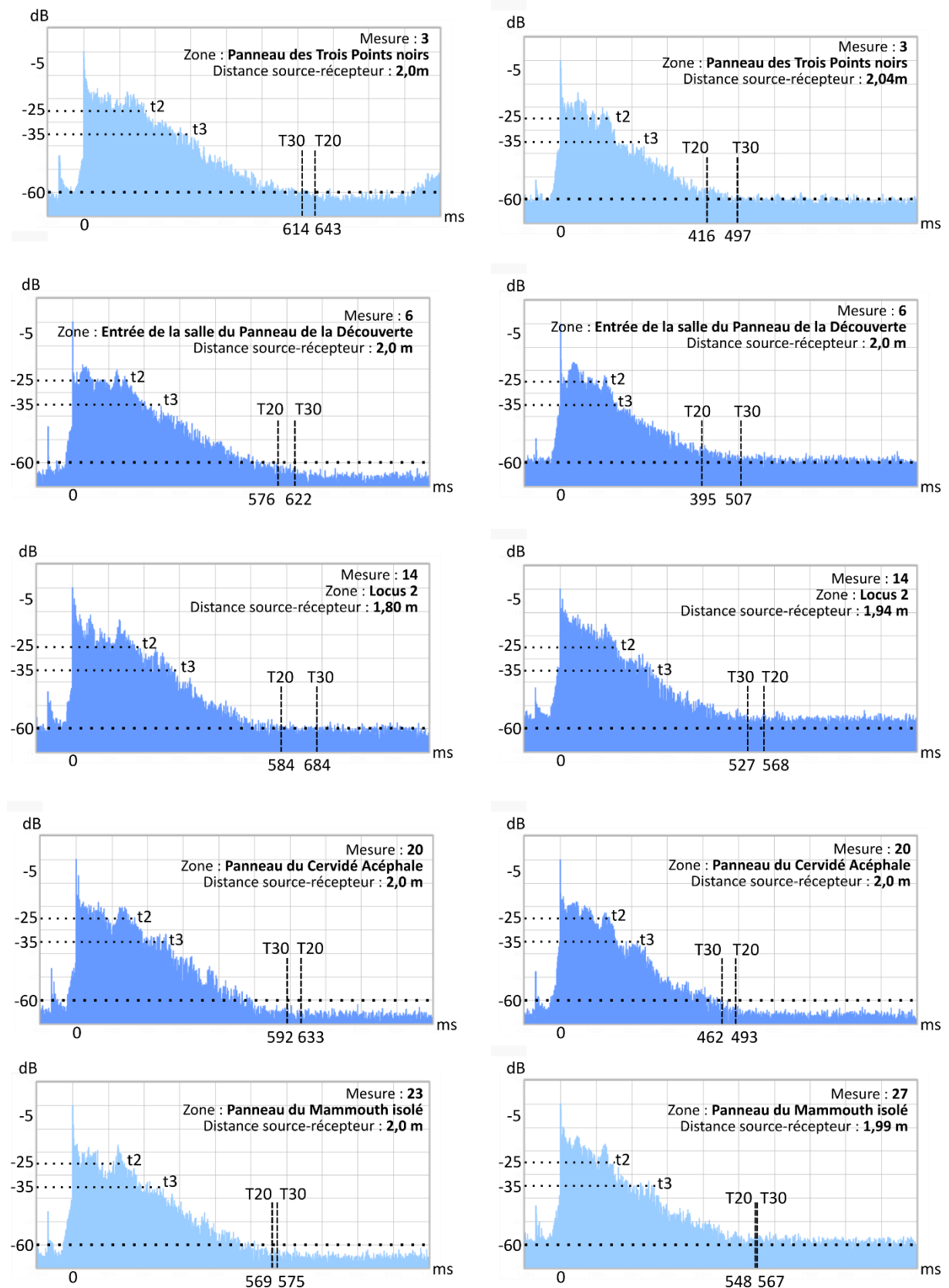
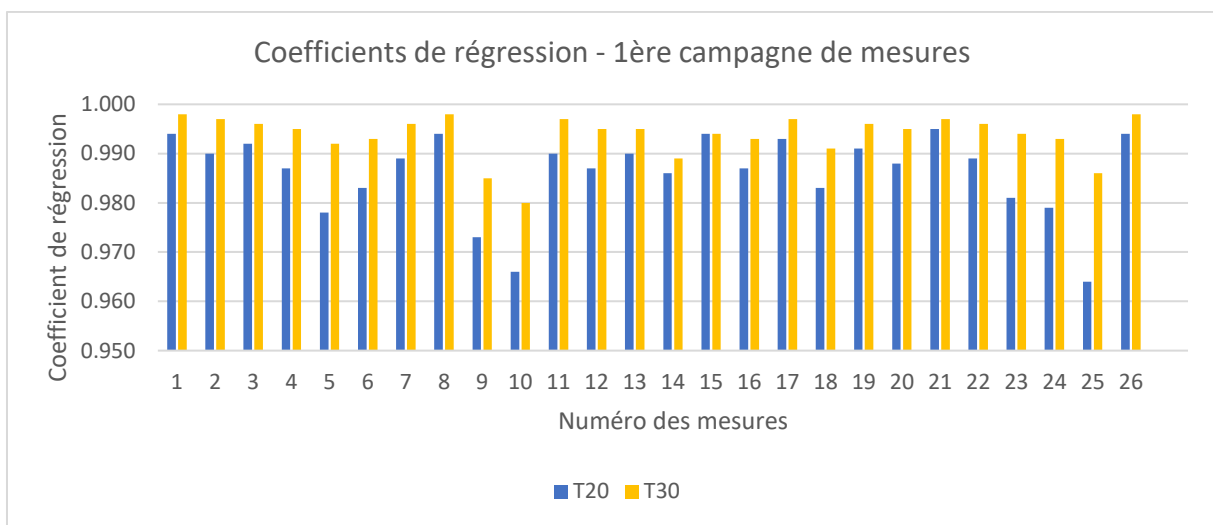


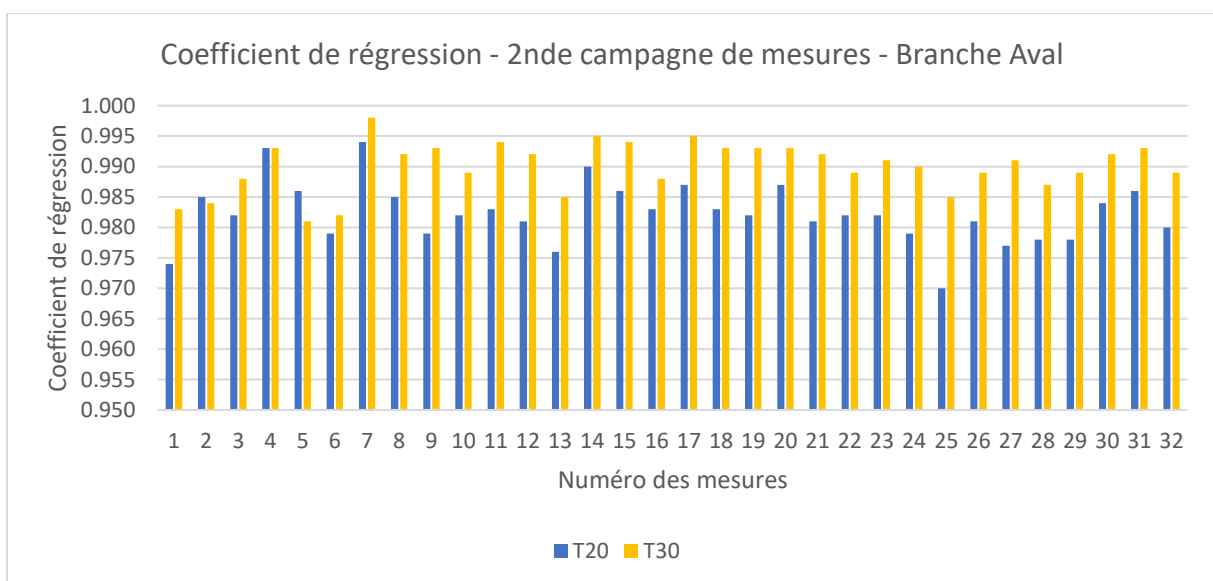
Figure 113 : Comparaison de quelques Réponses Impulsionnelles mesurées aux mêmes localités lors de la première et de la seconde campagne de mesures.

Temps de réverbération général

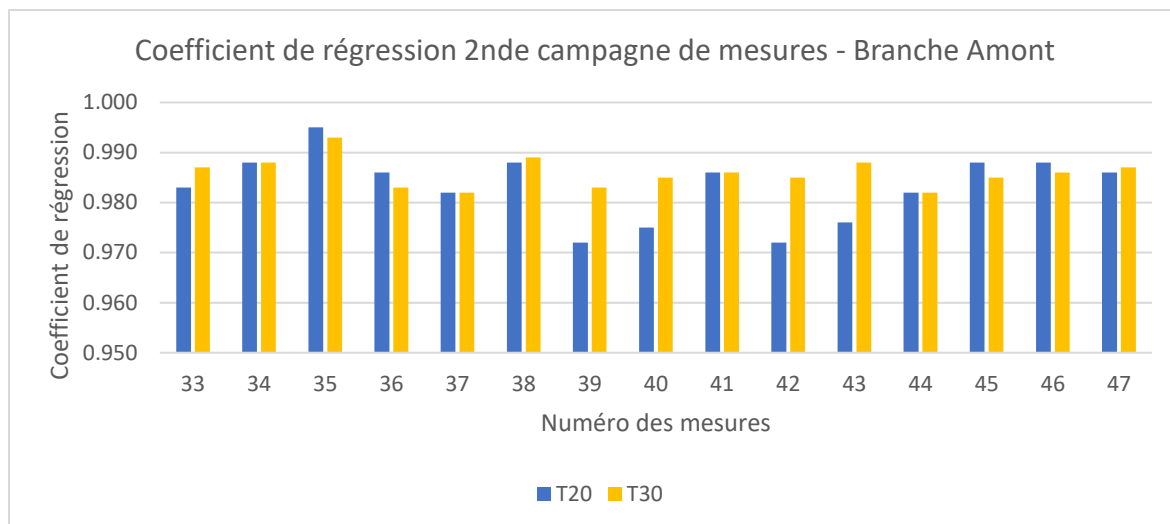
De ces réponses impulsionnelles les TR T20 et T30 ont pu être calculés. Comme pour la grotte de Leye, le bruit de fond est faible et les coefficients de régression des T30 se rapprochent davantage de 1 que les coefficients de régression des T20 (Graphique 29, Graphique 30 et Graphique 31), c'est pourquoi nous avons de nouveau choisi de travailler avec les T30. Il peut être remarqué que les coefficients de régression de la première série de mesures (avec un seul balayage de fréquences par mesure, Graphique 29) sont plus près de 1 que les coefficients de régression de la seconde série de mesures (Graphique 30 et Graphique 31).



Graphique 29 : Coefficient de régression des mesures réalisées lors de la première campagne de mesures.



Graphique 30 : Coefficient de régression des mesures de la Branche Aval réalisées lors de la seconde campagne de mesures.



Graphique 31 : Coefficient de régression des mesures de la Branche Amont réalisées lors de la seconde campagne de mesures.

Temps de réverbération par tiers d'octave

Le T30 de chaque tiers d'octave de 50 à 10 000 Hz a ensuite été extrait par le logiciel *REW* pour l'ensemble des mesures hormis celles qui ont été retirées (mesures n° 27, 28 et 29 de la première campagne).

Le détail des données peut être visualisé en Annexe 7, mais nous proposons ici deux tableaux et leurs graphiques (Tableau 21 et Graphique 32 pour les mesures de la première campagne et Tableau 22 et Graphique 33 pour celles de la seconde) comprenant les mesures enregistrées de l'amont du Panneau de la Découverte jusqu'à l'aval du Locus 2, puisque ce sont les données qui seront comparées à celles obtenues par les simulations, et car elles semblent suffisamment représentatives de l'ensemble des valeurs. On peut ainsi remarquer que les données manquantes sont nombreuses, en particulier lors de la première campagne de mesures (45,1 % de données absentes contre 26,3 % lors de la seconde campagne), et que les données aberrantes (négatives ou > 5 s) sont également plus nombreuses lors de la première campagne (2,88 % des données) que lors de la seconde (0,96 % des données). Ces données manquantes ou aberrantes marquent particulièrement les basses fréquences (respectivement 78 et 44,8 % de données absentes entre 80 et 1 250 Hz lors de la première et de la seconde campagne ; Tableau 21 et Tableau 22), et comme pour la grotte de Leye, plus la fréquence est aiguë et plus la variabilité des mesures diminue (Graphique 33). Cependant, le seuil de fiabilité semble plutôt débuter à 1 600 Hz pour la première série de mesures, tandis que la seconde propose des courbes plus complexes :

- Jusqu'à 125 Hz la variabilité est trop importante pour pouvoir être analysée.

Chapitre 2 - *Icare*, logiciel de simulation acoustique

- De 160 à 1 250 Hz, on peut observer deux niveaux de courbes différents, le premier entre 0,2 et 0,5 s et le second entre 1 et 2 s. Il est intéressant de noter que les valeurs basses sont peu fréquentes sur l'ensemble des mesures puisque les seules localités concernées sont l'aval du Locus 2, le *By-Pass* et le Panneau de l'Animal Acéphale (voir Annexe 7), trois secteurs à la topographie en « couloir » proches d'un espace plus ample.
- Entre 1 250 et 3 150 Hz, deux formes de courbes coexistent, la première diminue progressivement d'environ 0,8 à 0,5 s tandis que la seconde prend une forme de cloche qui augmente jusqu'à un maximum de 2,85 s avant de diminuer jusqu'à atteindre environ 0,5 s. Seules les mesures enregistrées à l'intérieure de la salle du Panneau de la Découverte (mesures n° 5 à 10) présentent une courbe en forme de cloche.
- De 3 150 à 10 000 Hz l'ensemble des mesures diminuent progressivement, d'environ 0,5 s à 0,3 s.

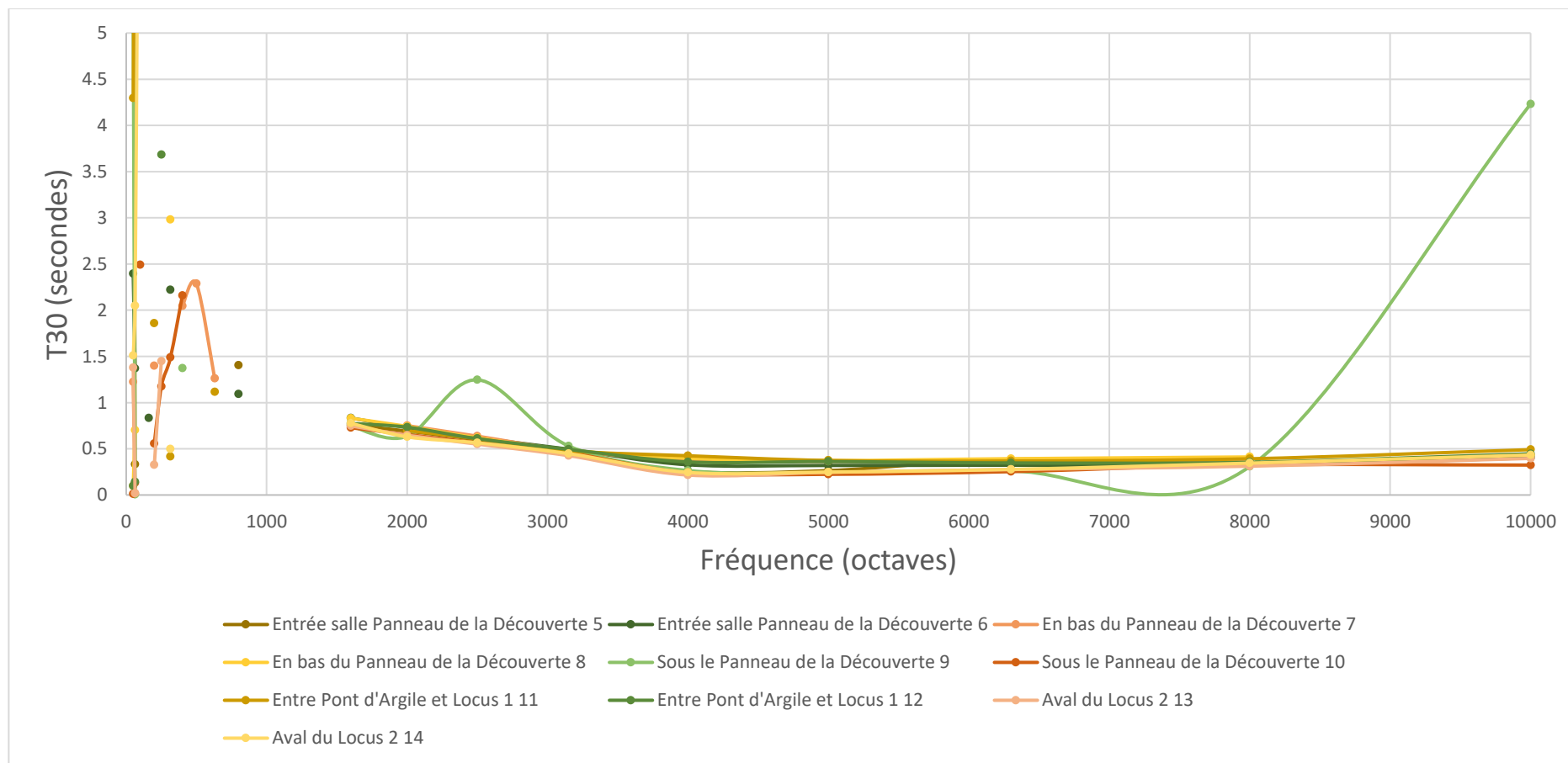
Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

Localisation	N°	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000	6 300	8 000	10 000
Entrée salle Panneau de la Découverte	5	10.537	0.331											1.41			0.76	0.69	0.6	0.45	0.26	0.26	0.39	0.35	0.429
Entrée salle Panneau de la Découverte	6	2.395	1.369				0.83			2.22				1.09			0.83	0.73	0.62	0.5	0.33	0.32	0.32	0.32	0.401
En bas du Panneau de la Découverte	7	1.222	0.017					1.4			2.04	2.29	1.26					0.75	0.64	0.48	0.38	0.36	0.37	0.36	
En bas du Panneau de la Découverte	8	0.099	0.702							2.98							0.83	0.74	0.62	0.49	0.4	0.37	0.39	0.41	
Sous le Panneau de la Découverte	9	5.136	0.004		6						1.37						0.75	0.64	1.25	0.53	0.27	0.24	0.26	0.31	4.232
Sous le Panneau de la Découverte	10	0.011	0.131		2.49			0.56	1.17	1.49	2.16						0.73	0.66	0.57	0.46	0.24	0.22	0.25	0.33	0.324
Entre Pont d'Argile et Locus 1	11	4.294	8.017					1.86		0.42			1.12					0.7	0.61	0.48	0.43	0.37	0.37	0.39	0.491
Entre Pont d'Argile et Locus 1	12	0.098	0.143						3.68								0.77	0.73	0.61	0.49	0.36	0.36	0.35	0.35	0.446
Aval du Locus 2	13	1.379	0.018					0.33	1.45								0.75	0.65	0.55	0.43	0.22	0.25	0.28	0.31	0.396
Aval du Locus 2	14	1.51	2.047	5.83						0.5							0.78	0.63	0.57	0.45	0.25	0.25	0.28	0.35	0.433

Tableau 21 : T30 de quelques mesures de 50 à 10 000 Hertz de la première campagne de mesures. Les cases grisées correspondent à une absence de données, les mesures « aberrantes » sont en orange.

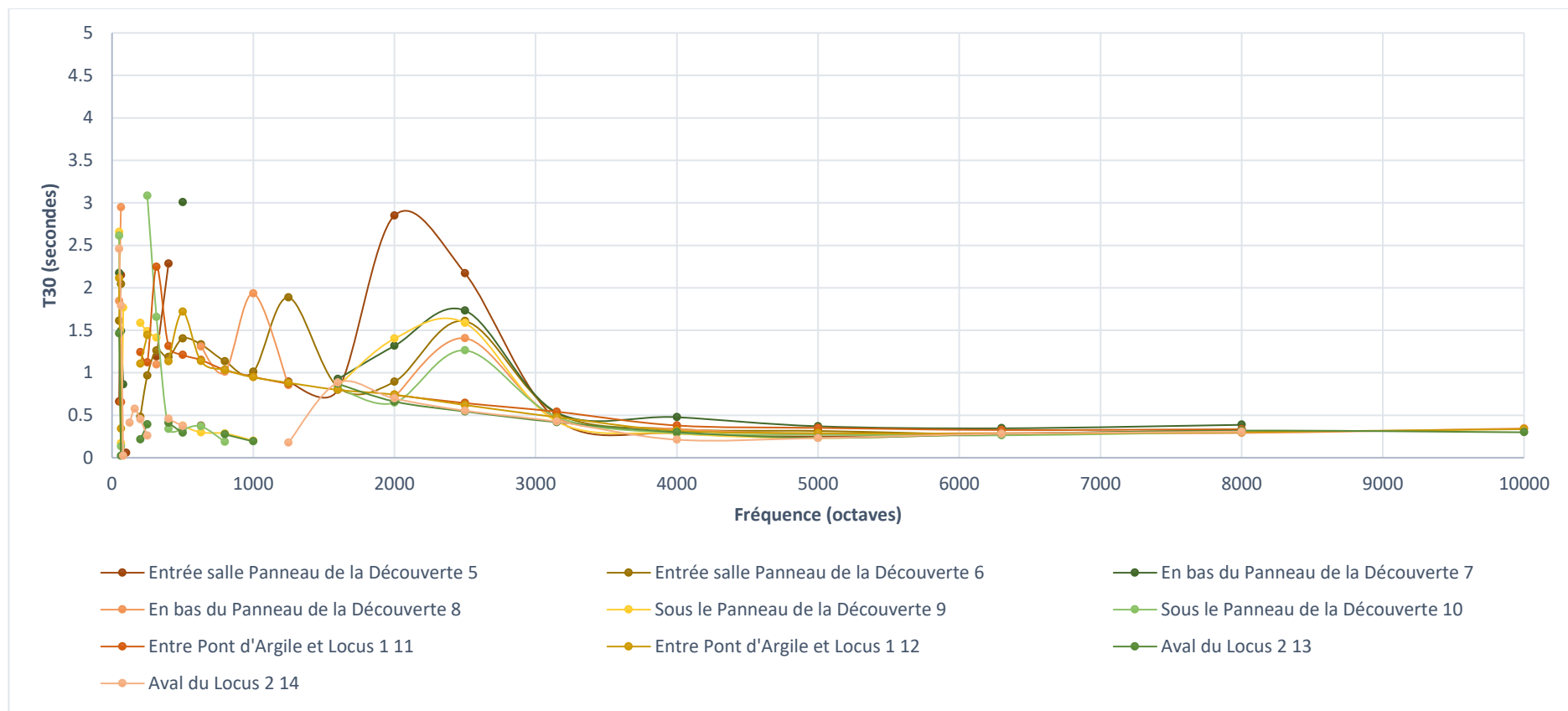
Localisation	N°	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000	6 300	8 000	10 000
Entrée salle Panneau de la Découverte	5	0,661	2,149		0,06					1,19	2,29		0,37			0,89	0,8	2,85	2,17	0,45	0,29	0,25	0,28	0,32	
Entrée salle Panneau de la Découverte	6	1,61	2,042					0,48	0,97	1,26	1,19	1,4	1,33	1,14	1,01	1,89	0,83	0,89	1,61	0,52	0,34	0,32	0,28	0,31	
En bas du Panneau de la Découverte	7	2,174	1,492	0,86								3,01					0,93	1,32	1,73	0,53	0,48	0,37	0,35	0,39	
En bas du Panneau de la Découverte	8	1,846	2,947							1,1			1,31	1,01	1,93	0,85		0,72	1,41	0,46	0,34	0,28	0,29	0,29	0,345
Sous le Panneau de la Découverte	9	2,655	0,171	1,76				1,59	1,49	1,41		0,38	0,3	0,29	0,2		0,84	1,4	1,58	0,43	0,28	0,23	0,28	0,31	
Sous le Panneau de la Découverte	10	2,612	0,131						3,08	1,65	0,34	0,34	0,37	0,19			0,82	0,65	1,26	0,48	0,29	0,27	0,26	0,3	
Entre Pont d'Argile et Locus 1	11	-9,579	0,654					1,24	1,12	2,25	1,31	1,21	1,15	1,03	0,95	0,87		0,74	0,64	0,54	0,38	0,35	0,33	0,34	
Entre Pont d'Argile et Locus 1	12	2,113	0,34					1,1	1,44		1,14	1,72	1,14	1,03	0,95	0,88	0,8	0,74	0,62	0,48	0,32	0,29	0,28	0,3	0,336
Aval du Locus 2	13	1,463	0,022					0,21	0,39		0,41	0,29		0,27	0,19		0,87	0,66	0,54	0,42	0,3	0,23	0,28	0,32	0,299
Aval du Locus 2	14	2,457	1,787	0,02		0,41	0,58	0,45	0,26		0,46	0,37				0,18	0,88	0,7	0,55	0,43	0,21	0,23	0,28	0,31	

Tableau 22 : T30 de quelques mesures de 50 à 10 000 Hertz de la seconde campagne de mesures. Les cases grisées correspondent à une absence de données, les mesures « aberrantes » sont en orange.



Graphique 32 : Évolution, pour les mesures n°5 à n°14 de la première campagne de mesures réalisées à Cussac, du T30 en fonction des tiers d'octave, hors mesures supérieures à 5 secondes.

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation



Graphique 33 : Évolution, pour les mesures n°5 à n°14 de la seconde campagne de mesures réalisées à Cussac, du T30 en fonction des tiers d'octave, hors mesures supérieures à 5 secondes.

e) *Discussion*

En premier lieu, nous pouvons noter que les données obtenues sont suffisantes en fonction de nos objectifs (c'est-à-dire les comparer aux données des simulations pour vérifier que ces dernières reproduisent correctement le phénomène en jeu), mais nécessiteraient d'être de meilleure qualité pour une analyse plus approfondie, en particulier en ce qui concerne les fréquences les plus basses. Cela est probablement lié à notre matériel, qui n'était pas assez puissant, en particulier sur les basses fréquences. En effet, le choix du matériel a été influencé par les contraintes d'accès aux sites : puisqu'il devait être transportable à deux dans un contexte souterrain à l'accès parfois délicat, il était indispensable qu'il soit compact, maniable et léger et disposant d'une excellente autonomie. Il paraît alors d'autant plus important de prendre le temps de réaliser deux balayages de fréquence pour chaque mesure. En effet, bien que les coefficients de régression soient moins bons lors de deux balayages de fréquences (peut-être que la présence de deux balayages augmente la variabilité des mesures, biaisant ce coefficient), les T30 obtenus ainsi semblent plus proches de la réalité et les données par octave sont plus nombreuses. Lors des comparaisons avec les simulations, ce sont ces données, issues de deux balayages de fréquences, qui seront utilisées.

E. Calibration du logiciel

Nous avons présenté dans le sous-chapitre précédent les mesures d'absorption d'énergie acoustique de quelques matériaux présents dans les grottes et les mesures de réponses impulsionnelles réalisées sur le terrain, dans les grottes de Leye et de Cussac. Les mesures d'absorption d'énergie acoustique ont servi à attribuer un premier coefficient d'absorption moyen des matériaux au logiciel *Icare*. Les mesures sur le terrain, elles, ont permis de comparer les résultats des simulations sous forme de TR avec ceux obtenus sur le terrain. Cela a permis d'affiner les coefficients d'absorption dans le logiciel de sorte que les temps de réverbérations obtenus par les simulations correspondent à ceux obtenus sur le terrain. Il est ainsi possible de proposer des simulations les plus proches possibles de la réalité grâce au logiciel *Icare* calé sur les données de terrain. Dans le sous-chapitre qui suit, nous décrivons les étapes nécessaires à cette calibration du logiciel.

1. Sélection des secteurs étudiés

Dans un premier temps, les informations spatiales récoltées sur le terrain nous ont permis de replacer virtuellement les couples émetteur-récepteur et d'intégrer leurs coordonnées dans *Icare*. Le modèle 3D de Leye étant complet, tous les secteurs ont pu être étudiés, mais nous avons fait le choix de retirer le secteur de l'Entrée, car son ouverture sur l'extérieur aurait pu biaiser les résultats, tandis qu'à Cussac, seuls les secteurs correspondant aux mesures n°5 à 14 ont pu être intégrés (voir Tableau 18 et Tableau 20 pour la correspondance entre numéro de mesure et nom de secteur).

2. Intégration des coefficients d'absorption

Dans un second temps, nous avons intégré les coefficients d'absorption issus des mesures au tube de Kundt dans *Icare*. En particulier, nous avons choisi d'intégrer les valeurs issues des mesures sur calcaires de Leye et de Cussac dans les modèles 3D respectifs de ces deux cavités. Ces valeurs, initialement données en pourcentages, ont été converties en nombre pour le logiciel (Tableau 23).

Fréquence (Hz)	Calcaire - Cussac	Calcaire - Leye
200	0,08	0,05
250	0,03	0,04
315	0,02	0,03
400	0,03	0,04
500	0,04	0,05
630	0,05	0,05
800	0,06	0,05
1 000	0,07	0,04
1 250	0,07	0,03
1 600	0,08	0,08
2 000	0,04	0,04
2 500	0,04	0,05
3 150	0,03	0,09
4 000	0,04	0,17

Tableau 23 : Coefficient d'absorption moyen d'échantillons de calcaires issus des grottes de Cussac et de Leye.

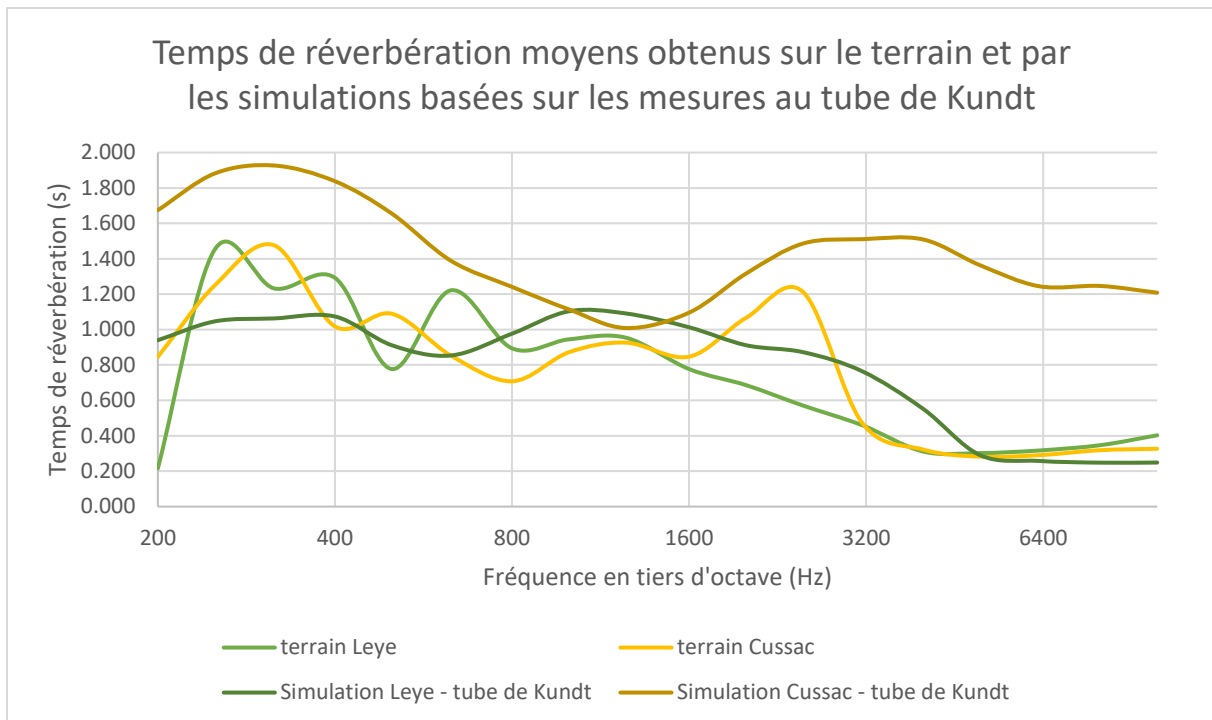
Icare peut intégrer des coefficients d'absorption jusqu'à 10 000 Hz, plafond commun à nos mesures *in situ*. C'est pourquoi nous avons extrapolé les mesures issues du tube de Kundt pour proposer, dans *Icare*, des coefficients d'absorption jusqu'à 10 000 Hz (Tableau 24).

Fréquence (Hz)	Calcaire - Cussac	Calcaire - Leye
5 000	0,05	0,18
6 300	0,05	0,18
8 000	0,05	0,18
10 000	0,05	0,18

Tableau 24 : Coefficients d'absorption extrapolés entre 5000 et 10 000 Hz.

3. Comparaison des TR simulés et des TR de terrain

Les TR obtenus à la suite du calcul par *Icare* ont été comparés aux TR obtenus lors des mesures de terrain (Graphique 34) pour chaque tiers d'octave entre 200 et 10 000 Hz. Le TR proposé par *Icare* est un TR dit « optimal », c'est-à-dire qu'il s'agit du T10, T20 ou T30 qui a la meilleure corrélation entre la pente théorique (une droite) et la pente simulée.

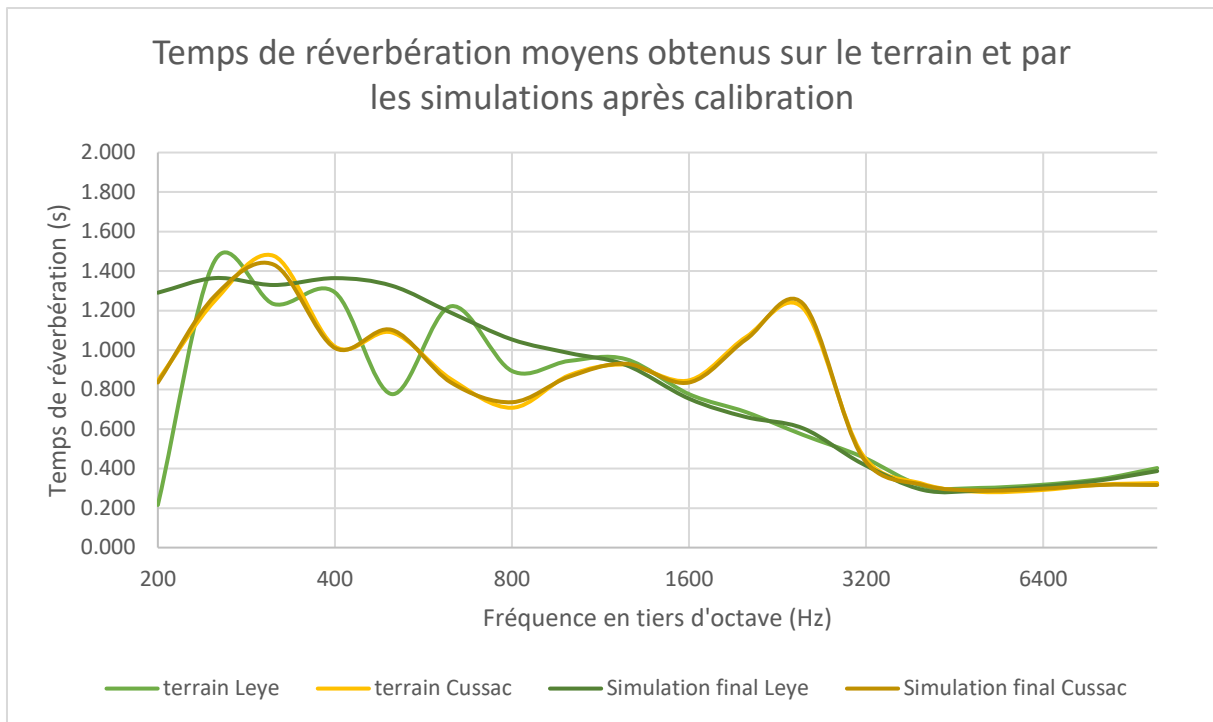


Graphique 34 : Comparaison des Temps de Réverbération moyens obtenus sur le terrain et par les simulations à partir des coefficients d'absorptions mesurés au tube de Kundt.

On observe que dans le cas de la grotte de Leye, les TR simulés sont très proches des TR réels (souvent moins de 0,250 s de différence), alors que la simulation réalisée pour Cussac propose un TR globalement plus réverbérant que dans la réalité (jusqu'à 2 s de réverbération supplémentaire). Ces observations sont illustrées ici (Graphique 34) par les résultats moyennés de tous les secteurs.

4. Ajustement des coefficients d'absorption

L'étape suivante a été d'ajuster le coefficient d'absorption attribué aux matériaux dans *Icare* : si le TR des simulations est inférieur au TR réel, alors il faut diminuer le coefficient d'absorption, et inversement si le TR des simulations est supérieur au TR réel. L'objectif est que les TR simulés soient les plus proches possibles des TR mesurés *in situ*. Après ajustement des coefficients d'absorption, on obtient les TR du Graphique 35, selon les coefficients d'absorption du Tableau 25, appelés « coefficients d'absorption optimaux » dans la suite du texte, et qui seront utilisés dans toutes les simulations qui suivront.

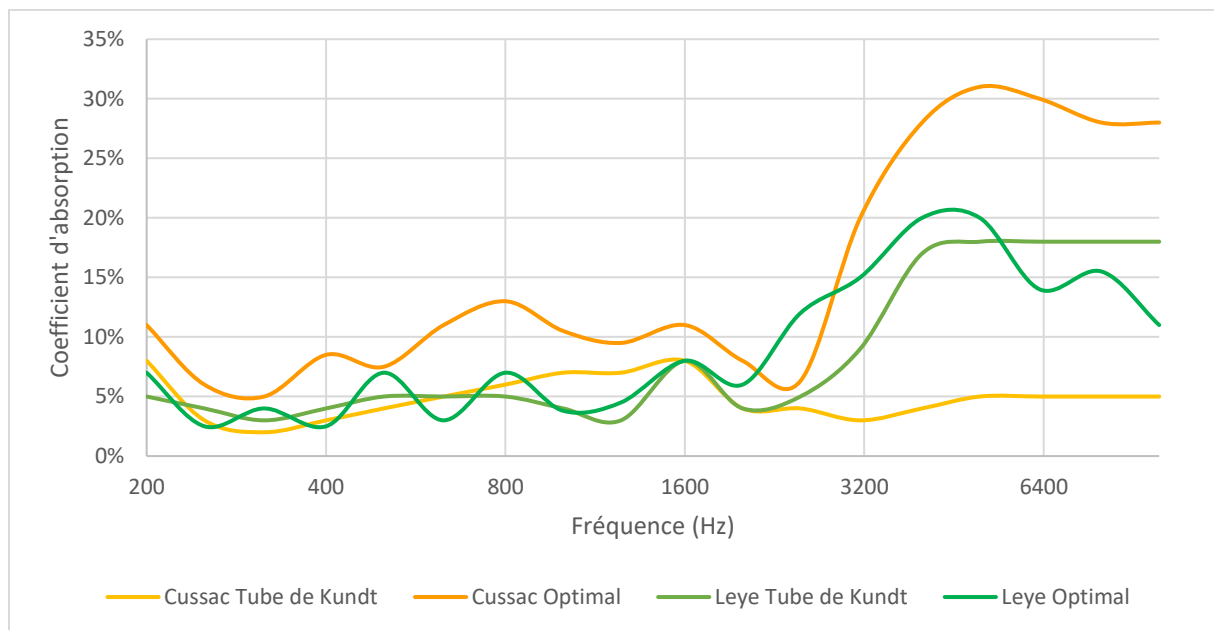


Graphique 35 : Comparaison des Temps de Réverbération moyen obtenus in situ et par les simulations

Fréquence (Hz)	Calcaire - Cussac	Calcaire - Leye
200	0,11	0,07
250	0,06	0,025
315	0,05	0,04
400	0,085	0,025
500	0,075	0,07
630	0,11	0,03
800	0,13	0,07
1 000	0,105	0,038
1 250	0,095	0,045
1 600	0,11	0,08
2 000	0,08	0,06
2 500	0,063	0,12
3 150	0,20	0,15
4 000	0,28	0,20
5 000	0,31	0,20
6 300	0,30	0,14
8 000	0,28	0,155
10 000	0,28	0,11

Tableau 25 : Coefficients d'absorption optimaux permettant aux simulations de proposer une restitution au plus proche du réel.

Le Graphique 36 permet de comparer la valeur des coefficients d'absorption optimaux avec les résultats des échantillons mesurés au tube de Kundt. Cela permet de remarquer que ces valeurs sont assez semblables pour Leye, avec un décalage moyen de 1 %, alors qu'à Cussac le coefficient d'absorption optimal est en moyenne plus élevé de 10 %, en particulier sur les hautes fréquences (Graphique 36). Cela peut s'expliquer par le fait que la surface du calcaire présent dans la grotte de Cussac a subi une dissolution partielle qui la rend très poreuse et la couvre de microreliefs qui jouent peut-être un rôle absorbant lors de la diffusion du son. À cela s'ajoute une morphologie de la cavité très complexe, avec de nombreux spéléothèmes (stalagmites, stalactites, draperies) qui ne sont pas toujours fidèlement représentés dans le modèle 3D.



Graphique 36 : Comparaison des coefficients d'absorption optimaux et des échantillons de Leye et de Cussac.

5. Coefficient d'absorption pour Lascaux

La problématique concernant le site de Lascaux est différente de celle des deux autres cavités, puisqu'aucune mesure n'a pu être réalisée sur site. Cependant, des mesures au tube de Kundt sur des échantillons de calcaires issus des mêmes bancs que ceux présents dans la cavité ont été menées. Nous avons observé précédemment qu'à Leye les coefficients d'absorptions optimaux étaient assez proches des coefficients issus des mesures au tube de Kundt tandis que ceux de Cussac sont plus élevés. Pour ces raisons nous avons testé trois variations de coefficients

d'absorption à partir des valeurs issues des mesures au tube de Kundt : dans le premier cas, aucun changement n'a été apporté aux valeurs (hypothèse 1), dans les deux autres cas les valeurs au-delà de 3 150 Hz ont été relevées, soit légèrement, en suivant le profil de la grotte de Leye (hypothèse 2), soit fortement, selon les valeurs de la grotte de Cussac (hypothèse 3).

Nous avons ensuite réalisé une écoute de sons simulés en un même lieu selon les différentes hypothèses (pour une écoute, voir Annexe 8). La première simulation produit des sons trop réverbérants pour le milieu karstique. Les deux autres hypothèses proposent des rendus réalistes et très proches l'un de l'autre. Nous avons décidé de conserver les coefficients d'absorption de l'hypothèse 2, qui se base sur l'évolution des coefficients dans la grotte de Leye car, contrairement à Cussac et comme à Leye, les calcaires de Lascaux n'ont pas subi de dissolution partielle importante mais dans certains secteurs ils peuvent être recouverts de calcite. De plus, la morphologie de la grotte de Lascaux est plus proche de celle de Leye (p. ex. profil en « trou de serrure », calcaires couverts de calcite, mais avec peu de spéléothèmes).

6. Discussion

Nous avons ici essentiellement travaillé à partir des moyennes des secteurs précédemment nommés. Notre objectif étant de pouvoir réaliser des simulations acoustiques en dehors des localisations des couples Source-Récepteur utilisés sur le terrain, il nous a paru plus important de faire correspondre la moyenne des mesures plutôt que quelques secteurs précis. Évidemment, une attention à tout de même été portée à ce qu'aucun secteur n'ait des données simulées trop différentes des données réelles.

Il ne semble pas y avoir de modèle universel qui pourrait s'ajuster à n'importe quelle grotte, il paraît donc inévitable de devoir réaliser des mesures sur site si possible. Lorsque l'accès au site est trop limité, les mesures au tube de Kundt peuvent être une alternative, à condition de les accompagner par des mesures *in situ* dans une cavité présentant un environnement géologique et géomorphologique proche de la grotte étudiée. Dans le cas où des mesures *in situ* sont possibles, les mesures au tube de Kundt permettent surtout un gain de temps en ciblant les coefficients d'absorption par fréquence, ce qui permet de ne pas avoir à tester toutes les possibilités entre 0 et 100 % d'absorption.

Partie 2 - Mise en place des outils de simulation

Enfin, il faut noter que pour l'instant le logiciel ne peut prendre en compte qu'un coefficient d'absorption général, sans distinction entre les différents matériaux (ces coefficients chiffrés pourraient un jour être assignés à une texture dans un modèle numérique 3D afin d'optimiser les simulations). L'intérêt de réaliser des mesures *in situ* est alors d'autant plus important puisqu'il permet de prendre en compte les variations de matériaux (présence d'argile et/ou de calcite) et de corriger le coefficient d'absorption en fonction.

~ Partie 3 ~

Envisager l'humain dans son contexte,
L'apport des simulations

CHAPITRE 1 – LA GROTTE DE CUSSAC

A. Fondements archéologiques

1. Historique des interventions

a) *La découverte*

Le 16 septembre 2000, M. Delluc et F. Massoulier, spéléologues du spéléo-club de Périgueux, prospectèrent sur la commune du Buisson-de-Cadouin. C'est alors qu'ils identifièrent l'entrée d'une cavité d'une douzaine de mètres de long suivie d'une chatière et d'un passage très bas d'une dizaine de mètres, bloqué à son extrémité par un éboulis de blocs et de plaquettes calcaires (Delluc, 2000 ; Aujoulat *et al.*, 2001a, 2001b, 2002). Ce porche d'entrée semble connu dès le début du 20^{ème} siècle puisque les travaux de D. Peyrony (Peyrony, 1950) puis d'É. Peyrony en font mention, tandis que ces dernières décennies d'autres spéléologues étaient déjà arrivés jusqu'à l'éboulis. Mais M. Delluc se montrera le plus tenace puisqu'il retourna jusqu'à l'éboulis le samedi suivant, où il constata la présence d'un courant d'air annonçant un élargissement de la galerie derrière l'éboulis. Il y retourna le samedi 30 septembre, et cette fois-ci réussit à réduire l'obstacle de manière à pouvoir passer. C'est alors qu'il découvrit une très grande galerie qu'il parcourut sur une centaine de mètres, à la suite desquels il reconnut les premières gravures de ce qui sera par la suite appelé à juste titre le « Panneau de la Découverte », et plus loin les restes humains des locus 1 et 2 (Delluc, comm. pers.). Le dimanche suivant, N. Aujoulat et C. Archambeau procédèrent à l'expertise du fonds graphique et des restes humains présents dans la grotte, officialisant la découverte (Aujoulat *et al.*, *op. cit.*). Très rapidement après, et pour d'évidentes raisons de sécurité, la DRAC Aquitaine et le SRA commandèrent d'importants travaux dans la zone d'entrée afin d'en sécuriser et fermer l'accès.

Cette première étape de la découverte de Cussac est marquée par l'attention portée par l'inventeur aux sols et aux parois qu'il a su préserver au maximum en utilisant, à l'aller comme au retour de ses excursions, un unique cheminement qui sert aujourd'hui d'itinéraire balisé.

b) Mise en place des mesures conservatoires

À la suite des premières visites et de l'annonce officielle de la découverte, la priorité fut de protéger le site tout en permettant son étude scientifique. À cette fin, plusieurs axes ont été définis (Fourment *et al.*, 2012).

Maîtrise foncière du site

Au moment de sa découverte, la grotte de Cussac s'étendait dans le sous-sol de plusieurs propriétés privées et de la commune du Buisson-de-Cadouin. Devant l'importance patrimoniale du site, l'État a engagé une campagne d'acquisition de ces parcelles, à commencer par les plus fréquentées et investies pour l'étude, soit le secteur de l'entrée et la Branche Aval (Fourment *et al.*, 2012). Quelques secteurs, situés plus profondément dans la cavité et à l'heure actuelle encore peu étudiés, n'ont pas été acquis mais sont tout de même accessibles par convention. Un seul demeure pour l'heure interdit d'étude et de diffusion faute d'entente avec les ayants-droits de l'ancien propriétaire décédé.

Le site a également été classé au titre des Monuments historiques en 2001, puis des Sites, et bénéficie ainsi d'une protection juridique et environnementale maximale (Jaubert *et al.*, 2012 ; Fourment *et al.*, 2012).

Travaux d'aménagement

Pour d'évidentes raisons de sécurité, les premiers travaux concernèrent la zone d'entrée dont le porche fut protégé derrière une grille et l'éboulis consolidé, par un tunnel artificiel de quelques mètres de long. À l'intérieur de la grotte, le seul aménagement consista en la mise en place d'une double rubalise, par la suite remplacée par des piquets soutenant des filins en inox, qui marquent le parcours souterrain à emprunter, large d'une cinquantaine de centimètres en moyenne (Jaubert *et al.*, 2012 ; Fourment *et al.*, 2012). Cette restriction permet de respecter l'intégrité des sols paléolithiques, en suivant le cheminement emprunté par M. Delluc et ses collègues lors de leurs premières explorations. Sur certains tronçons les plus difficiles, des passerelles inox ont été installées ainsi que des plateformes pouvant y accueillir temporairement du matériel (Aujoulat *et al.*, 2013).

Fréquentation du site

La fréquentation du site est strictement contrôlée : seuls les membres de l'équipe scientifique, les personnels du ministère de la Culture en charge de son suivi, et les entreprises ou laboratoires mandatés pour des travaux ou analyses ont le droit d'y pénétrer. Les heures d'entrée et de sortie de chacun sont enregistrées afin de suivre le temps de présence humaine cumulé dans la cavité. L'entrée n'est possible qu'en hiver, lorsque le taux de CO₂ est suffisamment bas (c'est-à-dire inférieur à 2 %, de novembre à avril en moyenne). La campagne de terrain a ainsi lieu en janvier pour une durée de trois à quatre semaines. Afin d'éviter toute contamination biologique, tout le matériel introduit est désinfecté, et le port d'une sur-combinaison en non-tissé est obligatoire (Aujoulat *et al.*, 2013).

Suivi climatique et environnemental

Afin d'adapter au site les mesures conservatoires et les consignes d'accès, une étude sur la fluctuation du taux de CO₂ ainsi que des mesures climatiques, ont été mises en place. Une thèse de doctorat sur l'hydrogéologie de l'ensemble du bassin versant (Peyraube, 2011) a permis d'établir le périmètre d'influences au niveau du massif. Cette meilleure connaissance environnementale du site a amené à la délimitation d'une zone de protection accompagnée de sa zone tampon dans le cadre du classement au titre des Sites, et a permis d'ouvrir la grotte à une étude scientifique globale à partir de 2008.

c) Projets actuels

La découverte d'une grotte si vaste (1,6 km de développé) et dans un si bon état de conservation fut tout d'abord une opportunité méthodologique : comment étudier cette cavité avec les contraintes conservatoires qui permettent, justement, de conserver les vestiges à analyser ? Parmi les développements méthodologiques majeurs, on peut citer l'adaptation des modèles 3D aux différentes disciplines telles que l'anthropologie (Peignaux *et al.*, 2019) ou les relevés d'art pariétal (Feruglio *et al.*, 2015), ou encore le développement d'un Système d'Information Géographique (SIG) en 3D (ou plutôt 2D et demie), tandis que le travail sur les TrAcS (acronyme défini par N. Aujoulat pour Traces d'Activités ; Ledoux *et al.*, 2017) a permis d'inventer une nouvelle discipline.

La mise en place d’une équipe scientifique pluridisciplinaire, groupée sous la formule administrative d’un « Projet Collectif de Recherche » ou PCR (2008, dir. J. Jaubert), a permis de réunir des compétences scientifiques et techniques de nombreuses disciplines (anthracologie, anthropologie, archéozoologie, art pariétal, colorants, datations, géomagnétismes, géosciences, paléogénétique, technologies osseuses et lithiques, topographie, topométrie et ichtnologie ; Aujoulat *et al.*, 2013). En parallèle des développements méthodologiques, chaque équipe a pu construire ses questions de recherches propres, mais aussi en collaboration avec les autres disciplines.

À la limite entre développement méthodologique et questions disciplinaires, se situe la ligne directrice du PCR, qui a pu être résumée ainsi : « du massif à la sanctuarisation de la paroi ornée » (Jaubert *et al.*, 2012). Ce projet, divisé en trois principaux axes de recherches (l’environnement naturel, la fréquentation animale et l’appropriation humaine) a pour finalité de faire dialoguer les différentes disciplines et de passer d’une approche pluridisciplinaire à une étude inter- voire transdisciplinaire de Cussac. Si les premières années qui ont suivi la mise en place du PCR ont essentiellement permis de rassembler des connaissances propres à chaque discipline, des problématiques résolument interdisciplinaires ont vu le jour ces dernières années, par exemple sur l’étude du Panneau de la Découverte, où les membres de l’équipe TrAcs, les pariétalistes et les géoarchéologues ont travaillé de concert sur le modèle 3D du panneau afin de comprendre comment les gravures ont pu être influencées par les microformes naturelles, ou comment leur aspect actuel a pu être modifié par l’altération du support (Ferrier et Konik, 2017 ; Feruglio *et al.*, 2020b). On peut aussi mentionner le travail conjoint des équipes « Art pariétal » et « TrAcs » au sujet de la classification – et de l’intentionnalité – de certaines « traces graphiques », qui ne correspondent formellement ni à la notion de manifestation artistique, ni à celle des traces fortuites (Feruglio *et al.*, 2020b).

2. Projet personnel

a) Organisation du dispositif pariétal

La maturation de ces questions d’ordre méthodologique et scientifique, ainsi que l’avancée des études pluridisciplinaires, ont progressivement amené à la mise en place d’un sujet de mémoire Recherche de master 2, en 2016, sur les critères de sélection des parois ornées par les Gravettiens. Ce mémoire, intitulé « Grotte de Cussac, élection des supports ornés :

déterminisme géologique, déterminisme culturel ? », avait pour objectif de faire se croiser les données issues de plusieurs des disciplines qui évoluent à Cussac afin de mieux comprendre les critères de sélection des supports ornés par les Paléolithiques et ainsi leur répartition (Jouteau, 2016). Dans ce travail, résolument interdisciplinaire, les critères investigués ont porté sur la visibilité des zones graphiques et des gravures, l'accès aux parois, la répartition des zones graphiques dans la cavité, l'agencement du dispositif pariétal, l'aspect et la nature du support, la topographie des panneaux, les relations entre ces derniers et les griffades d'ours, et les relations visuelles entre panneaux. Ces critères, renseignés pour 31 zones graphiques des branches Aval et Amont, ont été analysés à l'aide d'outils statistiques et de cartes topographiques (Jouteau *et al.*, 2019, 2020 ; Annexe 9).

Les résultats de ce travail indiquent que les panneaux peuvent être regroupés selon des affinités qui portent sur l'aspect de la surface investie, l'accès à la paroi, la localisation topographique et la potentialité de visibilité des motifs. Ainsi, les zones graphiques constituées d'un nombre très réduit, voire d'une seule entité graphique, forment le premier groupe. Elles sont localisées sur des supports calcaires à l'aspect lité, dans des couloirs qui offrent peu de recul aux visiteurs, ce qui ne permet pas à un groupe d'individus d'observer simultanément le panneau. Un second groupe est composé de panneaux situés sur des surfaces à l'aspect plutôt variable, mais localisés en des points topographiquement clés de la cavité, tels que des carrefours ou des intersections. La présence de plusieurs entités graphiques sans superposition permet, à priori, une bonne reconnaissance des motifs (avec nos éclairages et expériences modernes). Ces panneaux ne disposent pas d'un espace à proximité qui permettrait de les observer de façon statique, mais les difficultés d'accès et de stationnement en lieu et place des gravures nous permettent d'affirmer qu'ils n'ont pourtant pas été placés en fonction de la préférence ou du confort du ou des graveur(s), mais bien d'un code qu'il nous reste à définir. Enfin, de larges et planes surfaces ont été investies quant à elles pour les panneaux du troisième groupe reconnu. Ces panneaux sont situés sur des surfaces plafonnantes, loin du cheminement naturel, ce qui permet de les observer de loin, toujours en contrebas. L'omniprésence de ces facteurs permet de comprendre qu'il s'agit bien de critères recherchés. Les motifs sont ici orientés vers l'espace qui semble le plus accessible et confortable, sous-entendant peut-être la présence d'observateurs, de participants. Ce groupe peut lui-même être subdivisé en deux : dans un premier cluster, on retrouve des panneaux constitués d'un nombre restreint de motifs et situés particulièrement loin du cheminement naturel, tandis que le second cluster regroupe les panneaux les plus grands et les plus denses en entités graphiques de la cavité, formés par un nombre important de motifs,

parfois superposés. Une étude du Grand Panneau (Feruglio *et al.*, 2019) suggère que ce panneau peut être issu d’une performance dynamique et collective, de potentiels observateurs ou participants étant présents en même temps que les gravures pouvaient être réalisées.

Ces résultats suggèrent alors qu’un même geste, conduisant à la création de ce que nous appelons une zone graphique, a pu être issu d’intentions différentes, pour une utilisation individuelle (groupes 1 et 2) ou collective (groupe 3). Ces résultats montrent aussi qu’un dialogue s’est installé entre l’environnement naturel (c’est-à-dire la géologie et la topographie des lieux) et l’environnement culturel.

Enfin, il faut nuancer nos interprétations par le fait que certains panneaux ne rentrent pas strictement dans les groupes proposés (des facteurs non investigués pour cette première étude pouvant en être la raison) et que nos résultats sont incomplets, puisque l’étude portait sur une sélection de 31 zones graphiques (sur les 70 connues jusqu’à présent). Mais surtout, ce travail a montré ses limites : l’utilisation d’un éclairage moderne biaise profondément les critères d’analyse de la visibilité et des cheminements, l’impossibilité de se mouvoir librement nous limite dans notre compréhension des obstacles rencontrés par les Paléolithiques et de l’investissement qu’ils ont fait du milieu souterrain, et certains critères, tels que l’acoustique, n’ont par exemple pas pu être investigués.

b) Problématique

C’est à partir de ces réflexions, soulevées tant par les différentes équipes qui évoluent à Cussac que par nos propres travaux (Jouteau *et al.*, 2020), que nous proposons ici une approche enrichie par des simulations numériques afin de mieux comprendre les modalités de l’investissement du milieu souterrain par les Gravettiens à Cussac.

Dans un premier temps, nous allons revenir sur l’évolution de la cavité : quel était son aspect lors de sa fréquentation au Gravettien ? Quelles différences de géologie ou de géomorphologie existent entre la cavité actuelle et celle que les Gravettiens ont connue et investie ? Ce chapitre sera l’occasion de présenter un plan complet et détaillé de l’ensemble de la cavité mais aussi du secteur modélisé où nous réaliserons les simulations numériques, comprenant la salle du Panneau de la Découverte et les locus 1 et 2.

Dans un second temps, nous développerons une approche sur les déplacements dans la grotte. Dans le secteur modélisé, de nombreux obstacles (avancées rocheuses, rétrécissements, entonnoirs de soutirage et blocs effondrés) perturbent le cheminement, et une analyse des sols menée par l'équipe TrAcs a permis de déterminer quels chemins semblent avoir été préférentiellement empruntés par les Paléolithiques. Nos simulations, d'éclairages et d'écholocalisation, auront pour objectif de mieux comprendre les choix opérés par les Paléolithiques.

Nous présenterons, dans le troisième sous-chapitre, une étude de la visibilité des surfaces du Panneau de la Découverte: Quels sont ses champs de visibilité en fonction de l'éclairage ? Quel(s) espace(s) semble(nt) le(s) plus approprié(s) à l'observation de ces panneaux, et avec quel éclairage ? Quel éclairage semble le plus adapté à la création du panneau ?

Enfin, nous nous intéresserons à l'acoustique de la grotte de Cussac. En janvier 2019, I. Reznikoff, musicologue qui a déjà eu l'occasion de travailler sur l'acoustique des grottes ornées (Reznikoff et Dauvois, 1988 ; Reznikoff, 2006, 2008, 2010, 2012), est venu afin de réaliser une analyse sensorielle de l'acoustique d'une partie de la cavité. Dans le même temps, nous avons réalisé des mesures acoustiques dans les branches Amont et Aval de la cavité. Ces deux études permettront dans un premier temps de proposer une étude acoustique globale d'une partie de Cussac. Dans un second temps, une analyse plus poussée de l'acoustique du secteur modélisé sera envisagée. En particulier, les simulations permettront d'atteindre des secteurs non accessibles physiquement.

B. Cussac au Gravettien

1. Contexte actuel

Comme nous l'avons vu précédemment, les indices de fréquentations tendent à montrer que la grotte profonde n'a été investie par les groupes humains qu'au Gravettien moyen (Jaubert *et al.*, 2017). Avant de proposer une restitution des lieux tels que les ont connus les Gravettiens, nous proposons de revenir sur la grotte actuelle. Un plan complet de la cavité est également disponible (Figure 114).

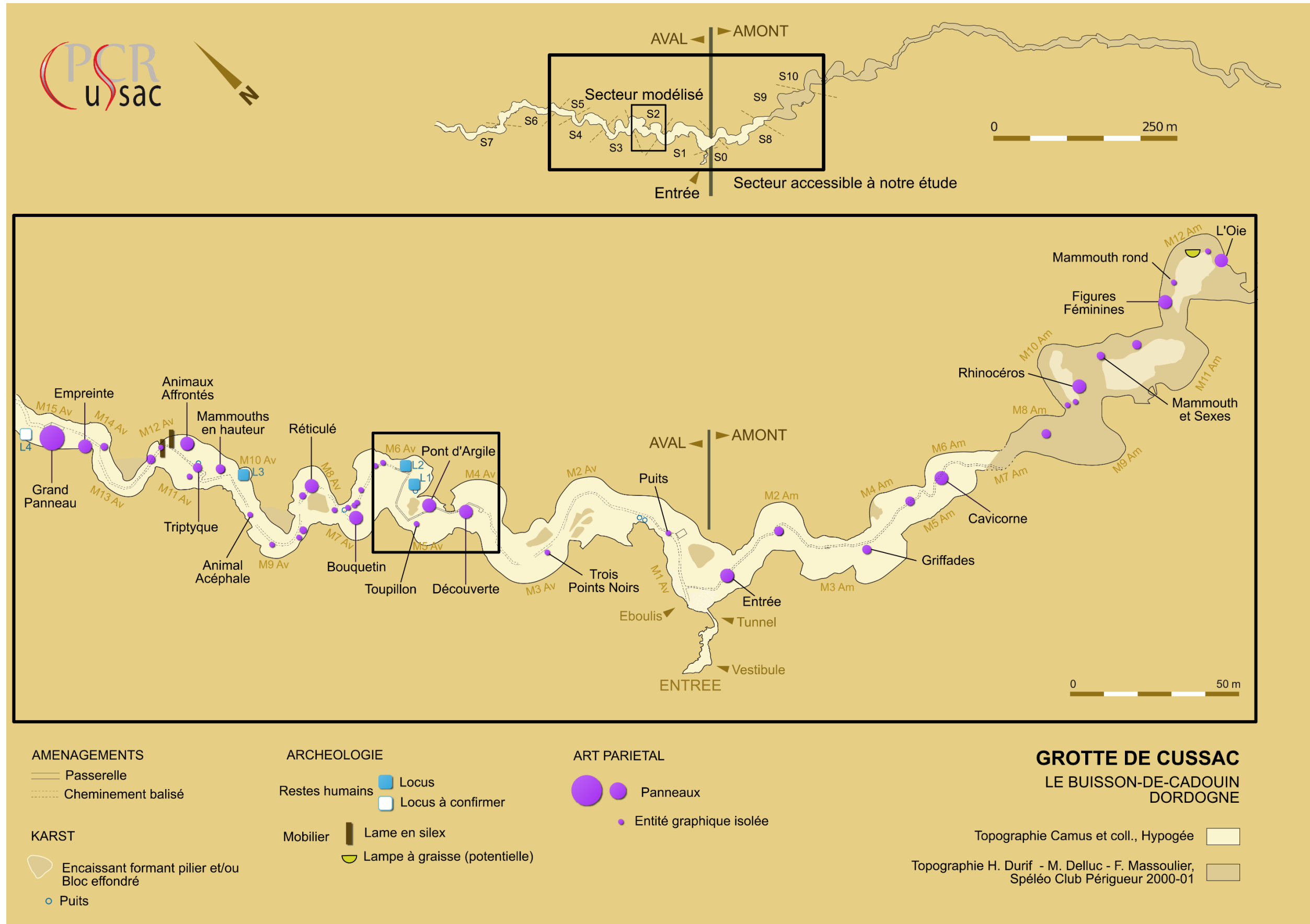


Figure 114 : Plan de la cavité, avec localisation des locus à restes humains et zones graphiques.

a) Structuration du réseau ²³

La grotte s'est formée depuis un réseau de fractures d'orientations N110 et N140 (respectivement de directions pyrénéenne et hercynienne ; Aujoulat *et al.*, 2001a). Cette fracturation a été exploitée sous la forme d'un chenal de voûte (Figure 115) et a permis le creusement d'une galerie par exploitation verticale des fractures.

Dans une seconde phase, le réseau a abrité une rivière souterraine s'écoulant de l'amont vers l'aval. Selon son niveau et son hydrodynamisme, des phases de creusement en méandre (formant les niveaux médians +1 et +2 de la cavité) ont alterné avec des phases de comblement par des argiles de décantation (Figure 115 ; Camus, 2017, 2020). La présence de ces argiles indique des phases de dynamique stagnante. Lors du creusement du niveau inférieur +1, une partie de ces sédiments plaqués lors de la formation du niveau +2 s'est décolmatée, et des blocs du réseau moyen se sont effondrés (Figure 115).

L'évolution morphologique des vallées alentours a provoqué l'arrêt du fonctionnement fluvial du réseau, marquant le début d'une troisième phase d'évolution de la cavité. Des sédiments constitués de géli fractas se sont déposés de l'aval vers l'amont, soit dans le sens opposé aux écoulements précédents. Ces dépôts semblent avoir atteint la voûte de la cavité au Terminus Aval, tandis que le point d'extension maximale de ce remplissage atteint le Locus 1. À cette époque, la grotte n'était parcourue que par un ruisseau, et des concrétions ont commencé à se mettre en place. Enfin, le canyon de surcreusement -1 fut mis en place lors d'une dernière étape, toujours active aujourd'hui (Figure 115).

²³ L'étude de la structuration du réseau a essentiellement été réalisée par H. Camus (cabinet Protée)

Partie 3 – Envisager l’humain dans son contexte, L’apport des simulations

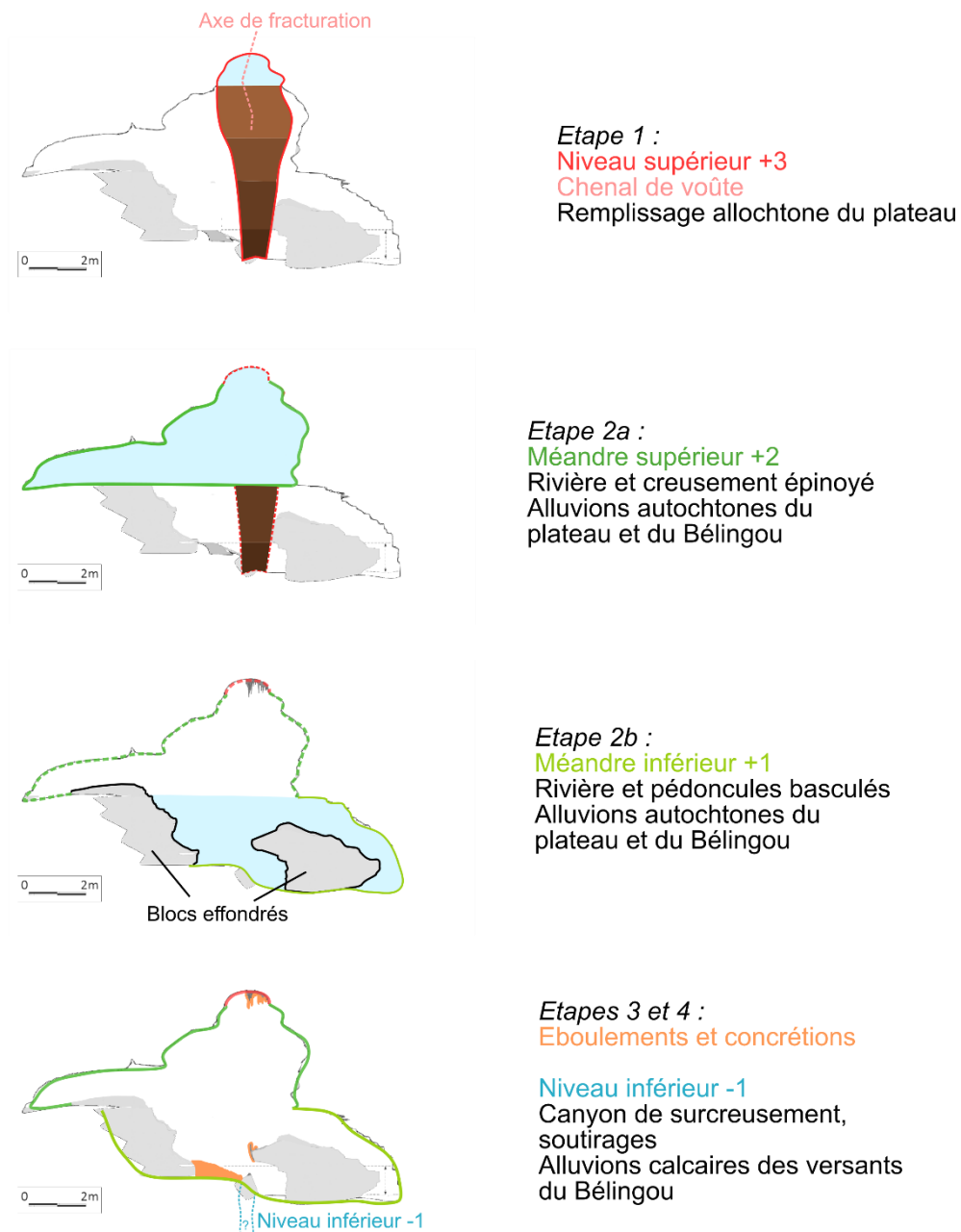


Figure 115 : Évolution du creusement d’une galerie, exemple de la section du Panneau des Animaux Affrontés (doc. H. Camus, Protée, modifié).

b) Géologie

Les dépôts calcaires qui forment la grotte de Cussac se sont mis en place dans un milieu de dépôt agité, proche du littoral, et sont donc difficile à discriminer, la distinction entre les différents niveaux étant fondée sur la présence de certains microfossiles (Ferrier *et al.*, 2017a ; Platel, *et al.*, 2020a).

La roche est composée d'un calcaire sableux de couleur ocre constitué par des allochèmes (éléments d'origines chimiques et biochimiques) et des éléments détritiques (notamment des grains de quartz et de feldspaths) qui sont cimentés par de la sparite et de la microsparite (forme de cristaux de calcite). La surface des parois est affectée par de la dissolution partielle sur 2 à 3 mm de profondeur, ce qui provoque un enrichissement en fer de la surface, lui donnant sa couleur ocrée. Dans le même temps, la surface devient plus poreuse et plus tendre, donc plus facile à graver. Les gravures dévoilent alors le calcaire sain, blanc, au fond du trait, ce qui les met en valeur (Ferrier *et al.*, 2017a).

Le réseau est creusé dans la Formation de Journiac (Crétacé supérieur), et au sein des secteurs accessibles, quatre niveaux peuvent être distingués à l'œil nu (Platel *et al.*, 2020b) :

- Au sommet, le chenal de voûte est creusé dans un calcaire bioclastique (unité 5).
- Sous le chenal de voûte mais assez haut dans la cavité se trouve le macrofaciès le plus homogène de la grotte. Constitué d'un calcaire jaune très gréseux, il est d'aspect massif, sans structure interne visible sur une puissance de deux à quatre mètres (unité 4).
- L'unité 3 est constituée d'un calcaire bioclastique peu gréseux et de couleur crème. Il est caractérisé par la présence de plusieurs bancs, lui donnant un aspect lité.
- La base est formée, sur un à deux mètres, par un calcaire bioturbé jaune plus ou moins foncé à la surface très irrégulière (unité 1).

c) Répartition des zones graphiques et vestiges archéologiques

Ce que l'on remarque rapidement, c'est que malgré la grande homogénéité des thèmes et des conventions graphiques, les panneaux gravés et autres vestiges archéologiques sont inégalement répartis au sein de la grotte. Ainsi, jusqu'à présent, les vestiges humains et les lames de silex ont uniquement été découverts en Branche Aval, tandis que la Branche Amont dispose jusqu'ici des deux seules lampes à graisse (Fourment, 2020) et du seul outil en matière dure animale, la pointe en bois de renne (Goutas, 2020).

En ce qui concerne les zones graphiques, elles sont plus nombreuses en aval qu'en amont, avec une distribution qui ne semble pas aléatoire. En amont, se trouvent essentiellement des panneaux avec un nombre réduit de motifs, où ces derniers, fréquemment issus de thématiques « rares », sont souvent mis en valeur : panneaux du Rhinocéros, de l'Oie, des Figures Féminines, du Mammouth et Sexes, notamment. À l'inverse, ce type de panneau est plutôt rare

dans la Branche Aval, qui est principalement ponctuée d'entités graphiques isolées et de panneaux de grandes dimensions, aux motifs nombreux, parfois jusqu'à former des palimpsestes (Grand Panneau, panneaux de la Découverte, du Bouquetin, des Animaux Affrontés, du Passage et du Fond ; Feruglio *et al.*, 2020a ; Feruglio et Bourdier, 2020). Ces ensembles monumentaux sont souvent mis en valeur de part une disposition centrale et plafonnante au sein de leur espace topographique.

2. Évolution de la cavité

Si la grotte de Cussac semble avoir peu évolué depuis l'incursion gravettienne (en témoignent les sols qui ont conservé des traces anthropiques, voire même antérieures, comme des empreintes ursines ; Ledoux, 2020), il est tout de même important d'établir un bilan des modifications qui ont eu lieu afin de connaître les limites de notre étude.

a) L'entrée de la grotte

Trois zones obstruent la galerie actuelle : le Terminus Amont, le Terminus Aval, et la zone d'éboulis de l'entrée actuelle. Les extrémités des branches aval et amont semblent avoir été obstruées avant le Gravettien, donc avant les premières incursions humaines documentées. L'entrée gravettienne, en l'absence pour l'heure d'études plus complètes, est considérée correspondre à l'entrée actuelle colmatée par l'éboulis (Jaubert *et al.*, 2017).

Aujourd'hui, l'entrée dans la grotte s'effectue depuis un porche, à travers un conduit artificiel et désormais cimenté qui traverse la zone d'éboulis (Figure 116). Un sondage réalisé dans l'entrée de la grotte (S1) a permis de mieux comprendre les dynamiques d'obstruction du porche et une reconstitution de l'entrée au Gravettien a été réalisée selon deux hypothèses. Selon la première, l'éboulis à travers la cheminée n'avait pas commencé à se mettre en place, l'entrée est alors très ouverte, avec un porche d'environ cinq mètres de haut. La seconde propose un comblement qui aurait débuté, avec un porche d'une hauteur comprise entre deux et quatre mètres. Dans les deux cas, cela signifie que le passage permettant l'entrée au sanctuaire n'offrait pas de difficulté physique, et que la lumière du jour pénétrait probablement jusqu'à quelques dizaines de mètres à l'intérieur de la cavité, tandis qu'aujourd'hui, nous sommes

immédiatement plongés dans l'obscurité. Il semble qu'au Gravettien, le sol de circulation de la zone d'Entrée était constitué soit par des sédiments ruisselés, soit par les premières accumulations gravitaires (Dugas, 2017 ; Ferrier *et al.*, 2020). L'hypothèse actuellement admise est donc que l'entrée se faisait par le même secteur, bien que son aspect devait être très différent.

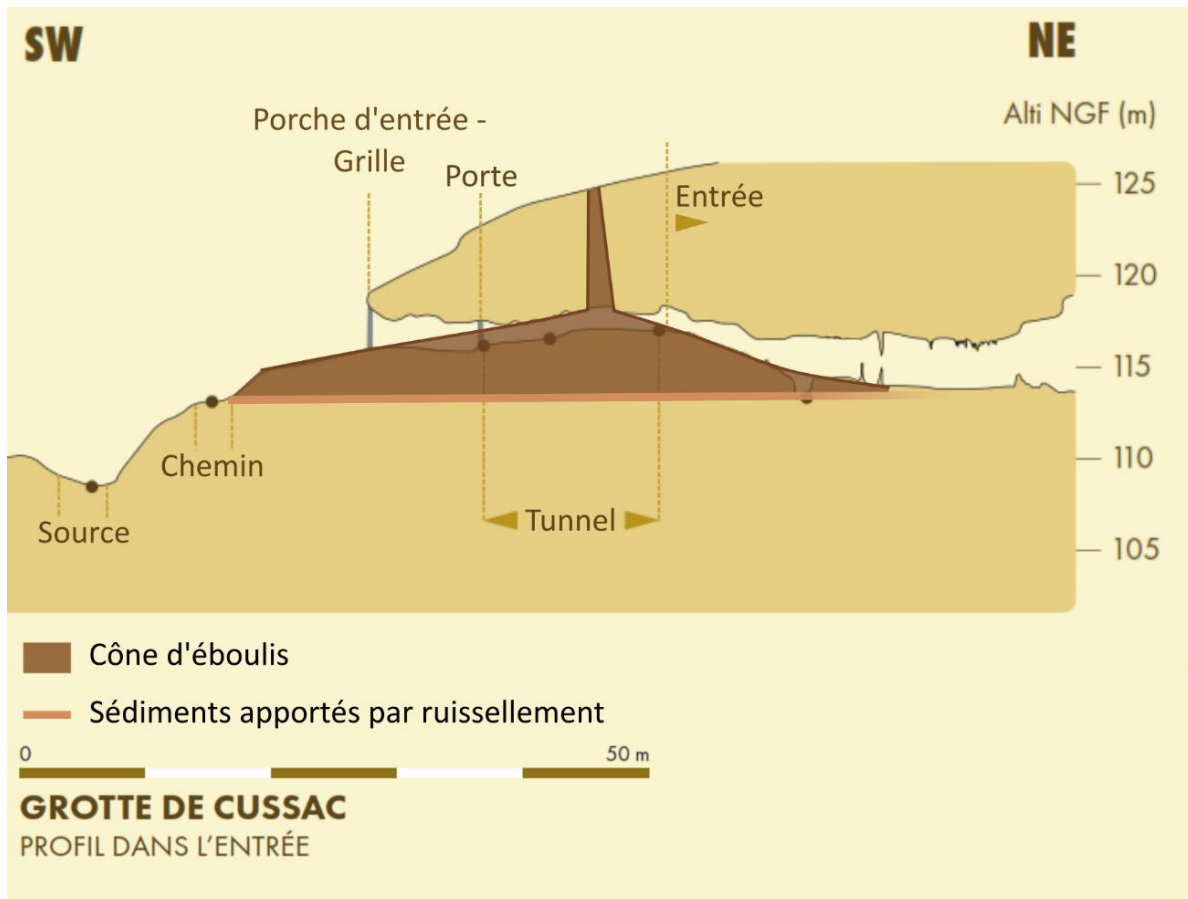


Figure 116 : Coupe topographique de l'éboulis d'entrée de la grotte. Tronçon intérieur extrait par X. Muth à partir des données lasergrammétriques (Scanner Patrimonio e Industria), tronçon extérieur levé par tachéométrie (X. Muth et H. Camus), DAO F. Lacrampe-Cuyaubère.

La zone vestibulaire, qui s'étend du porche de l'abri jusqu'au sommet du cône d'éboulis qui bloque l'accès à la cavité elle-même, semble avoir continué à être occupée même après l'obstruction de la zone du tunnel.

En effet, D. Peyrony, en 1912 (Peyrony, 1950), fouille un site appelé « La Truffière » qui semble correspondre (mais sans preuve) au porche actuel de la grotte de Cussac. Il y extrait du matériel lithique qu'il divise en deux ensembles. Il attribue le premier au Magdalénien supérieur et le second à l'Azilien (Peyrony, 1950). Par la suite, son fils, É. Peyrony, fouillera la zone

vestibulaire, mais ses résultats demeureront inédits (Aujoulat *et al.*, 2002). Un réexamen de la série Peyrony (composée de 26 artefacts lithiques) par M. Langlais et S. Ducasse a précisé sa probable appartenance au Magdalénien moyen ou récent (Jaubert *et al.*, 2017).

Enfin, l’aménagement moderne du vestibule et les rectifications des coupes successives du couloir d’accès à la cavité ont mis au jour des vestiges archéologiques plus récents ; outre des vestiges fauniques holocènes, des restes humains, tous fragmentaires (fémur, ulna, scapula, fragments de côtes), ont aussi été découverts. Leur aspect et patine sont semblables, et seul un individu, immature, semble présent. Un échantillon daté place cet ensemble à la fin du Néolithique : 3 497 – 3 105 cal BC (Jaubert *et al.*, 2017).

b) Évolution des sols

Des écoulements d’eau postérieurement au Gravettien sont attestés par la présence d’argiles de décantation sur les vestiges osseux du Locus 2. D’après Konik et coll. (2020), ces argiles sont laminées, ce qui évoque l’existence de plusieurs épisodes d’inondations espacés par des décrues. L’absence d’argile sur les os du Locus 1, légèrement surélevés par rapport au Locus 2, montre que les crues n’allaient pas suffisamment haut pour les atteindre (Henry-Gambier *et al.*, 2013 ; Kacki *et al.*, 2020). Cependant, ces épisodes n’ont déposé que quelques millimètres de sédiments et n’étaient pas assez puissant pour participer à l’érosion des sols paléolithiques, comme en témoignent la présence d’empreintes de pas dans ces zones inondées. Les sols gravettiens correspondraient alors aux sols actuels, à quelques millimètres près (Fourment, *et al.*, 2020 ; Ledoux, 2020).

Cependant, l’état des sols a pu être modifié par un autre facteur : la chute de blocs calcaires. En Branche Aval, les indices d’effondrement portés par les blocs semblent indiquer qu’ils ont toujours eu lieu avant l’incursion humaine paléolithique, mais en Branche Amont, les signes sont moins clairs, certains blocs s’étant assurément effondrés postérieurement aux passages des ours, et peut être même au passage des Hommes, notamment à proximité de panneaux ornés tels ceux des Griffades ou du Cavicorne (Fourment, *et al.*, 2020, Jaubert *et al.*, 2020 ; Camus, 2016).

c) *Évolution des parois*

Les voûtes et parois calcaires elles-mêmes ont pu évoluer depuis le Gravettien. Il a pu s'agir d'un phénomène discret, comme l'érosion ou le recouvrement de la surface du calcaire. De ce fait, certaines œuvres aux traits aujourd'hui superficiels étaient-elles peut-être plus profondes, certains motifs colorés ont pu s'effacer (il semble en particulier que les ponctuations colorées se soient mieux conservées sur les revêtements calcitiques que calcaires, Feruglio *et al.*, 2020b), ou encore, un revêtement de calcite peut occulter des traits gravés. Le Panneau de l'Entrée est un exemple intéressant, avec une érosion qui affecte le tiers de sa surface, tandis qu'un voile de calcite et de fistuleuses recouvre les deux autres tiers. Il n'est ainsi pas à exclure que malgré l'apparente fraîcheur des panneaux qui nous sont parvenus, des motifs, voire des panneaux entiers, aient pu localement disparaître.

L'évolution des parois et plafonds a également pu se faire de façon plus brutale, avec la chute de blocs gravés. Ce type d'évènement a semblé plus fréquent dans les secteurs de l'Entrée et certains segments de galerie de la Branche Amont (Camus 2016, 2017, 2020).

d) *Présence des spéléothèmes*

Enfin, le dernier facteur d'évolution de la cavité concerne la présence de spéléothèmes. Leur étude (Genty *et al.*, 2020), principalement réalisée dans le secteur de l'Entrée, semble indiquer qu'il en existe trois familles. La première correspond à des concrétions massives, érodées, pouvant parfois former des dômes. La seconde est formée par des stalagmites de grandes dimensions, parfois cassées et recouvertes par d'autres stalagmites, elles aussi de grandes dimensions. Enfin, la troisième famille regroupe des cierges allant de quelques centimètres à plus d'1,30 m de hauteur et souvent assez fins, des gours et des fistuleuses visibles dans le secteur de l'Entrée. Seule, cette dernière famille semble avoir débuté sa formation après le Gravettien, en particulier au Tardiglaciaire, probablement dès l'interstade Bølling-Allerød puisque les plus anciennes dates obtenues jusqu'à présent sur cet ensemble indiquent $13\ 000 \pm 1\ 800$ et $12\ 678 \pm 2\ 378$ BP (Genty *et al.*, 2020). Cette dernière famille, inégalement répartie au sein de la cavité, n'existait alors pas au Gravettien et a contribué à une transformation importante de ces secteurs (comme, par exemple, le secteur de l'Entrée). Le secteur modélisé qui nous intéresse dans la présente étude, c'est-à-dire situé entre l'entrée de la salle du Panneau de la Découverte et l'aval du Locus 2, semble peu impacté par ces formations d'âge Holocène.

e) Conclusions

Le secteur de l'Entrée, par sa proximité avec l'extérieur, est certainement l'espace qui a été le plus modifié depuis le Gravettien : apport de matériaux détritiques par l'éboulis, effondrements de plaquettes et plaques calcaires, nombreux concrétionnements (formation de nouveaux spéléothèmes, gours, dépôt de calcite sur les parois) et érosion des surfaces calcaires ont contribué à fortement modifier son aspect.

Cependant, mis à part le secteur d'Entrée, qui a fortement évolué, le secteur de la grotte qui nous intéresse a connu moins de modifications depuis le Gravettien. Il faut toutefois rester attentifs aux quelques altérations ou effondrements produits depuis le Paléolithique. Le modèle 3D que nous allons utiliser dans la suite de l'étude s'étend de l'entrée amont de la salle du Panneau de la Découverte jusqu'à l'aval immédiat du Locus 2. Il s'agit d'un secteur qui a été particulièrement bien protégé puisque les sols n'ont pas été modifiés outre de légers écoulements d'eau et apports de limon au sol, aucun bloc ne s'est effondré depuis le Gravettien, et très peu de nouveaux spéléothèmes s'y sont développés (les pousses récentes sont en continuité avec les anciennes). Enfin, les autres secteurs du site prospectés, en particulier du Grand Panneau en aval jusqu'au Panneau de l'Oie en amont, ne semblent guère avoir changé depuis le Gravettien. Les faibles modifications qui ont pu y intervenir (notamment le développement de spéléothèmes) n'ont probablement pas eu d'impact majeur sur nos résultats (essentiellement des mesures de réponses impulsionnelles), excepté dans la zone de l'Entrée, que nous avons volontairement écartée.

3. Détail du secteur modélisé

Nous allons à présent décrire avec plus de précisions le secteur qui s'étend de l'entrée amont de la salle du Panneau de la Découverte jusqu'au Locus 2 inclus, et qui correspond à l'espace modélisé qui nous servira à réaliser des simulations (Figure 117).

Ce secteur débute, en amont, par un couloir à l'extrémité duquel les différents niveaux (méandre inférieur +1, méandre supérieur +2 et chenal de voûte +3) se rejoignent et débouchent dans un espace élargi, qu'on pourrait qualifier de « salle », au centre duquel se trouve un bloc surplombé par le Panneau de la Découverte (2D1 ; Figure 117, a).

À l'amont du bloc central, se trouve un entonnoir de soutirage ainsi que des blocs effondrés qui occupent la quasi-totalité de la largeur de l'espace. Actuellement, nous longeons la paroi droite afin d'éviter l'entonnoir central, puis nous escaladons les blocs qui mènent au Panneau de la Découverte à l'aide d'une passerelle en inox, mais un autre passage, par la gauche, est possible, bien que nous ne l'empruntons pas pour d'évidentes raisons de conservation (Figure 117, a).

Après être passés sous le Panneau de la Découverte, la seule voie possible consiste à de nouveau longer la paroi droite, où la progression s'effectue en hauteur, à proximité immédiate de la voûte, jusqu'à rejoindre le Panneau du Pont d'Argile (2D2). En effet, le long de la paroi gauche, le sol se situe plus bas, au niveau du méandre inférieur +1, mais un second soutirage, long de 2 m, occupe toute la largeur de l'espace disponible.

Près du Panneau du Pont d'Argile, le chenal de voûte se poursuit sur la droite (Figure 117, b), où une petite galerie permet de le suivre sur quelques mètres mais débouche sur un à-pic d'environ 3 m de hauteur tandis que le chenal de voûte poursuit son tracé directement jusqu'au Panneau du Bouquetin, qui n'apparaît pas dans le modèle 3D. Cette petite galerie (appelée la Mezzanine) est interdite d'accès. L'autre accès après le Panneau du Pont d'Argile consiste en une descente de plusieurs mètres (aujourd'hui sécurisée à l'aide d'une passerelle en inox) qui permet de rejoindre le niveau +1 (Figure 117, c).

Au pied de cette descente, le cheminement peut se faire en direction de l'amont ou de l'aval. En direction de l'amont, le méandre est interrompu au bout de quelques mètres par le second soutirage. Ce passage, appelé « le méandre inférieur 5Av », est aujourd'hui inaccessible, mais présente de nombreuses traces de passages paléolithiques (au sol et en parois), ainsi qu'une entité graphique gravée nommée Le Toupillon (2G1 ; Figure 117, c).

En direction de l'aval, les tracés des méandres +1 et +2 se suivent, formant une galerie assez haute. Le long de la paroi droite de cette galerie qui constitue l'unique cheminement possible dans la cavité se situent les locus 1 et 2. En aval du Locus 1 les méandres +1 et +2 se désolidarisent. Le méandre +2 forme une boucle qui emprunte un plan incliné et rejoint progressivement le chenal de voûte au niveau du Panneau du Bouquetin. Ce chemin a été baptisé « piste des ours » car il a été emprunté par ces grands mammifères. Le passage formé par le méandre +1, appelé « *By-pass* », est celui que nous empruntons actuellement. Le sol y est horizontal, et la galerie y est ponctuée d'entités graphiques isolées discrètes (Figure 117, d). Le modèle 3D s'arrête une dizaine de mètres en aval du Locus 2, permettant de reproduire les premiers mètres de ces deux passages.

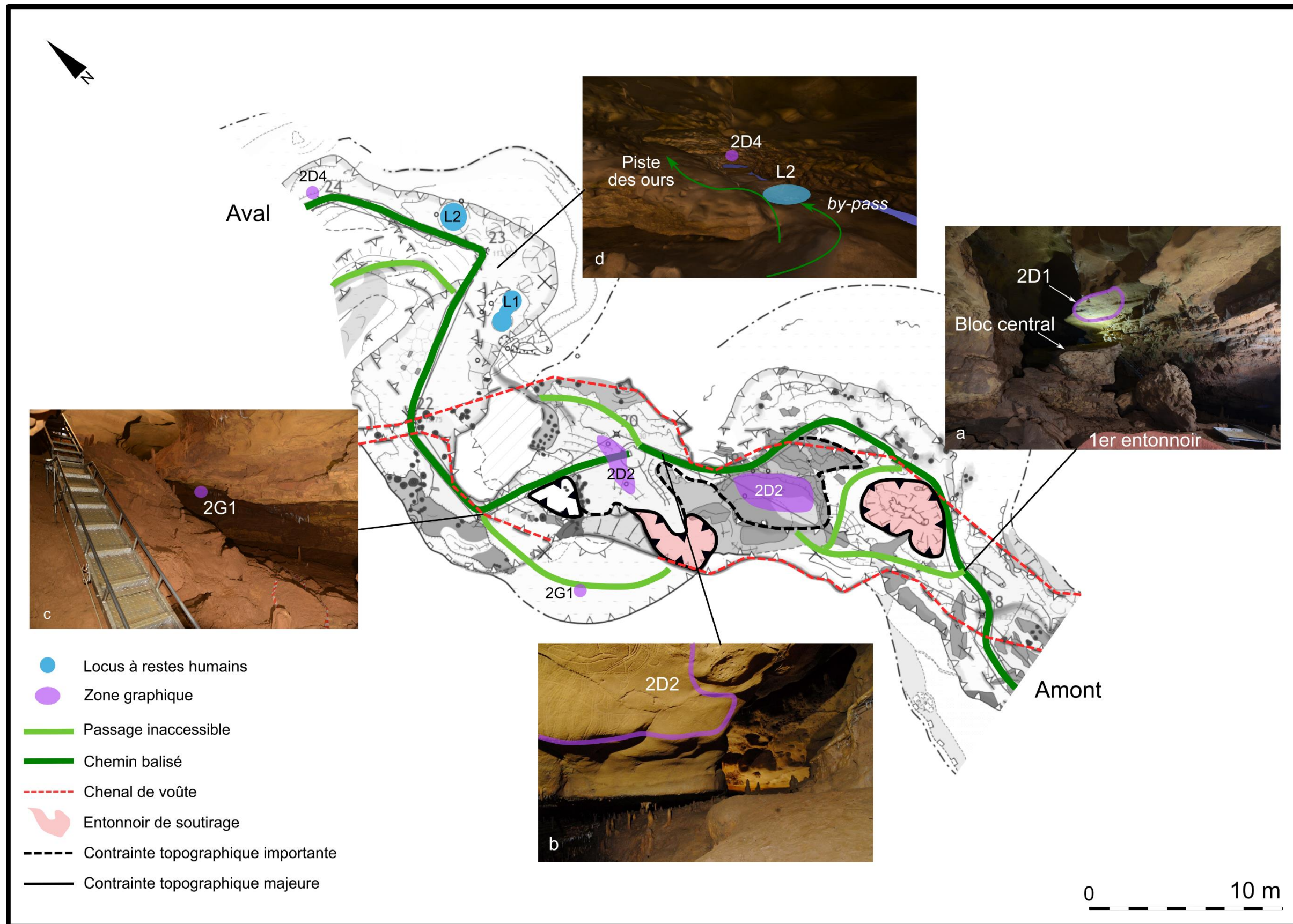


Figure 117 : Plan du secteur modélisé. a : vue sur le Panneau de la Découverte, cl. V. Feruglio, C. Bourdier/MC, b : Panneau du Pont d'Argile à gauche, la Mezzanine à droite, cl. V. Feruglio, C. Bourdier, M. Delluc/MC, c : le méandre inférieur 5Av, cl. V. Feruglio, A. Jouteau/MC, d : localisation du By-pass et de la piste des ours, modèle 3D Perazio. Fond topographique de précision, doc. H. Camus, Hypogée

C. Se déplacer

La paléospéléologie se propose d'étudier les pénétrations profondes de l'Homme préhistorique dans le monde souterrain ainsi que le « pourquoi » et surtout le « comment » de ces déplacements et séjours. F. Rouzaud, 1997

Avant d'aborder ce sous-chapitre qui met en jeu les perceptions visuelles et acoustiques dans le monde souterrain, nous souhaitons ici rappeler que nous n'avons pas étudié la perception humaine d'un point de vue biologique, psychologique ou culturel qui reste probablement inexorablement perdue pour ces périodes préhistoriques. Nous allons ici présenter les réalisations des simulations numériques d'éclairages et de sons, et en interpréter la portée perceptuelle avec notre propre bagage biologique et culturel. Les interprétations qui en découlent doivent ainsi être comprises comme des hypothèses et non des assertions.

Étudier les déplacements en milieu souterrain nécessite de combiner plusieurs approches. Dans un premier temps, l'analyse des traces d'activités (TrAcs) laissées par les Préhistoriques (passages piétinés, empreintes de pas dans l'argile, traces de mains ou d'ocre sur les parois, marques d'appuis divers, mouchages de torches, charbons au sol, blocs ou spéléothèmes déplacés ou brisés, etc.) permet de localiser une partie au moins des cheminements empruntés. L'analyse topographique permet ensuite de comprendre l'influence des obstacles sur ces passages humains, mais ils ne constituent pas nécessairement l'unique raison pour laquelle les Préhistoriques ont fréquenté un chemin plutôt qu'un autre. Dans ce sous-chapitre, nous proposons de réaliser des simulations d'éclairages et de sons dans le secteur modélisé (c'est-à-dire de l'entrée amont de la Salle du Panneau de la Découverte jusqu'à l'aval du Locus 2) afin de comprendre quel a été leur rôle dans la progression souterraine des Paléolithiques. Dans un premier temps, nous allons élaborer un état des lieux des traces anthropiques découvertes dans cette zone, un bilan de ce qu'elles nous apprennent concernant les cheminements paléolithiques, et la liste des questions restant ouvertes. Dans un second temps, des simulations d'éclairages, à la torche ou à la lampe à graisse, permettront de mieux comprendre les contraintes de déplacements liés à ces différents éclairages et de répondre aux questions suivantes :

- Quels obstacles (bloc, gouffre, cul-de-sac...) sont perçus selon les différents éclairages, et à quelle distance ?
- Quelles sont les modalités nécessaires au déplacement (nature et nombre de luminaires) en fonction des lieux (couloir ou salle, plafond bas ou haut, etc.) ?

- À quelle distance des parois et voûtes peut-on, ou doit-on, se placer pour se repérer dans l’espace ? Que perçoit-on de l’ampleur d’un espace ?
- Quel est le rôle de la réflectance des parois pour améliorer son propre éclairage portatif ?
- Existe-t-il plusieurs cheminements « logiques » ? Sont-ils les mêmes que ceux actuellement empruntés ? Corroborent-ils les TrAcs repérées ?

Enfin, des simulations acoustiques permettront de vérifier si l’écholocation ajoute, ou non, des informations sur l’environnement.

1. Traces paléolithiques anthropiques et cheminement actuel

De nombreuses traces d’activités ont été répertoriées dans le secteur qui nous intéresse, témoignant des passages préhistoriques. Cependant, l’absence de traces à certains endroits n’est pas synonyme d’absence de passages. En effet, outre le fait qu’ils aient pu ne pas laisser de témoins, ou que ces derniers ne se soient pas conservés dans le temps, il est possible que des apports sédimentaires, des circulations animales ou nos propres passages récents les aient effacés. F. Rouzaud, en 1978, précisait déjà que les spéléologues modernes ont « les mêmes réactions que l’homme préhistorique » (*Op. cit.*, p. 135) et ont donc tendance à emprunter les mêmes cheminements.

La localisation des traces paléolithiques et des voies de passage actuelles permettra de comprendre où les Préhistoriques ont fait des choix différents ou s’ils sont identiques aux nôtres.

a) Amont du Panneau de la Découverte

En amont du Panneau de la Découverte (2D1), trois principales TrAcs nous interpellent (Delluc *et al.*, 2013 ; Ledoux *et al.*, 2017 ; Fourment *et al.*, 2020) : une étude géomagnétique (Lévêque et Mathé, 2013 ; Lévêque, 2020) a permis de montrer des traces de chauffe sur un bourrelet d’argile immédiatement en amont d’un bloc basculé (a, Figure 118), un petit bloc déplacé en amont du promontoire sous-jacent au Panneau de la Découverte est le témoin d’une

fréquentation humaine, de même pour les traces de passage découvertes sur la montée qui mène au panneau, le long de la paroi gauche (b et c, Figure 118).

Ces traces sembleraient indiquer que les Préhistoriques ont favorisé une ascension vers le Panneau de la Découverte par la gauche plutôt que d'escalader les blocs près de la paroi droite. L'origine des traces de chauffe reste à déterminer : durée et intensité de la combustion, procédé (lampe ou foyer), utilité (chauffe, éclairage, autre).

Immédiatement sous le Panneau de la Découverte, les traces sont peu lisibles (l'argile y est-elle trop dure ? Trop piétinée ?), mais il est indéniable que les Hommes ont dû passer à cet endroit pour graver le Panneau de la Découverte d'une part, et avancer dans la cavité d'autre part.

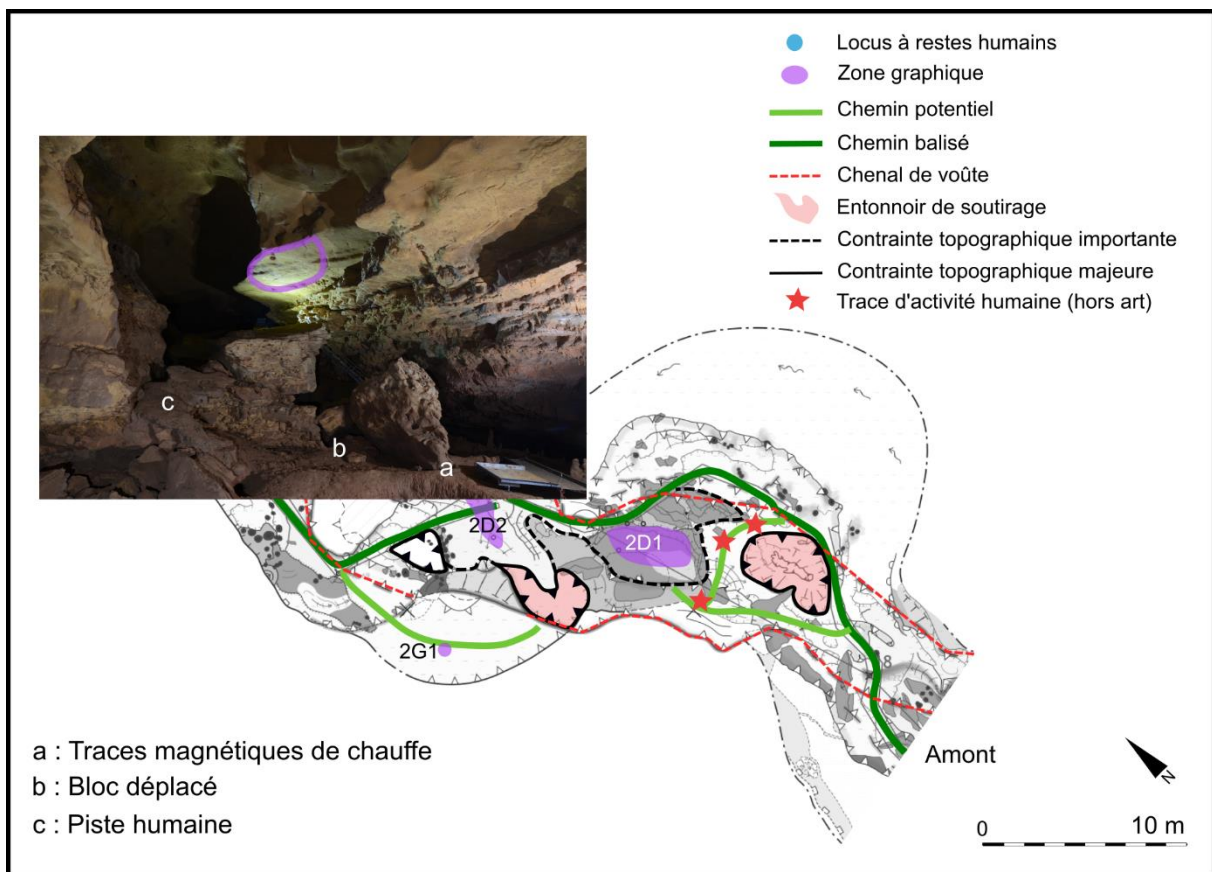


Figure 118 : Localisation des traces d'activités en amont du Panneau de la Découverte. Carte topographique H. Camus (Protée), cl. V. Feruglio, C. Bourdier/MC.

b) Autour du Panneau du Pont d’Argile

L’espace qui incorpore le Panneau du Pont d’Argile (2D2) est particulièrement riche en traces anthropiques : traces colorées (rouges et noires) sur ou à proximité immédiate du panneau, traces de pas, d’appuis et de glissades sur le promontoire du pont d’argile (à gauche du panneau) et sur la plateforme trapézoïdale en aval du panneau, et traces charbonneuses (potentiels mouchages) sur la voûte en aval du panneau 2D2 (Figure 119). Aucune trace n’a pu être relevée dans la galerie qui mène à la Mezzanine (le cul-de-sac à droite du panneau) car celle-ci est actuellement interdite d’accès.

Bien que l’endroit nous semble actuellement inconfortable (le plafond y est bas, le sol très chaotique et glissant, avec des risques de chute de plusieurs mètres), le nombre et la variabilité des traces d’activités présentes montrent que cet espace a pourtant été nettement investi. Il est cependant impossible de préciser si cette concentration de traces est le témoin de passages fréquents, de stations longues, ou le résultat d’une bonne conservation des sols et parois.

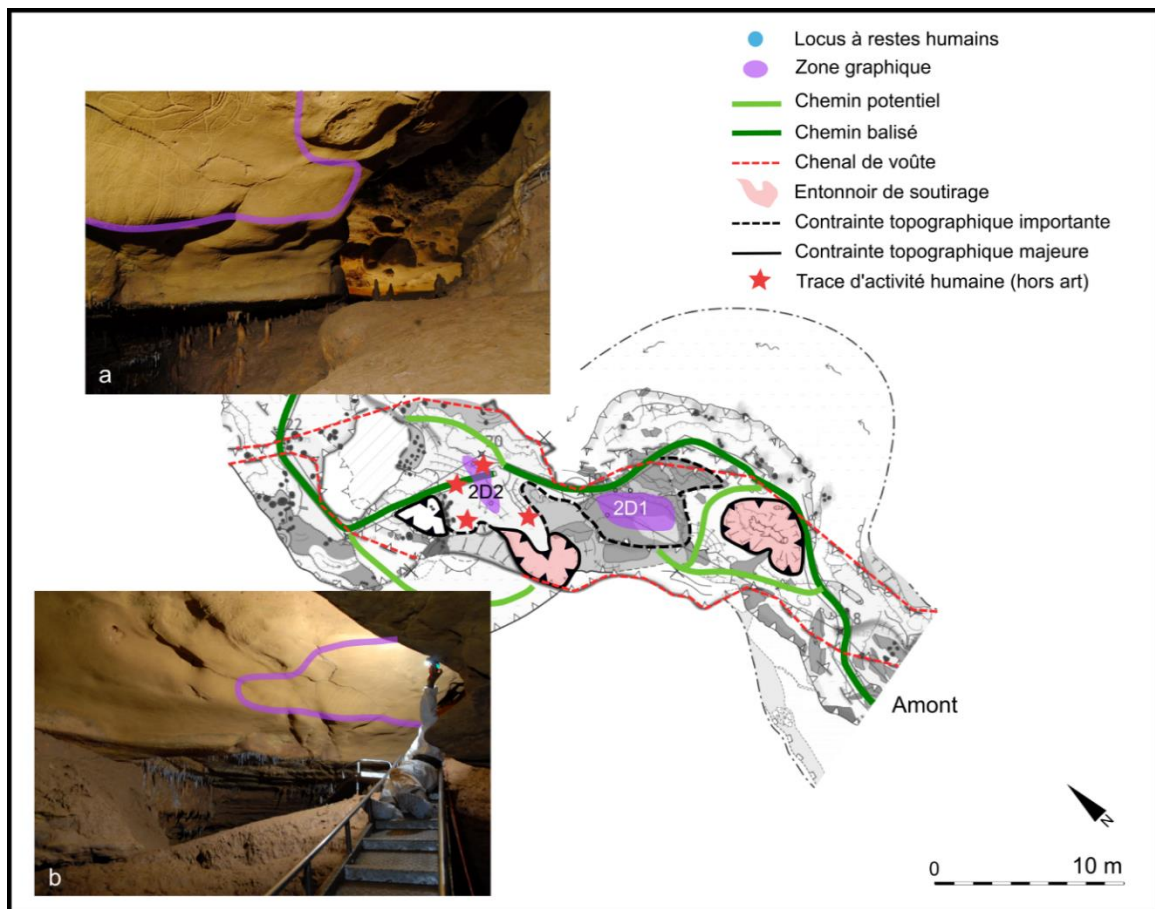


Figure 119 : Localisation des traces d’activité autour du Panneau du Pont d’argile. Carte topographique H. Camus (Protée), cl. a : V. Feruglio, C. Bourdier, M. Delluc/MC, cl. b : V. Feruglio, M. Delluc/MC

c) Le méandre inférieur 5Av

Cette galerie est également très riche en TrAcS (Figure 120). Outre des empreintes au sol qui pourraient correspondre à un cheminement vestigiel, des traces ocrées et de nombreuses marques noires dont des mouchages ont été repérés (les résidus d'un des plus denses ont pu être datés, Jaubert *et al.*, 2017) sur les parois droite et gauche de la galerie. Sept perforations coniques, profondes de 5 à 8 cm, ont été observées dans un placage argileux, sur la paroi droite, dans le sens du cheminement, de la galerie. Elles semblent avoir été marquées par le même objet (peut-être un spéléothème).

Bien que cette galerie soit un cul-de-sac, coupée par un soutirage infranchissable, la présence d'une entité graphique isolée (le Toupillon) et des traces précédemment décrites montre qu'il s'agit d'un espace qui a été fréquenté par les Préhistoriques.

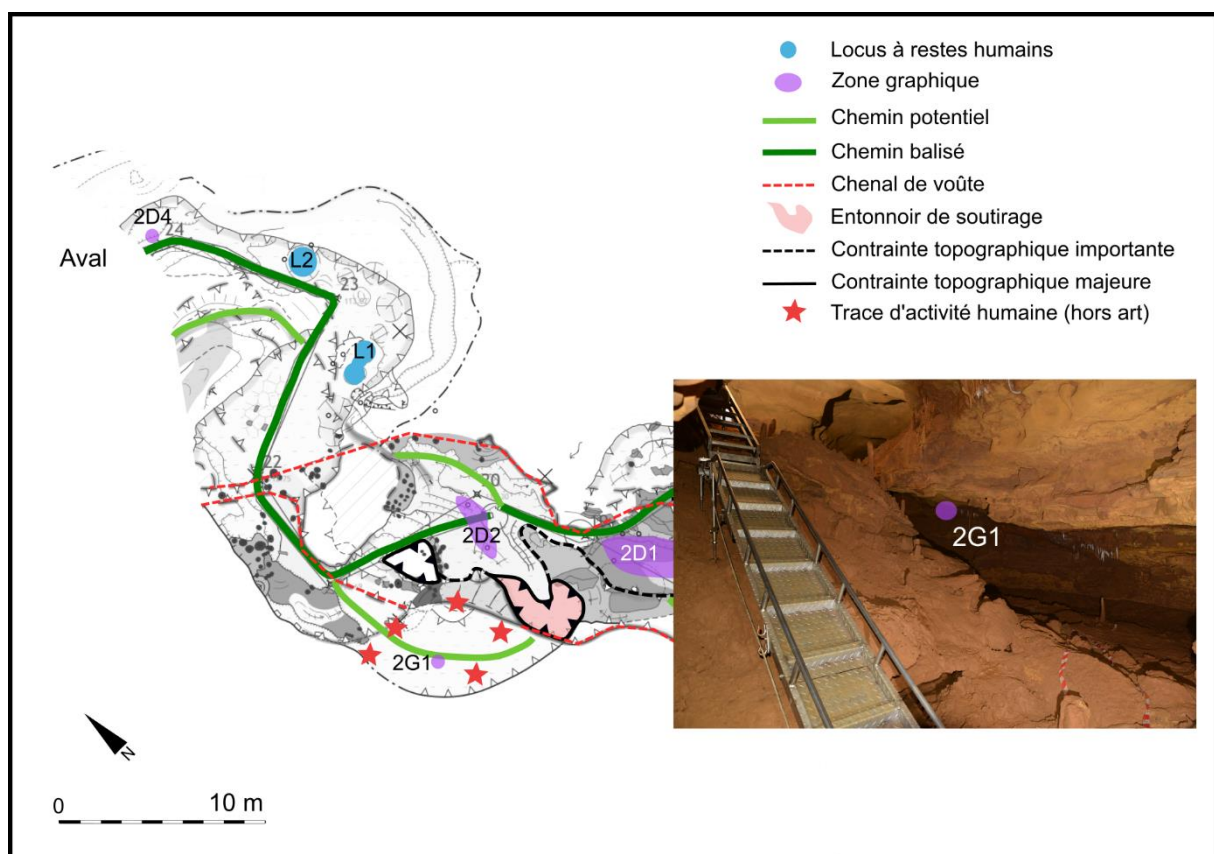


Figure 120 : Localisation des traces d'activités dans le méandre inférieur 5Av. Carte topographique H. Camus (Protée), cl. V. Feruglio, A. Jouteau/MC.

d) Locus 1-2, By-pass, et piste des ours

La galerie qui débute au pied de la descente qui mène au Panneau du Pont d’Argile et qui conduit au Locus 1 est assez pauvre en TrAcS. Des circulations d’eau au sol, l’importante hauteur des voûtes, ainsi que la largeur de la galerie (environ 5 m) peuvent expliquer la faible concentration en traces de passages préhistoriques. Une empreinte de pied, ainsi qu’une série de dépressions au sol permettent de placer une partie des cheminements préhistoriques : à droite immédiatement au pied de la passerelle, puis à gauche (Figure 121). Près des locus 1 et 2, de nombreuses traces d’activités humaine ont été répertoriées, par exemple : sols piétinés, colorants, traces de doigts en voûte.

S’il est assuré que les Hommes ont emprunté le *By-pass* (outre les entités graphiques on y a retrouvé des traces de doigts et de colorants en paroi), nous ne savons pas s’ils ont emprunté la piste des ours. En effet, ce cheminement est parsemé de traces, mais il est impossible de différencier les traces ursines des potentielles traces anthropiques sans y accéder de plus près.

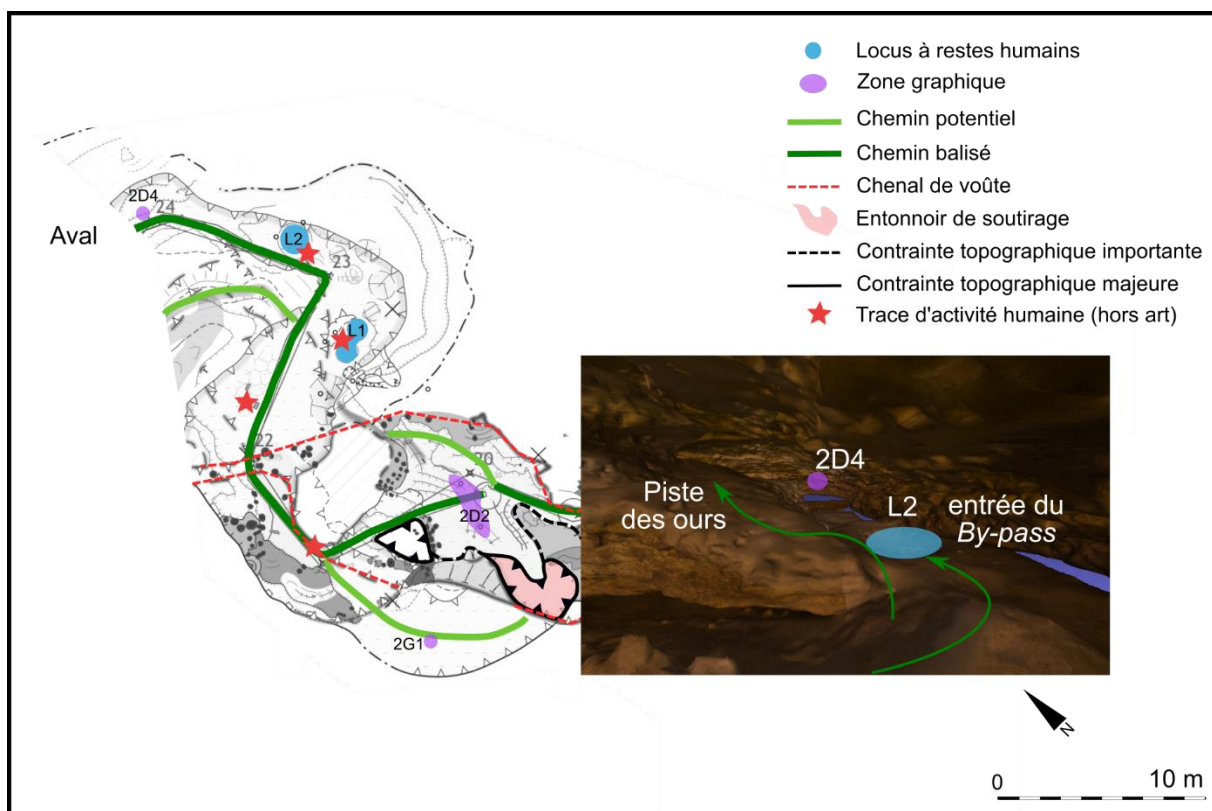


Figure 121 : Localisation des traces d’activité près des locus 1 et 2, du By-pass et de la piste des ours. Carte topographique H. Camus (Protée), modèle 3D Perazio engineering.

e) Conclusions

Dans un premier temps, nous pouvons remarquer que l'ensemble des espaces que nous avons pu observer semblent avoir été investis. Certains (autour du Panneau du Pont d'Argile et dans le méandre inférieur 5Av) sont particulièrement riches en traces, sans que l'on puisse déterminer si cela reflète les comportements des Préhistoriques ou une conservation différentielle entre les différents espaces de la cavité. On peut de plus ajouter que, même dans les secteurs où les traces d'activités sont nombreuses, celles-ci ne sont jamais très denses et ne se recoupent pas, ce qui pourrait être un argument en faveur de passages peu nombreux et/ou par des petits groupes d'individus. Ces conclusions sont en accord avec les travaux de l'équipe TrAcs de Cussac (Ledoux, 2019, 2020).

Au sujet des cheminements paléolithiques, l'analyse des TrAcs permet d'avoir de bonnes indications sur les voies empruntées même s'il est possible qu'une grande partie des traces au sol aient disparu, notamment car nous utilisons fréquemment le même cheminement. Les simulations permettront d'apporter des informations supplémentaires sur ces hypothèses de passage, notamment en apportant une meilleure compréhension des choix opérés par les Gravettiens.

2. Simulations d'éclairages

Nous avons choisi, pour la sous-section suivante, de proposer une progression linéaire dans l'espace modélisé depuis l'entrée amont de la salle du Panneau de la Découverte jusqu'au Locus 2 et de nous appuyer sur quelques simulations²⁴ avec divers éclairages afin de répondre aux questions précédemment posées et de proposer des hypothèses concernant les choix de cheminement des Paléolithiques. Afin de simplifier ces premières simulations, nous avons fait le choix de ne simuler qu'un luminaire à la fois, mais il est évident que la perception de l'espace

²⁴ Les images proposées dans la suite du texte sont, sauf mention contraire, issues de simulations numériques par la méthode du modèle d'illumination élémentaire avec une saturation, précisée, qui permet leur observation sur du papier imprimé ou sur un écran observé dans une pièce éclairée. Cette méthode, rapide, produit cependant des images plus sombres qu'elles ne devraient paraître. Les images originelles, réalisées par la méthode du suivi de chemin avec cache, qui ont servies aux observations, doivent être observées sur un écran calibré et dans l'obscurité totale. Elles sont disponibles en Annexe 10.

par un groupe d’individus disposant de plusieurs luminaires serait différente, la question de la perception visuelle de l’espace par un groupe reste donc ouverte.

Sauf mention spécifique, les simulations de torches ont été réalisées à partir d’une torche de catégorie « moyenne » (Torche 3) et les lampes à graisse à partir des lampes 1B, les plus puissantes que nous ayons enregistrées. Ces luminaires ont été placés à environ 1,60 m du sol, à une cinquantaine de décimètres en avant et à droite de l’observateur (qui est donc considéré comme porteur de l’éclairage).

a) Secteur du Panneau de la Découverte

Simulations d’éclairages mobiles

Au centre de l’entrée du secteur étudié, se situe l’entonnoir (un soutirage dont on ne connaît pas l’époque de mise en place, bien qu’il soit probablement antérieur au Gravettien, H. Camus, comm. pers.) qu’il est nécessaire de contourner selon deux options : par la droite ou par la gauche (Figure 122). Du point de vue de la géomorphologie, la droite est un passage étroit mais au sol régulier, tandis que la gauche est un passage plus large mais chaotique, constitué de petits blocs effondrés. Aucune trace ne permet d’affirmer qu’un passage a été préféré à l’autre.



Figure 122 : Panneau de la Découverte observé depuis l’entrée amont de la Salle éponyme et éclairé depuis l’aval par une lampe frontale moderne (cl. . V. Feruglio, C. Bourdier /MC).

Les simulations (Figure 123) montrent qu'équipé d'une torche, on peut clairement comprendre comment est formé l'espace et remarquer les différences de morphologie du sol. Tandis qu'avec une lampe à graisse, il est difficile de comprendre les dimensions et l'aspect de l'entonnoir. D'autre part, la lampe à graisse ne permet que d'entr'apercevoir le bloc central. Dans ces conditions, il est difficile de comprendre comment est agencé l'espace naturel, ainsi que la configuration du sol. Une préférence pour la voie de droite pourrait expliquer l'absence de traces repérées dans ce secteur puisque ces dernières auraient été écrasées par nos passages plus récents. Un autre argument en faveur du passage par la droite est la présence d'une paroi plus proche du luminaire (dans l'hypothèse d'un porteur droitier) qui pourrait servir de point de repère dans l'espace.

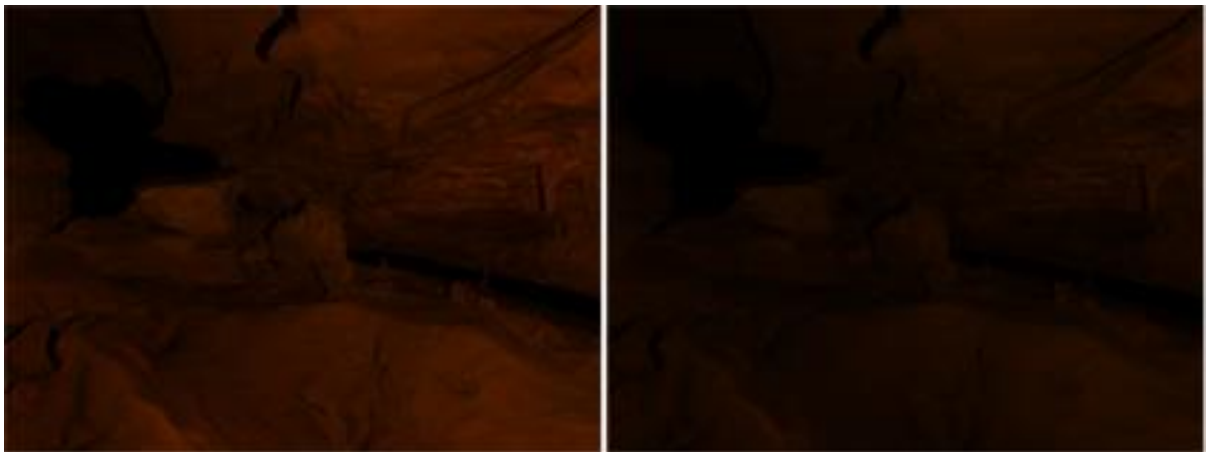


Figure 123 : Simulation numérique réalisée en amont de l'entonnoir, près de l'entrée de la salle du Panneau de la Découverte, avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. Distance entre la caméra et le bloc central d'environ 7 m. À gauche : simulation d'éclairage avec une torche de type 3, saturation de 10 000, à droite : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 1B, saturation de 30 000.

À l'approche du Panneau de la Découverte, la torche permet toujours d'éclairer assez nettement l'ensemble de la salle. Il est alors possible de remarquer que longer la paroi droite nécessite une escalade à l'aide des deux mains tandis que rejoindre la paroi gauche permet de monter régulièrement jusqu'au panneau. L'éclairage à la lampe permet de remarquer que deux voies sont possibles (le long de la paroi droite et de la paroi gauche) mais ne permet d'en concevoir les éventuelles difficultés qu'à proximité immédiate (Figure 124). L'unique cheminement paléolithique semble être par la gauche, ce qui le distingue du cheminement moderne, emprunté par M. Delluc lors de sa première incursion. On peut supposer que l'équipement moderne, qui libère les mains grâce au port d'une lampe frontale, permet d'envisager des escalades là où les Paléolithiques auront préféré (dans ce cas précis) le détour par un sol plus stable et ne nécessitant pas l'appui des mains.

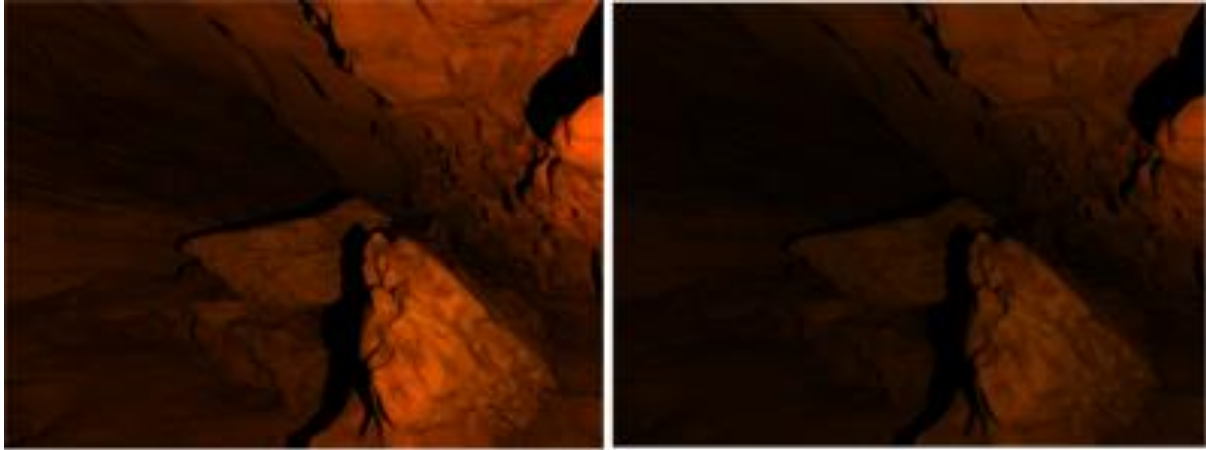


Figure 124 : Simulation numérique réalisée en amont du bloc central, avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d’illumination élémentaire. Distance entre la caméra et le bloc central d’environ 5 m. À gauche : simulation d’éclairage avec une torche de type 3, saturation de 10 000, à droite : simulation d’éclairage avec une lampe à graisse de type 1B, saturation de 30 000.

Sous le Panneau de la Découverte, l’éclairage à la torche permet de comprendre que l’espace est constitué d’un niveau en hauteur le long de la paroi droite, et d’un niveau plus bas le long de la paroi gauche, ce dernier étant alors inaccessible à cause du second soutirage qui bloque le passage. L’éclairage à la lampe permet de concevoir que la voie de gauche est interrompue, mais il est impossible d’estimer visuellement la profondeur de l’obstacle. Dans tous les cas, le seul déplacement possible est de rejoindre à nouveau la paroi droite afin d’avancer dans la cavité (Figure 125).

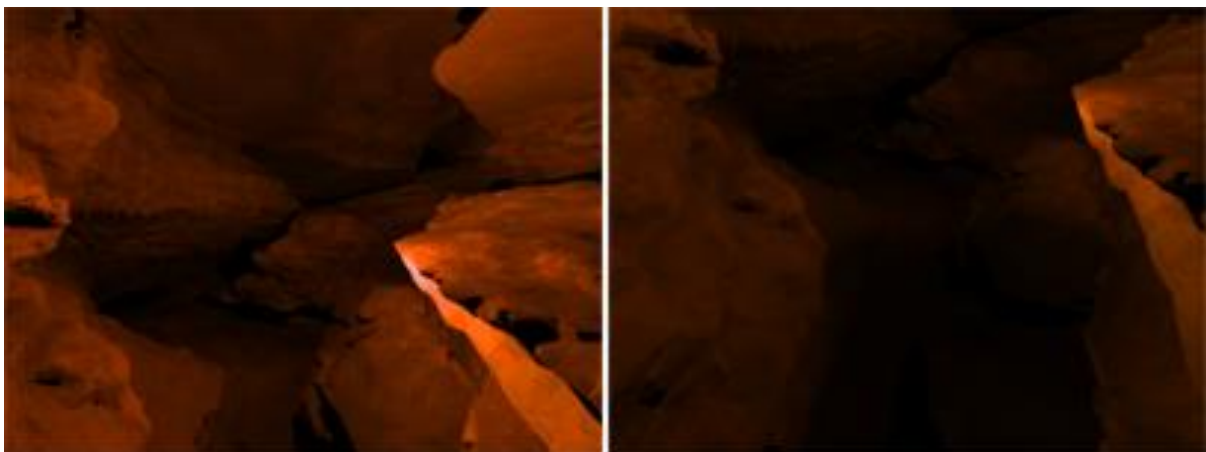


Figure 125 : Simulation numérique réalisée depuis le haut de la voie menant au Panneau de la Découverte, avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d’illumination élémentaire. Distance entre la caméra et la paroi opposée d’environ 6,5 m. À gauche : simulation d’éclairage avec une torche de type 3, saturation de 10 000, à droite : simulation d’éclairage avec une lampe à graisse de type 1B, saturation de 30 000.

Simulations d'éclairage fixe au sol

Comme nous l'avons noté précédemment, il est possible que le sol légèrement en amont d'un bloc basculé à côté du bloc central ait subi une chauffe. Si l'origine et les modalités de cette chauffe restent à déterminer, une hypothèse possible est celle de la localisation d'une source d'éclairage fixe, posée à même le sol. Afin d'investiguer les qualités éclairantes d'un tel dispositif, nous avons utilisé la méthode de simulation par radiosité qui permet d'obtenir un modèle 3D interactif disposant d'un éclairage fixe.

Lorsque les propriétés du dispositif éclairant sont celles d'une torche (qu'on pourrait rapprocher d'un petit foyer, Figure 126, d), l'observateur bénéficie d'une bonne visibilité sur l'ensemble de la salle (Figure 126, c), la morphologie des sols et l'aspect de l'entonnoir peuvent être détaillés (Figure 126, a), la surface du Panneau de la Découverte est même visible, mais les blocs basculés empêchent la lumière de se propager au-delà et d'éclairer plus en aval (Figure 126, b).

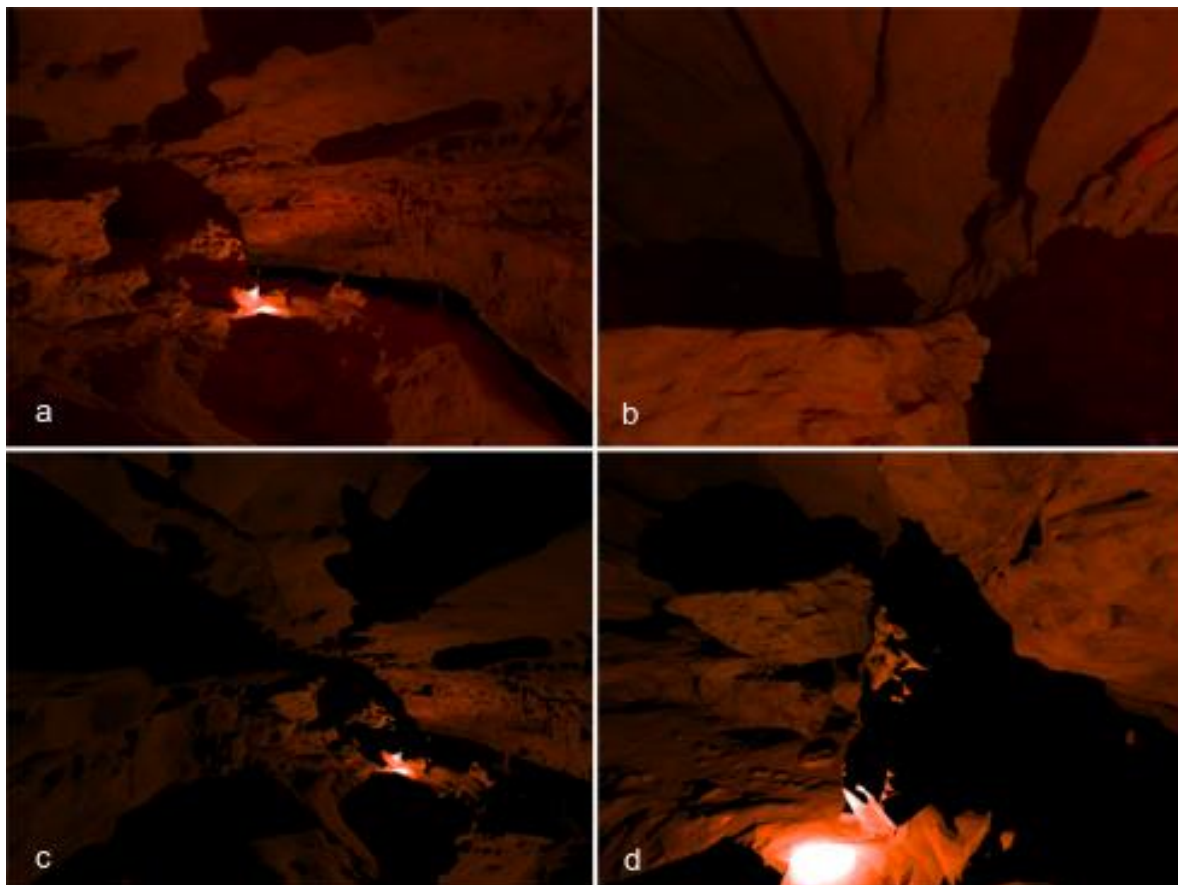


Figure 126 : Simulations numériques d'un éclairage avec une torche de type 3 et une saturation de 10 000, réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio. a) Simulation réalisée avec la méthode de suivi de chemin avec cache, vue depuis l'entrée de la salle du Panneau de la Découverte, b) Simulation réalisée avec la méthode de suivi de chemin avec cache, vue sur le Panneau de la Découverte, c) Simulation réalisée avec le modèle d'illumination élémentaire, vue sur l'ensemble de la salle du Panneau de la Découverte, d) Simulation réalisée avec le modèle d'illumination élémentaire, vue sur la localisation du dispositif d'éclairage.

Par la suite, l’éclairage simulé fut celui d’une lampe à graisse puissante, de type 1B (Figure 127, d). Ce dispositif permet d’éclairer le sol, ainsi que l’entonnoir dont les dimensions deviennent alors perceptibles (Figure 127, a, c), ce qui n’est pas le cas avec une lampe à graisse portée. Si la morphologie générale de la salle peut être perçue (Figure 127, a), le chenal de voûte est invisible et le Panneau de la Découverte est difficile à identifier (Figure 127, b).

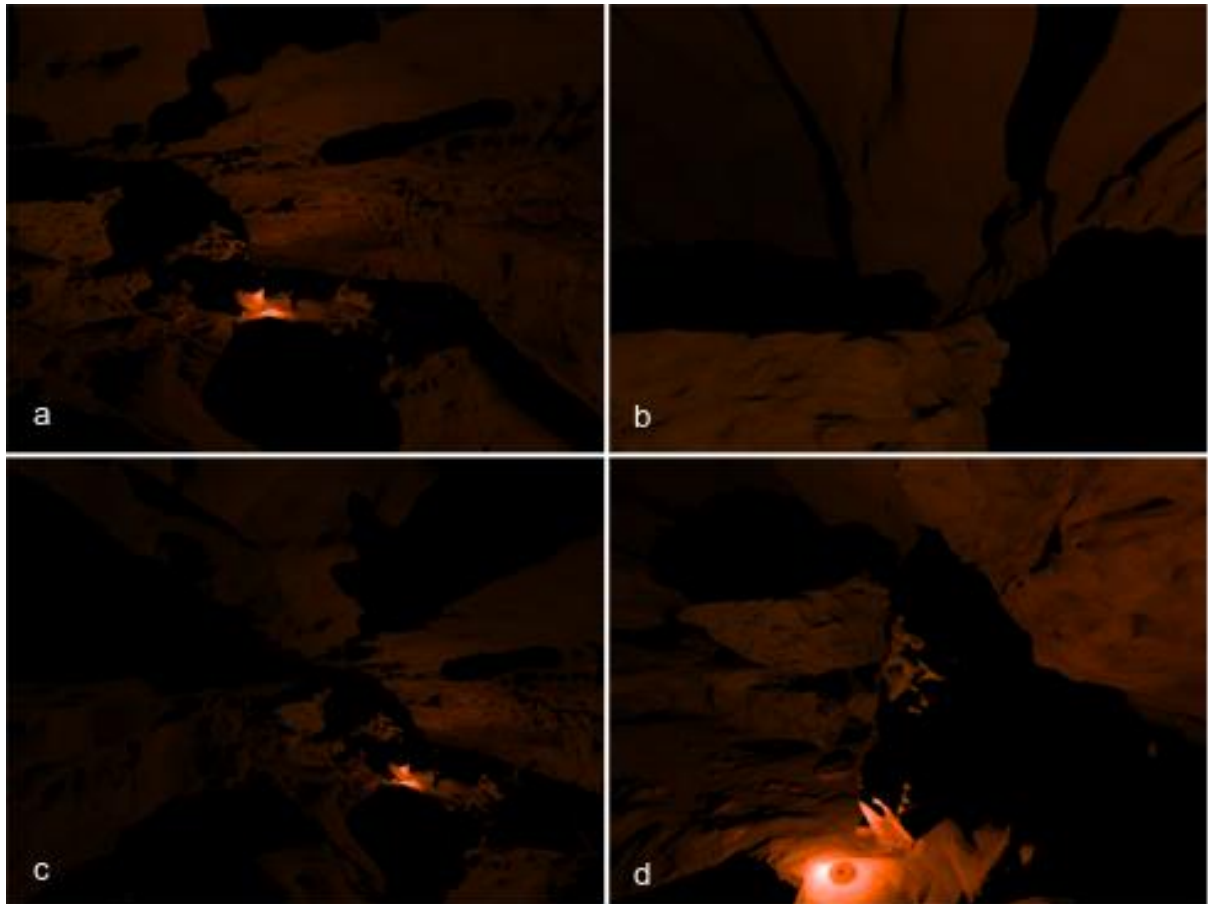


Figure 127 : Simulations numériques d’un éclairage avec une lampe de type 1B et une saturation de 10 000, réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio. a) Simulation réalisée avec la méthode de suivi de chemin avec cache, vue depuis l’entrée de la salle du Panneau de la Découverte, b) Simulation réalisée avec la méthode de suivi de chemin avec cache, vue sur le Panneau de la Découverte, c) Simulation réalisée avec le modèle d’illumination élémentaire, vue sur l’ensemble de la salle du Panneau de la Découverte, d) Simulation réalisée avec le modèle d’illumination élémentaire, vue sur la localisation du dispositif d’éclairage.

b) Secteur du Panneau du Pont d'Argile

Le passage qui mène du Panneau de la Découverte au pont d'argile est étroit et bas de plafond, ce qui permet une bonne visibilité du secteur quel que soit l'éclairage utilisé (Figure 128).

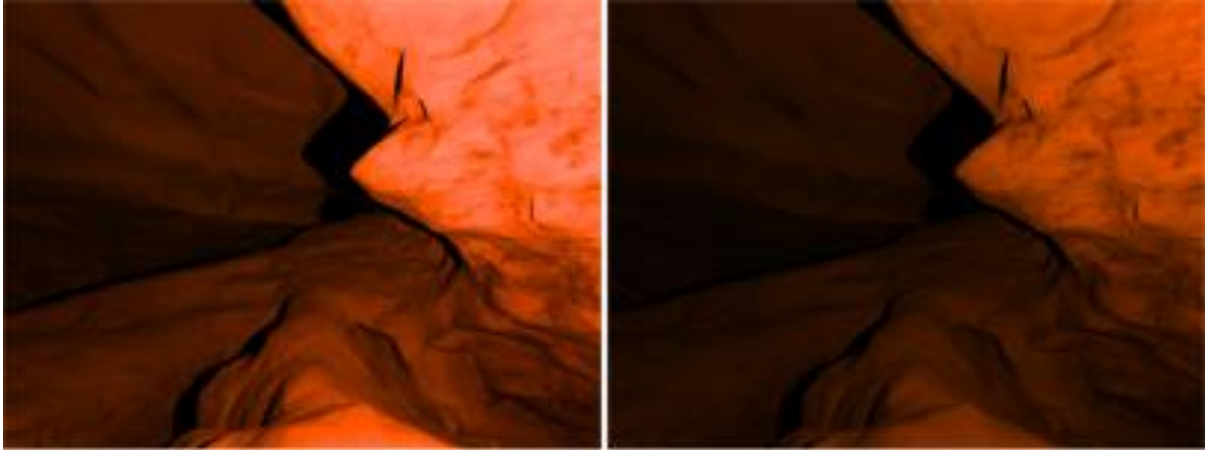


Figure 128 : Simulation numérique avec vue sur le Panneau du Pont d'Argile, réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. Distance entre la caméra et le panneau d'environ 7 m. À gauche : simulation d'éclairage avec une torche de type 3, saturation de 10 000, à droite : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 1B, saturation de 30 000.

À l'approche du Panneau du Pont d'Argile, la torche permet d'observer clairement le panneau, le sol, ainsi que le chenal de voûte qui conduit à un étroit espace surplombant sur la droite (Figure 129, a). Depuis le point d'accès au panneau, on distingue clairement le sol qui descend régulièrement sous le panneau (Figure 129, b). La visibilité du pont d'argile en lui-même est moindre à cause de l'absence de parois à proximité. Cela nous permet de comprendre que leur présence est nécessaire afin d'améliorer les qualités de l'éclairage portatif, y compris dans le cas des torches par leur propriété de réflectance (Figure 129c, d).

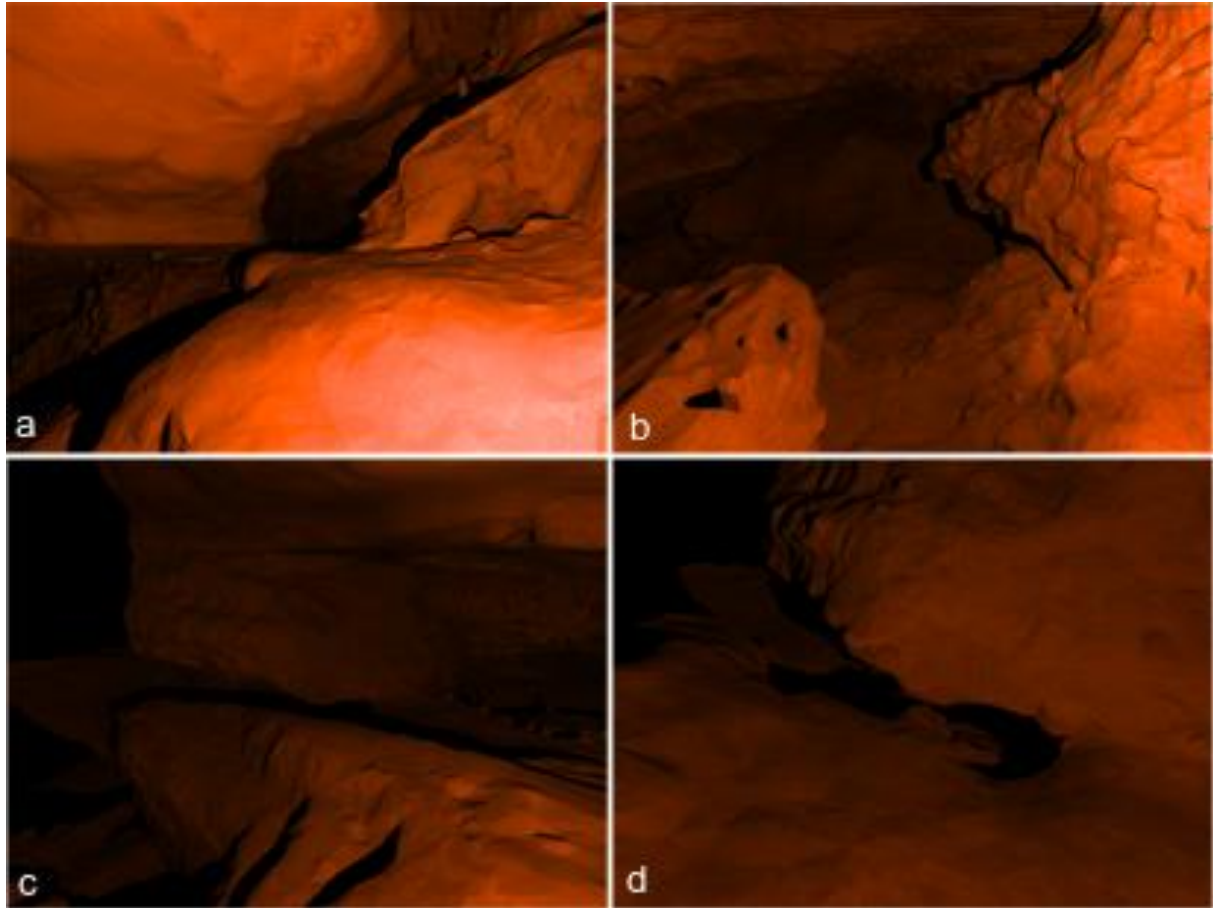


Figure 129 : Simulations numériques d’un éclairage avec une torche de type 3 et une saturation de 10 000, réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d’illumination élémentaire. a) Vue depuis l’entrée de la salle du Panneau de la Découverte, b) Vue sur le Panneau de la Découverte, c) Vue sur l’ensemble de la salle du Panneau de la Découverte, d) Vue sur la localisation du dispositif d’éclairage.

Ces mêmes observations, réalisées avec une lampe à graisse, permettent de concevoir que cet éclairage, bien que plus efficace dans ces lieux aux parois et voûtes proches (Figure 130, a), ne permet tout de même pas le même degré d’observation que la torche, en particulier en ce qui concerne la visibilité des sols : la voie descendante sous le panneau est invisible (Figure 130, b), de même que les bords du pont d’argile (Figure 130, c). Il est alors impossible de différencier un sol plat, en pente régulière, ou un à-pic.

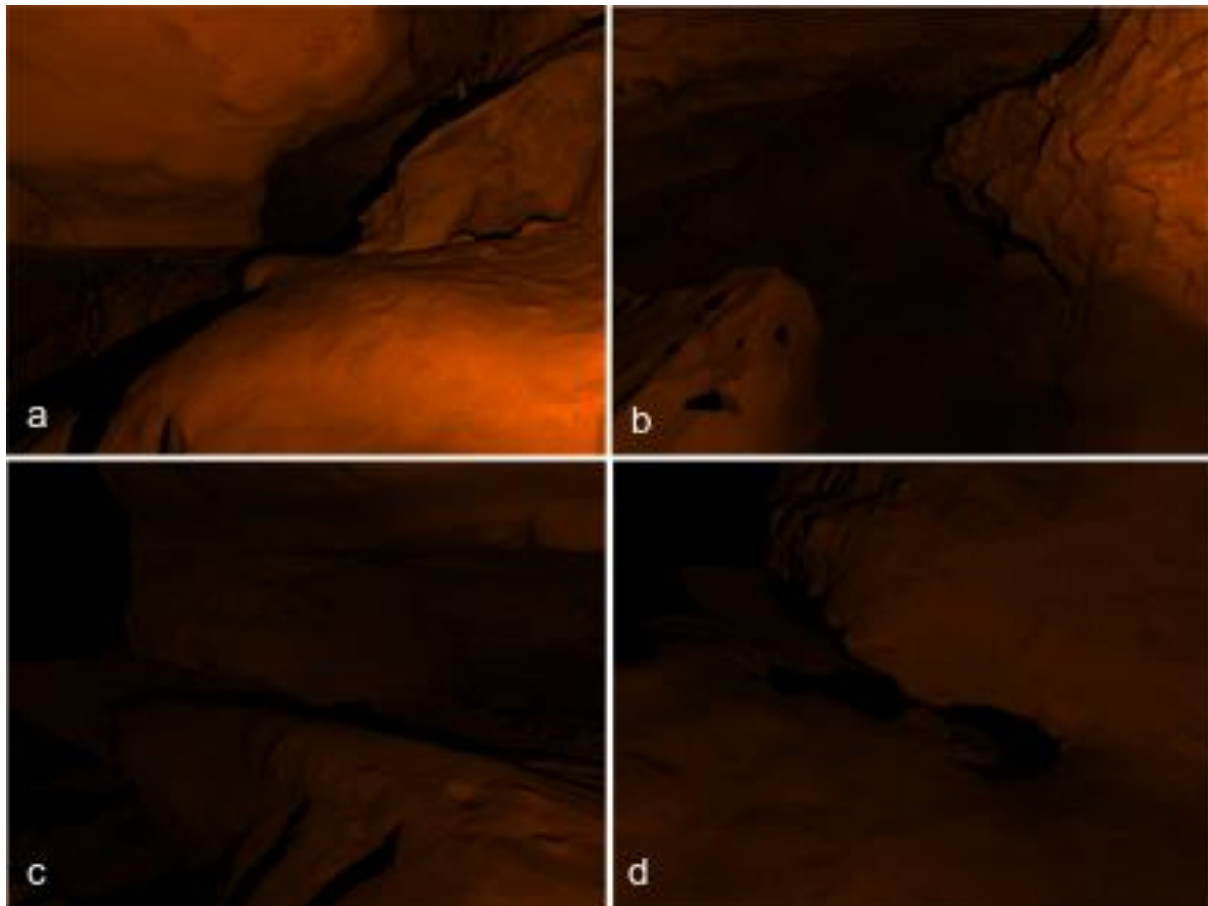


Figure 130 : Simulations numériques d'un éclairage avec une lampe de type 1B et une saturation de 30 000, réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. a) Vue depuis l'entrée de la salle du Panneau de la Découverte, b) Vue sur le Panneau de la Découverte, c) Vue sur l'ensemble de la salle du Panneau de la Découverte, d) Vue sur la localisation du dispositif d'éclairage.

c) La Mezzanine

La voie qui se poursuit vers la droite après le pont d'argile, en suivant le chenal de voûte, permet de déboucher sur la Mezzanine. Trois simulations numériques y ont été réalisées afin de vérifier la visibilité de la galerie principale entre 3 et 4,5 m en contrebas et des locus qui s'y trouvent un peu en aval (à entre 5 et 10 m de l'observateur).

Les simulations réalisées à partir d'une lampe à graisse permettent seulement d'observer les parois à proximité immédiate. Ainsi, aucune visibilité n'est possible sur la galerie en contrebas. Cela n'est pas étonnant dans la mesure où les lampes éclairent très peu vers le bas (Figure 131, a'). Les simulations à la torche permettent au contraire de remarquer que le sol est visible, mais également les parois, en contrebas, situées à plus de 10 m de l'observateur et du luminaire. Cela ne permet cependant pas d'observer les locus, ceux-ci étant occultés par la présence d'un retour de paroi, que le luminaire soit porté à droite ou à gauche de l'observateur (Figure 131, b, c).

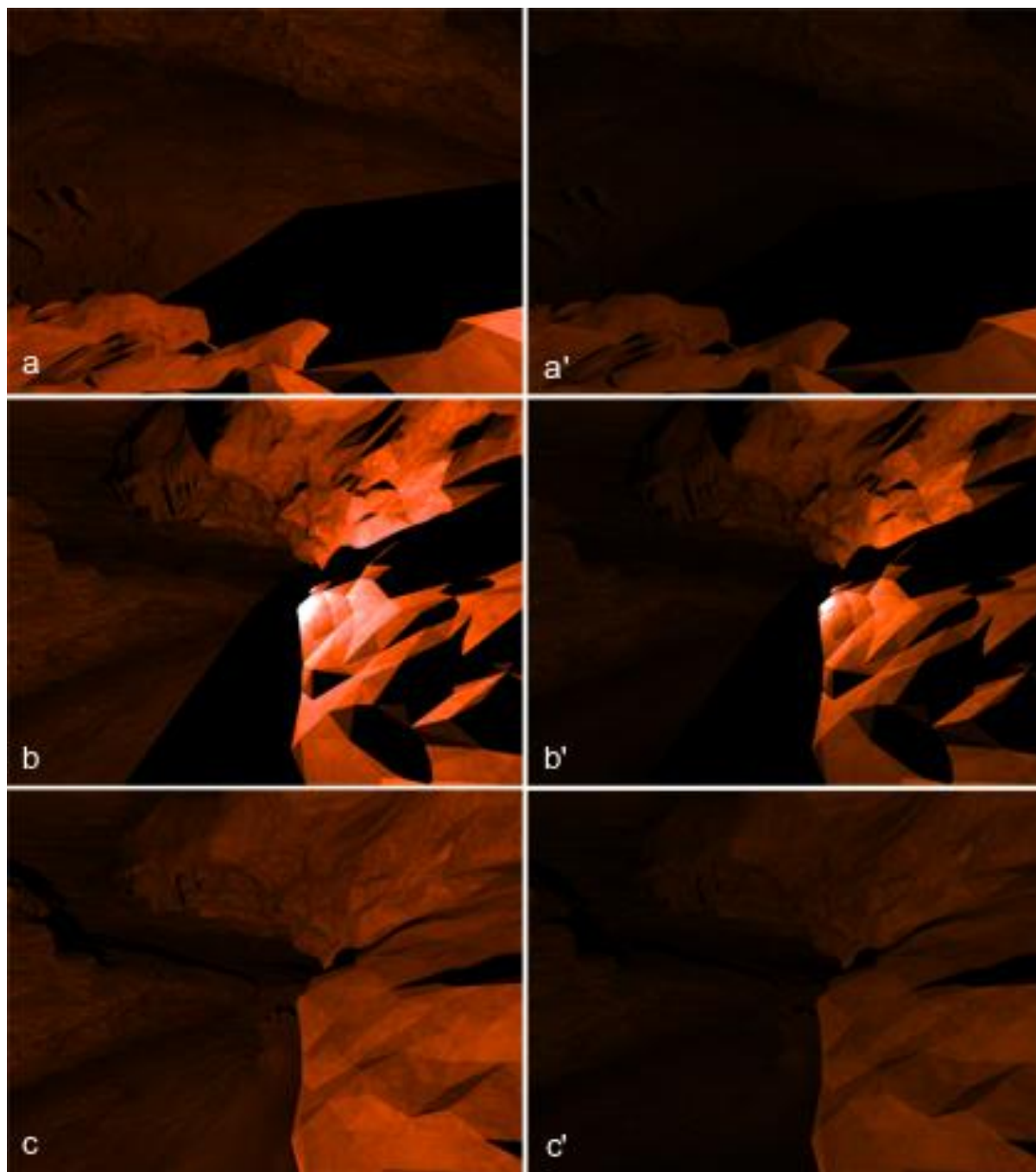


Figure 131 : Simulations numériques réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. Simulation d'éclairage à l'aide d'une torche de type 3 et d'une saturation de 10 000 (a, b, c) et d'une lampe à graisse de type 1B associée à une saturation de 30 000 (a', b', c'). a et a' : vue sur le sol en contrebas, b et b' : vue vers la droite, en direction du Locus 1, luminaire porté à droite de la caméra, c et c' : vue vers la droite, en direction du Locus 1, luminaire porté à gauche de la caméra.

d) *Galerie vers les locus*

Au niveau de l'entrée amont de la galerie, près de l'empreinte de pas (Section 3.1.C.1. *Traces paléolithiques anthropiques et cheminement actuel*), l'éclairage à la torche permet une visibilité sur l'ensemble du secteur, voûtes compris, et les sols sont suffisamment éclairés pour être détaillés (Figure 132). L'éclairage à la lampe à graisse ne permet qu'une bonne visibilité de la paroi la plus proche, c'est-à-dire la paroi droite, tandis que les seuls repères au sol visibles sont les stalagmites (dont on ne connaît pas l'âge), qui permettent par leur présence de deviner le niveau du sol (Figure 132).

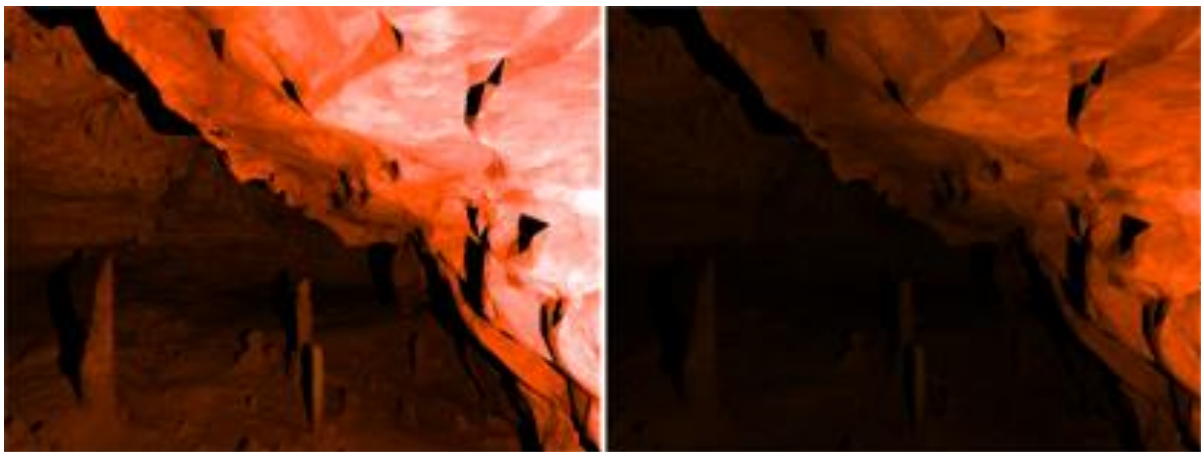


Figure 132 : Simulation numérique réalisée au pied de la descente du Panneau du Pont d'argile, avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. Distance entre la caméra et la stalagmite de gauche d'environ 3 m. À gauche : simulation d'éclairage avec une torche de type 3, saturation de 10 000, à droite : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 1B, saturation de 30 000.

La seconde simulation que nous avons réalisée dans cet espace a été produite depuis l'amont de la galerie, à environ 2 m des parois droite et gauche (Figure 133). Les résultats à la torche montrent encore une très bonne visibilité de l'ensemble, ainsi que de la paroi du fond et des dépressions qui forment le Locus 1 à l'extrémité aval de la galerie. La simulation à l'aide d'une lampe à graisse montre au contraire une visibilité très réduite : seule la paroi gauche est visible.

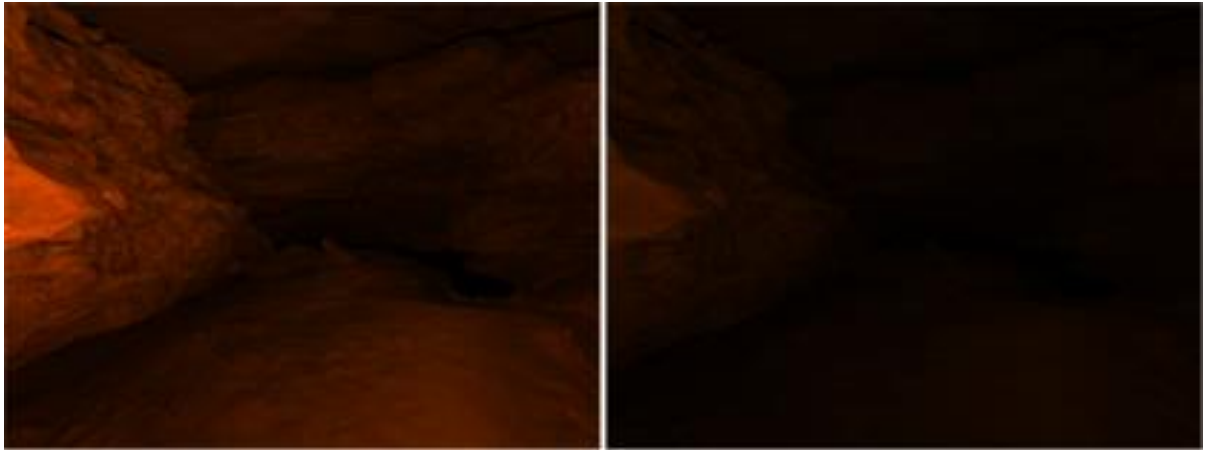


Figure 133 : Simulation numérique réalisée en amont de la galerie menant au Locus 1, avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d’illumination élémentaire. Distance entre la caméra et le relief en paroi gauche d’environ 2,50 m. À gauche : simulation d’éclairage avec une torche de type 3, saturation de 10 000, à droite : simulation d’éclairage avec une lampe à graisse de type 1B, saturation de 30 000.

Une troisième simulation a été réalisée près de la paroi gauche, là où de potentielles traces anthropiques auraient été remarquées (se reporter à la Section 3.1.C.1. *Traces paléolithiques anthropiques et cheminement actuel*). La torche permet une vision détaillée de la galerie, y compris des sols et de la voûte. Il est aisé, dans cette condition, de remarquer la présence de dépressions sur la droite (Figure 134). La lampe à graisse ne permet de distinguer que le bloc basculé qui peut servir de point de repère au Locus 1, situé immédiatement à sa droite. La longueur et la largeur de la galerie, ainsi que les dépressions, ne sont en revanche pas discernables (Figure 134).



Figure 134 : Simulation numérique réalisée en amont du Locus 1, près de la paroi gauche, avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d’illumination élémentaire. Distance entre la caméra et le bloc basculé d’environ 4 m. À gauche : simulation d’éclairage avec une torche de type 3, saturation de 10 000, à droite : simulation d’éclairage avec une lampe à graisse de type 1B, saturation de 30 000.

Enfin, la dernière simulation de cette section a été réalisée à la bifurcation entre la piste des ours (sur la gauche) et le *By-pass* (sur la droite). L'éclairage produit par la torche permet de comprendre que dans un premier temps ces deux voies se suivent. Il est également aisé de remarquer le Locus 2 ainsi que les restes osseux²⁵ qui le composent (Figure 135). Éclairés par une lampe à graisse, le sol du *By-pass* n'est pas visible, le Locus 2 et les restes associés non plus, et il devient impossible de déterminer où mènent les deux voies possibles, bien que les deux cheminements soient visibles (Figure 135).

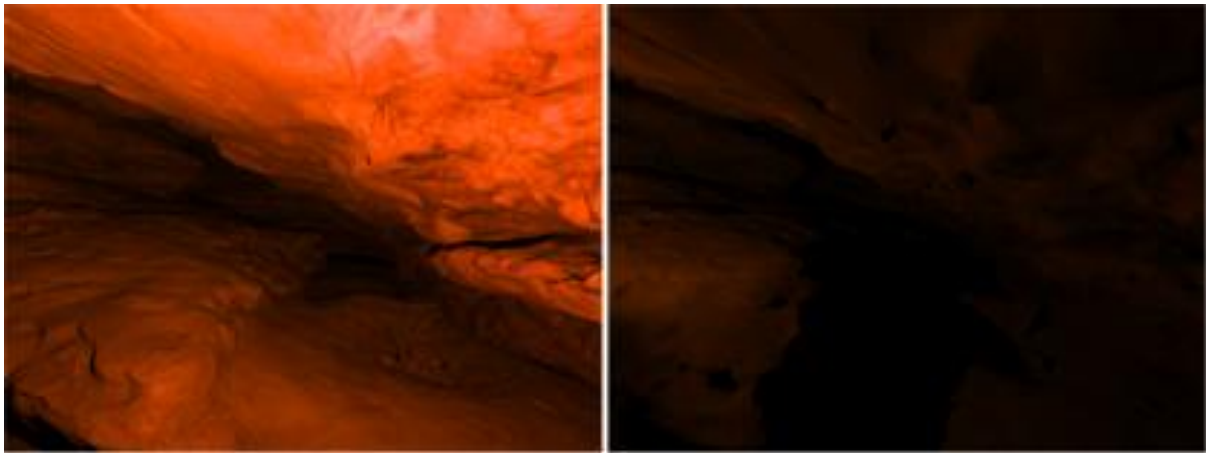


Figure 135 : Simulation numérique réalisée à la bifurcation entre la piste des ours, vers la gauche, et le *By-pass*, vers la droite, avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. Distance entre la caméra et le bord proximal du Locus 2 d'environ 3 m. À gauche : simulation d'éclairage avec une torche de type 3, saturation de 10 000, à droite : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 1B, saturation de 30 000.

e) Discussion

La grotte de Cussac, dont le sol est irrégulier, composé d'argile mais aussi de blocs effondrés, de bauges à ours et même de soutirages qui rejoignent le niveau inférieur semble d'emblée peu appropriée à l'usage de lampes portées pour le déplacement souterrain, ce mode d'éclairage laissant le sol dans l'obscurité. À cela s'ajoutent les dimensions du secteur analysé de la cavité, d'une hauteur maximale d'environ 7 m et de largeur maximale de 8 m, et le fait que les parois de Cussac réfléchissent peu la lumière, comme en témoignent les prises de vues où il est nécessaire de disposer de très puissants flashes. Dans ces conditions, la torche permet toujours d'éclairer l'ensemble des parois et voûtes, tandis que l'éclairage produit par une lampe à graisse contraindrait à se placer à proximité d'une paroi, ce qui peut être très contraignant dans la

²⁵ Dans les conditions actuelles de conservation de cette bauge à restes humains.

mesure où de nombreux obstacles nécessitent d'être mobile pour les contourner. On peut déduire de ces remarques qu'un éclairage à la torche semble plus adapté au déplacement dans ce secteur de Cussac, ce qui est en accord avec la présence de mouchages sur les parois, bien que ces derniers ne soient pas aussi nombreux qu'on pourrait l'attendre d'un éclairage entièrement à la torche. Plusieurs hypothèses peuvent l'expliquer, comme par exemple l'utilisation de lampes à graisse lors des séjours prolongés, une très faible durée des installations (lorsque l'on marche, les morceaux de charbon au bout des torches peuvent tomber d'eux-mêmes et ne pas nécessiter de mouchages), ou encore une présence humaine extrêmement ponctuelle.

Le modèle de torche que nous proposons à une autonomie d'environ 30 mn, ce qui correspond à la durée moyenne nécessaire, sans arrêt, pour parcourir la grotte depuis l'entrée actuelle (et probablement paléolithique) jusqu'au Grand Panneau en aval, ou jusqu'au Panneau de l'Oie en amont. À partir de ce postulat, il semble alors nécessaire d'emporter plusieurs torches, peut-être réparties entre plusieurs individus, selon la durée prévue des incursions. Il est cependant aussi possible que les torches paléolithiques fonctionnaient différemment et disposaient d'une plus longue autonomie.

La présence de deux potentielles lampes à graisses en amont (aucune analyse permettant de s'assurer qu'il s'agit bien de lampes à graisse n'a encore été menée sur ces objets à ce jour) montre qu'un autre type d'éclairage était utilisé au sein de la cavité. Différentes raisons peuvent alors être invoquées : utilisation d'un balisage lumineux au sol, longue présence dans certains secteurs de la cavité, stationnements dans des espaces de petites dimensions, indisponibilité des matières premières nécessaires à la fabrication de torches, ou encore pour des raisons culturelles.

Suite à ces considérations générales, nous proposons de répondre aux questions que nous nous sommes posées en amont de ce travail :

Quels obstacles (bloc, dépression, cul-de-sac...) sont perçus selon les différents éclairages, et à quelle distance ?

La torche permet de visualiser les différents obstacles jusqu'à une distance d'une dizaine de mètres²⁶, et ce dans toutes les directions. Ainsi, quel que soit l'obstacle (une dépression, un vide, un bloc, une paroi bloquante par exemple), la torche permet de le repérer sur cette distance.

La lampe, au contraire, éclaire très peu le sol. Ainsi, les dépressions ne sont perceptibles que par le noir, l'absence de réflexion, qu'elles produisent. Il est alors impossible de préciser si l'obstacle est infranchissable (comme un flanc ou une dépression rédhibitoire) ou non (dans le cas d'une bauge à ours ou d'un sol descendant) à moins d'en être à proximité immédiate. Les obstacles de type blocs peuvent être perçus jusqu'à une distance d'environ 4 m, ce qui concorde avec de précédents travaux (Pastoors et Weniger, 2011).

Quelles sont les modalités nécessaires au déplacement (nature et nombre de luminaires) en fonction des lieux (couloir ou salle, plafond bas ou haut, etc.) ?

Nous avons pu lors de cette succession de simulations, nous projeter dans différents types d'espaces. La largeur et la hauteur des salles et couloirs étaient toujours inférieures à la distance de visibilité d'une torche, aucune importante difficulté n'a donc été notée avec cet éclairage, une seule torche permettant un déplacement aisé dans l'ensemble du secteur étudié. La seule difficulté qui pourrait intervenir serait la nécessité d'utiliser les deux mains pour avancer dans la cavité, or cela n'est pas nécessaire dans ce secteur.

La question est plus complexe avec l'éclairage produit par une lampe à graisse. Portés, ces luminaires sont moins efficaces dès lors que le sol devient irrégulier. Leur utilisation semble alors limitée aux espaces très bas de plafond (autour du Panneau du Pont d'Argile, par exemple, Figure 128, Figure 130) ou posées au sol comme c'est d'ailleurs le cas pour celle du méandre amont entre les Figures Féminines et le Panneau de l'Oie. Cette dernière solution n'a pas semblé très adaptée dans le cas d'une seule lampe pour l'ensemble de la salle du Panneau de la Découverte (Figure 127), mais on peut supposer que cette stratégie trouve son efficacité dans des espaces moins grands, ou à la condition de disposer de plusieurs lampes, voire des lampes fixes, plus larges et plus puissantes.

²⁶ L'ensemble des données chiffrées sur l'éclairage ne doivent être comprises que comme une indication, car fortement dépendantes de l'acuité visuelle de l'observateur.

À quelle distance des parois et des voûtes peut-on, ou doit-on, se placer pour se repérer dans l'espace ? Quel est le rôle de la réflectance des parois pour améliorer son propre éclairage portatif ?

Nous avons pu observer que dès que les parois sont à plusieurs mètres de distance, l'éclairage est très diminué, montrant l'intérêt de se situer à proximité d'une surface qui va ainsi refléter et améliorer la lumière produite. Par exemple, avec une lampe à graisse, il est aisé d'observer le Panneau du Pont d'Argile à une distance d'environ 7 m lorsque l'observateur est proche du sol, des voûtes et des parois (Figure 128), mais dès que l'observateur se tourne vers la gauche, en direction du pont d'argile, et que la lampe s'éloigne des parois, il devient difficile de visualiser la paroi opposée, pourtant située à seulement 3 m de distance de l'observateur (Figure 130, d).

La différence entre torches et lampes à graisse est là encore flagrante, dans la mesure où l'éclairage d'une torche va pouvoir bénéficier de la réflectance des sols d'une part, et des parois situées à de plus grandes distances d'autre part. Il est cependant difficile de donner un chiffre précis tant les facteurs impliqués sont multiples : capacités visuelles de l'observateur, proximité, morphologie, dimensions et couleurs des parois, ainsi que leur aspect : plus une surface est irrégulière, plus elle produira d'ombres, et plus l'espace sera difficile à appréhender.

Existe-t-il plusieurs cheminements logiques ? Sont-ils les mêmes que ceux actuellement empruntés ? Corroborent-ils les TrAcs repérées ?

Les cheminements visibles à l'aide d'un éclairage paléolithique (lampe à graisse ou torche) sont en effet ceux pour lesquels nous disposons de traces ; cependant, dans cette partie de Cussac, il semble que les fréquentations soient davantage induites par la topographie que par l'éclairage. Par exemple, juste en amont du Panneau de la Découverte, deux voies sont disponibles, par la droite, via une petite escalade, ou par la gauche, où un léger détour permet d'accéder sans difficulté au bloc sous le Panneau de la Découverte (Figure 118). Les deux voies sont visibles, mais celle préférée par les Préhistoriques est celle qui ne nécessitait pas d'escalade (il s'agit par ailleurs probablement de la voie la plus naturelle dans la mesure où elle a été empruntée par les ours, qui n'avaient pas d'éclairage). Un autre exemple serait celui du pont d'argile, qui est un espace riche en traces, et pourtant difficile à appréhender dans son ensemble avec un éclairage préhistorique, lampe à graisse ou torche (Figure 129, c, Figure 130, c). On peut arguer que la localisation de traces anthropiques dans des secteurs aisément accessibles, mais peu visibles de loin, soit un élément supplémentaire en faveur de l'utilisation de torches au profit des lampes à graisse pour une part importante des déplacements dans Cussac.

Perspectives

Il serait intéressant de bénéficier de secteurs modélisés plus larges et plus hauts afin d'étudier le comportement de l'éclairage à la torche lorsque les voûtes et toutes les parois ne sont pas éclairées : est-il alors nécessaire, comme pour la lampe à graisse, de se positionner près d'une paroi ? Ou l'éclairage du sol peut-il lui-même servir de repère ?

Nous n'avons pas pu tester une éventuelle visibilité entre la Mezzanine et la surface du Panneau du Bouquetin, pourtant situé dans la continuité du chenal de voûte, ni l'accessibilité à ce panneau via la piste des ours car le modèle 3D de cette portion (Patrimonio e Industria, 2015) est en cours de traitement.

Enfin, il semble extrêmement délicat de se déplacer dans une cavité à l'aide d'une ou de plusieurs lampes à graisse telles que nous les avons conçues, notamment à cause de l'absence d'éclairage des sols, or de nombreuses lampes ont été découvertes dans le milieu souterrain, y compris deux potentielles à Cussac. Poursuivre les expérimentations à leur sujet et réaliser d'autres simulations d'éclairages, dans des espaces plus réduits, pourrait nous aider à mieux comprendre leur fonctionnement. Des simulations acoustiques pourraient également nous permettre de comprendre ce que la dimension sonore peut apporter à la compréhension de la topographie. En particulier, dans l'espace que nous avons analysé, nous pouvons nous poser les questions suivantes : l'acoustique permet-elle de comprendre que la Mezzanine débouche sur un à-pic ? Est-il possible de percevoir, grâce aux sons, la profondeur du soutirage de la salle du Panneau de la Découverte ?

3. Écholocalisation

Nous savons que l'écholocalisation (c'est-à-dire la capacité à détecter des objets, voire à s'orienter dans l'espace, à l'aide de la réflexion des sons sur des obstacles alentours) est aujourd'hui utilisée par certains malvoyants pour se déplacer – sans évoquer ici cette faculté utilisée par les animaux (Martínez Rojas *et al.*, 2009, 2010 ; Schenkman et Nilsson, 2010 ; Teng et Whitney, 2011 ; Kolarik *et al.*, 2014). Cette considération a naturellement soulevé la possibilité de l'utilisation de sons, par les Paléolithiques, pour s'orienter sous terre. En particulier, qu'est-ce que la réponse acoustique du milieu peut apporter comme éléments sur la configuration de l'espace ?

Pour répondre à cette question, nous avons simulé des sons (ponctuels, comme des claquements de doigts, disponibles en Annexe 11) dans le modèle 3D, et nous les avons associés à une description succincte de l’espace dans lequel ils ont été réalisés. Nous avons ensuite demandé à 24 participants d’associer les sons, qu’ils ont écoutés au casque, aux descriptions des espaces. Les réponses ont ensuite été traitées afin de déterminer si certaines personnes sont plus ou moins performantes à déterminer le type d’espace à l’aide de sons, et si certains types d’espaces semblent plus faciles à déterminer que d’autres. Cette étude, réalisée avec peu de participants, et aucun habitué à l’écholocalisation, permettra d’apporter de premiers éléments de réponses et d’ouvrir les portes à une étude plus complète.

a) *Méthode*

*Les participants*²⁷

L’expérimentation ayant été menée en période de crise sanitaire, les 24 participants ont été sélectionnés dans notre environnement personnel, quatre d’entre eux ayant une expérience du milieu karstique (par une pratique ponctuelle de la spéléologie), et aucun une expérience de l’écholocalisation. Nous n’avons sélectionné que des adultes entre 19 et 65 ans au moment de l’expérience (12 femmes et 12 hommes), avec une moyenne de 28 ans.

Afin de ne pas biaiser l’étude, les participants ont tous réalisé l’écoute sur le même casque (AKG K275). Celui-ci permet de suffisamment isoler l’auditeur des sons extérieurs pour permettre une très bonne immersion sonore.

L’expérience musicale des participants a également été estimée, entre 1 et 4 :

- 1 : Aucun entraînement particulier,
- 2 : pratique de la musique ancienne ou occasionnelle,
- 3 : pratique régulière non intensive,
- 4 : pratique professionnelle de la musique.

²⁷ Merci à Armel, Benoit, Déthié, Éléa, Éloi, Émilie, Eugène, Évelyne, Geneviève, Jérémy, Juliette, Léa, Madeleine, Marie J., Marie B.-B., Maryline, Mathilde, Max, Maximilien, Olivia, Quentin, Rayan, Smourbiff et Théo

Les lieux des simulations

Nous avons sélectionné un panel de dix lieux aux morphologies variées pour y réaliser nos simulations :

- Espace n° 1 : Couloir étroit (env. 2 m de large) et bas de plafond (env. 1,50 m).
- Espace n° 2 : Entrée d'une large salle (env. 5 m de haut et de large).
- Espace n° 3 : Centre d'une large salle (env. 6 m de large et 5 m de haut).
- Espace n° 4 : Couloir bas (env. 1,50 m) mais large (env. 5 m).
- Espace n° 5 : Espace de dimensions moyennes (env. 2 m de haut, 3 m de large), situé à la jonction entre plusieurs galeries.
- Espace n° 6 : Extrémité d'une galerie de dimensions moyennes (env. 3 m de large et de haut) s'ouvrant sur une large salle (env. 5 m de haut et de large).
- Espace n° 7 : Galerie de dimensions moyennes (env. 3 m de haut et de large), encombrée de spéléothèmes au sol et au plafond.
- Espace n° 8 : Entrée (env. 3 m de haut et de large) d'une large galerie (env. 5 m de large et de haut, 10 m de long).
- Espace n° 9 : Centre d'une large galerie (env. 5 m de large et de haut, 10 m de long).
- Espace n° 10 : Espace en forme de méandre, bas de plafond (1,30 m de haut).

Description de l'exercice demandé

Les participants, qui n'avaient pas accès aux numéros des lieux, mais uniquement aux sons, ont dû essayer de retrouver, à l'aide de l'écoute au casque des différents sons, dans quel lieu a été produit quel son. Il leur a été possible d'écouter les sons autant de fois que nécessaire, et de prendre le temps qu'ils souhaitaient.

b) Résultats

Un tableau détaillant les résultats est disponible en Annexe 12. Le Tableau 26 présente le nombre de bonnes réponses par participant, ainsi que leur entraînement musical et leur pratique de la spéléologie et le Tableau 27 le nombre de bonnes associations son-espace.

Partie 3 – Envisager l’humain dans son contexte, L’apport des simulations

	<i>Pratique de la spéléologie</i>	<i>Entraînement musical</i>	<i>Nombre de bonnes réponses</i>
<i>Participant A</i>	Oui	3	3
<i>Participant B</i>	Non	4	5
<i>Participant C</i>	Non	2	0
<i>Participant D</i>	Non	4	2
<i>Participant E</i>	Non	3	2
<i>Participant F</i>	Non	1	2
<i>Participant G</i>	Non	3	0
<i>Participant H</i>	Non	2	3
<i>Participant I</i>	Non	1	1
<i>Participant J</i>	Oui	1	1
<i>Participant K</i>	Non	3	2
<i>Participant L</i>	Oui	2	1
<i>Participant M</i>	Non	3	2
<i>Participant N</i>	Non	1	1
<i>Participant O</i>	Non	1	2
<i>Participant P</i>	Non	1	2
<i>Participant Q</i>	Non	1	1
<i>Participant R</i>	Non	1	1
<i>Participant S</i>	Non	4	3
<i>Participant T</i>	Non	1	1
<i>Participant U</i>	Non	1	3
<i>Participant V</i>	Non	4	2
<i>Participant W</i>	Non	1	2
<i>Participant X</i>	Oui	3	5

Tableau 26 : Pratique de la spéléologie, entraînement musical et nombre de bonnes réponses par participant.

	<i>Nombre de bonnes réponses</i>
<i>Espace associé au son 1</i>	10
<i>Espace associé au son 2</i>	6
<i>Espace associé au son 3</i>	2
<i>Espace associé au son 4</i>	4
<i>Espace associé au son 5</i>	3
<i>Espace associé au son 6</i>	1
<i>Espace associé au son 7</i>	3
<i>Espace associé au son 8</i>	6
<i>Espace associé au son 9</i>	8
<i>Espace associé au son 10</i>	4

Tableau 27 : Nombre de bonnes associations entre espaces et sons.

c) *Interprétation*

Influence de l'expérience des participants

La Figure 136 laisse apercevoir une légère influence de l'entraînement auditif des participants sur leurs résultats à l'expérience : alors que les plus entraînés n'ont jamais moins de deux bonnes réponses, la plupart des moins entraînés n'en ont qu'une, et jamais plus de trois.

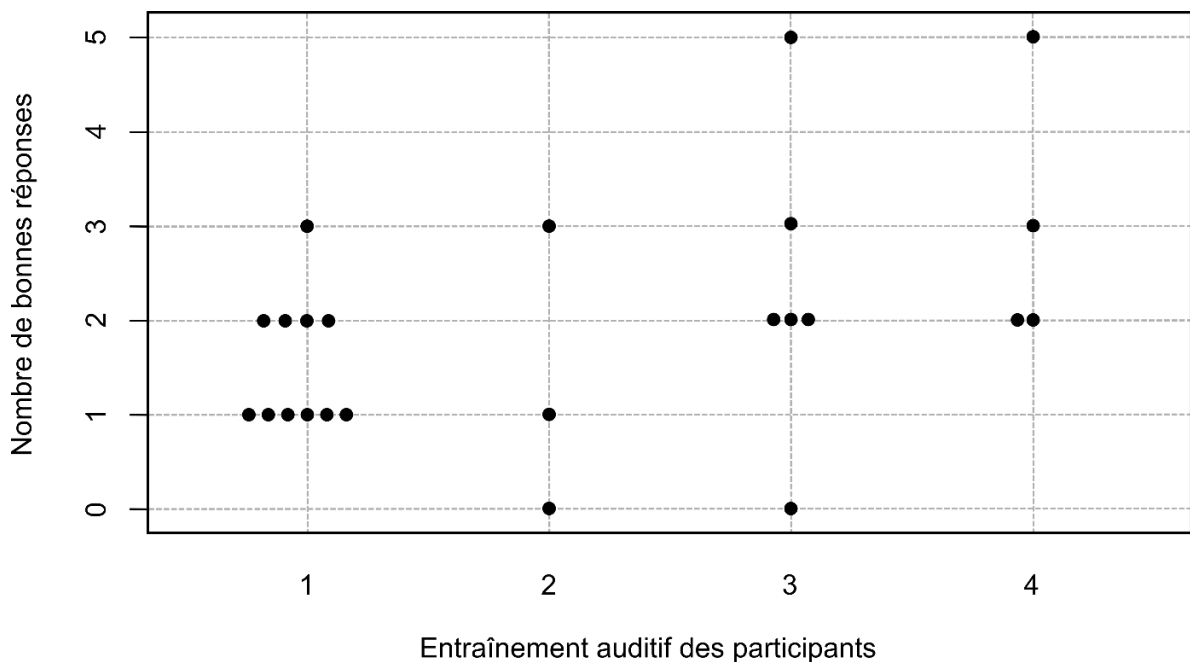


Figure 136 : Lien entre le nombre de bonnes réponses et l'entraînement auditif.

De leur côté, les résultats des participants ayant une pratique de la spéléologie (Figure 137) montrent une grande hétérogénéité, mais il serait nécessaire de disposer d'un échantillon plus important pour conclure sur l'influence de cette pratique sur les capacités d'écholocation en milieu souterrain.

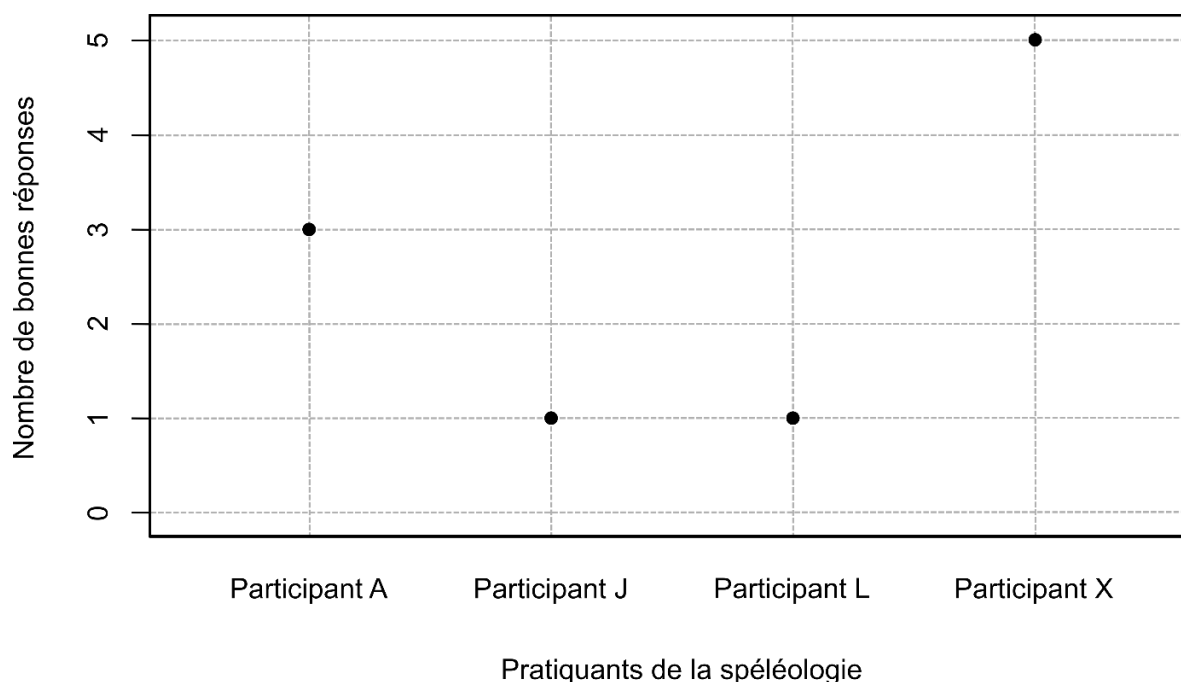


Figure 137 : Lien entre le nombre de bonnes réponses et pratique de la spéléologie.

Performance des participants

En supposant que les répondants feraient à chaque fois des réponses totalement au hasard en répartissant leurs 10 réponses pour chacun des 10 sons, la moyenne attendue de bonnes réponses serait égale à une seule bonne réponse. Ainsi, tout répondant faisant au moins deux bonnes réponses fait déjà mieux que ce que le hasard permet généralement. En particulier, sous hypothèse de hasard total, il y a moins de 10 % de chances qu’un participant obtienne 3 bonnes réponses ou plus.

Or, nous pouvons remarquer que les bonnes réponses s’échelonnent entre 0 et 5, selon les participants (Tableau 28). Il semble donc qu’au sein d’une population sans expérience spécifique concernant l’écholocalisation, il existe une forte disparité de compétence. D’après notre échantillon, une part importante des sons n’est pas associée aux bons espaces (au moins 50 % pour chaque participant). Ce constat indique qu’il est très difficile, sans formation ou expérience à l’écholocalisation, de l’utiliser afin de se situer sous terre ou de s’y déplacer.

PARTICIPANT	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
NOMBRE DE BONNES REPONSES	3	5	0	2	2	2	0	3	1	1	2	1	2	1	2	2	1	1	3	1	3	2	2	5

Tableau 28 : Nombre de bonnes réponses par participant.

Reconnaissance des lieux

Si chaque participant avait répondu au hasard, on attendrait alors que chaque son soit reconnu par 2 à 3 observateurs (Figure 138), ce qui signifie que les sons ayant été reconnus par 4 participants ou plus sont des sons plus faciles à associer à des espaces que les autres (ou en tout cas ce sont des sons dont la reconnaissance est supérieure à ce que le hasard permet en moyenne).

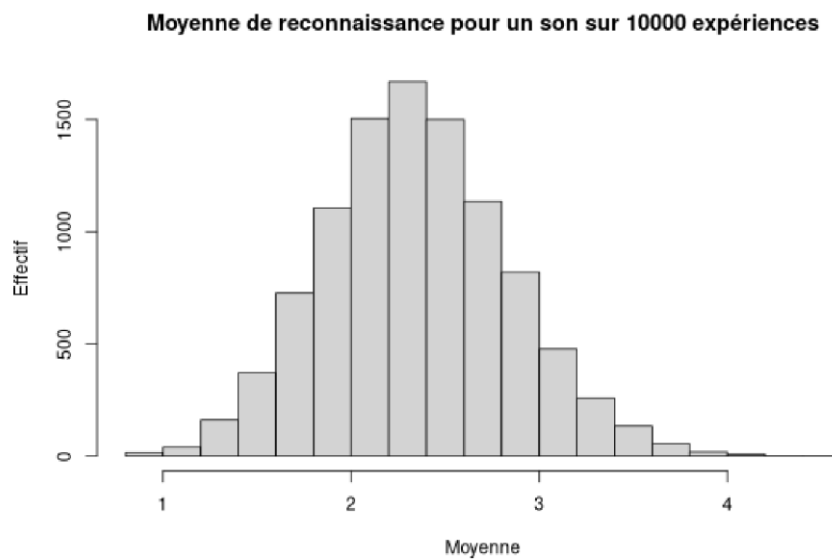


Figure 138 : Sur 10 000 générations de données aléatoires, répartition de la moyenne du nombre d'observateurs ayant correctement reconnu un son.

Les associations son/lieu les mieux reconnues (bénéficiant d'au moins 4 bonnes réponses) sont les numéros 1 (10 bonnes réponses), 2 (6 bonnes réponses), 4 (4 bonnes réponses), 8 (6 bonnes réponses), 9 (8 bonnes réponses) et 10 (4 bonnes réponses).

On remarque en particulier les lieux les mieux perçus sont les entrées d'espaces larges (N° 2 et N° 8), le centre d'un large couloir (N° 9, contrairement au centre d'une large salle, N° 3), les deux couloirs de dimensions réduites (étroit et bas, N° 1, et large et bas, N° 4), ainsi que le méandre, également bas de plafond (N° 10). Les galeries de dimensions moyennes, quelles que soient leurs caractéristiques (à la jonction de plusieurs galeries, N° 5, s'ouvrant sur un espace plus large, N° 6, ou encombrée de spéléothèmes, N° 7) semblent avoir été majoritairement associés au hasard.

d) Conclusion

L'entraînement de l'oreille, même s'il n'est pas spécifique à l'écholocalisation, par exemple par une pratique régulière de la musique, semble donner une meilleure capacité d'écholocalisation. Cependant, aucun participant n'a suffisamment de bonnes réponses pour pouvoir s'orienter sous terre, puisqu'il a par exemple été impossible pour les participants de déterminer la distance à une paroi. Enfin, certains espaces semblent plus faciles à reconnaître que les autres. En particulier, les espaces plus fermés (couloirs bas et/ou étroits), ou au contraire l'approche d'espaces ouverts. Les galeries de dimensions intermédiaires semblent être les plus difficiles à reconnaître. Cela est peut-être lié à au mode de vie des participants, habitués à évoluer dans des espaces fermés (p. ex. pièces de maison) ou au contraire très grands (halls d'immeubles, salles de concerts, monuments religieux du type cathédrales...). Ces observations doivent être prises avec précautions et ne peuvent pas être directement transposées à d'autres sociétés puisque notre perception de la profondeur, en particulier pour les personnes sans entraînement spécifique, est très probablement liée à notre culture et à notre mode de vie.

Ces quelques commentaires restent donc suspendus au biais culturel et pourraient être étayés par de nouvelles expériences proposant plus de participants, notamment des habitués du milieu souterrain et, si possible, des personnes pratiquant l'écholocalisation. Cette expérience montre tout de même qu'une oreille sollicitée quotidiennement (comme celle des personnes pratiquant régulièrement de la musique) entraîne une meilleure interprétation, mais il faut par ailleurs également connaître l'espace exploré. Nous avons donc montré qu'un entraînement spécifique pourrait permettre de développer la faculté d'écholocalisation et qu'ainsi l'hypothèse d'une utilisation par les Paléolithiques demeure plus que probable.

D. L'observation du monde souterrain

1. Le Panneau de la Découverte (2D1)

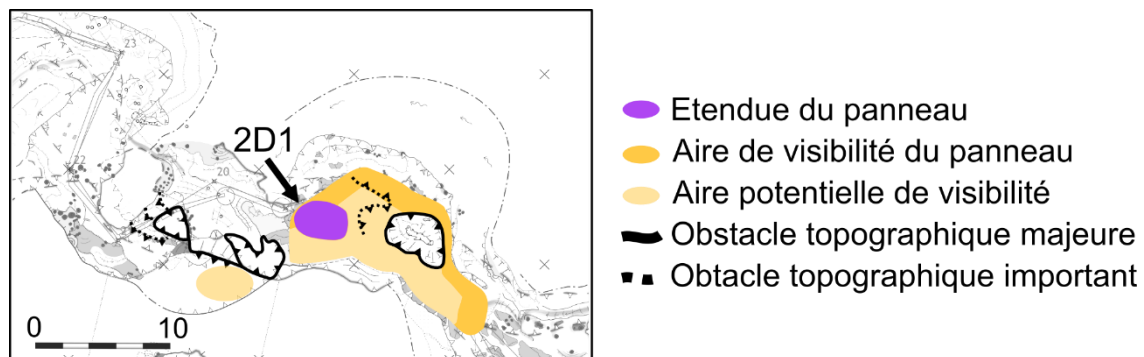


Figure 139 : Panneau de la Découverte. La surface éclairée correspond à la surface gravée. Photographie © V. Feruglio, C. Bourdier, PCR Cussac/MC.

Le Panneau de la Découverte, avec ses 52 entités graphiques découvertes à ce jour²⁸ superposées en un palimpseste d'une surface de 30 m² est l'un des panneaux majeurs de la cavité. À Cussac, certains panneaux semblent avoir été conçus en présence d'une audience (*p. ex.* le Grand Panneau, Feruglio *et al.*, 2019) cette hypothèse étant à l'heure actuelle irrésolue concernant le Panneau de la Découverte. En effet, le choix de la surface gravée est assez évocateur : le panneau est situé sur une grande surface plane, plafonnant au centre d'un espace élargi d'où le panneau est visible (avec notre éclairage moderne) depuis une dizaine de mètres en amont comme en aval (Figure 139). Cette localisation, qui met en valeur le panneau, a contraint le graveur à réaliser les entités graphiques qui le forment avec très peu de recul, sur un bloc incliné, à environ 2,5 m du sol (Figure 139). L'étude des entités gravées a permis de démontrer qu'au moins un des graveurs (si ce n'est l'unique graveur) était droitier. Cette information, qui peut sembler anecdotique, nous permettra d'affiner le choix de la localisation des sources d'éclairage.

²⁸ Janvier 2020

Cependant, malgré de nombreuses similitudes dans la disposition des éléments de l’espace créatif par rapport à la salle du Grand Panneau, la présence et la localisation d’une audience, simultanément ou postérieurement à la création du panneau n’y est pas aussi évidente (Feruglio *et al.*, 2019) : en amont du panneau, l’espace est large, mais le sol y est chaotique (il y a notamment un entonnoir de soutirage, déjà présent au Gravettien, H. Camus, comm. pers.), tandis qu’en aval, l’espace disponible est plus réduit mais le sol y est plat. En face du panneau, il y a un faible espace mais le bloc promontoire devait gêner en partie la visibilité de la zone gravée, tandis que toujours en face s’ouvre un recoupement de méandre (méandre 5Av) qui permet le recul nécessaire mais est un peu déporté sur la gauche. Dans tous les cas, ces points de vues ont l’avantage de se situer dans le même sens que celui du graveur/de la graveuse, rappelons que les figures sont toutes orientées pour une vision unique (pas de composition tournante comme sur un plafond). Malheureusement, cette zone est très contrainte par le cheminement balisé, et les champs de visibilité proposés dans une étude antérieure (Jouteau *et al.*, 2019), réalisée *in situ* à l’aide d’éclairages modernes, sont donc très incomplets (Figure 140).



Dans la sous-section suivante, nous proposons d’apporter de nouvelles clés de lecture à cette question en abordant l’éclairage du Panneau de la Découverte. Dans un premier temps, nous proposons de compléter la figure précédente (Figure 140) à l’aide de simulations d’éclairage avec une ou plusieurs lampes à graisses et torches (les images non saturées peuvent être trouvées en Annexe 13). Cela nous permettra de définir le ou les lieux depuis lesquels le panneau semble observable. Nous n’aborderons pas le sujet de la lisibilité des gravures présentes sur le panneau pour deux raisons : le modèle 3D ne dispose pas d’une définition nécessaire pour étudier la lecture des gravures, et il est impossible de simuler une flamme vacillante, alors que ce procédé

a pu être indispensable à la lecture des traits gravés (il est évident qu'une source de lumière générant des ombres était nécessaire pour voir les gravures même si un éclairage frontal permet de lire les contrastes de la roche plus claire dans le creux des incisions). Dans un second temps, la confrontation des résultats obtenus en fonction de l'éclairage simulé nous permettra de discuter de l'éclairage qui nous semble le plus adapté à l'observation du panneau par l'agent primaire (c'est-à-dire le ou les graveurs/graveuses) d'une part, et par un potentiel agent secondaire (une audience) d'autre part.

a) Champs de visibilité du Panneau de la Découverte (2D1)

Dans l'objectif d'affiner la version réalisée sur site des champs de visibilité du Panneau de la Découverte, nous avons réalisé des simulations en quelques points clés de l'espace. Lors de chaque simulation, l'éclairage était soit placé sous le Panneau de la Découverte (on parle alors d'éclairage *indirect*), posé sur le sol ou à 50 cm sous le Panneau, soit il était localisé entre 1,50 m et 1,60 m du sol, à quelques décimètres de l'observateur (on parlera d'éclairage *direct*), lui-même haut d'environ 1,70 m, afin de rentrer dans la variabilité de la taille des femmes et des hommes du Gravettien (Formicola et Giannecchini, 1999 ; Villotte *et al.*, 2015, 2017).

Éclairage direct à la torche

Avec ce type d'éclairage, on remarque (Figure 141) qu'on obtient un champ de visibilité de même étendue que celui produit sur le terrain. Ce sont surtout les obstacles topographiques qui limitent notre champ de visibilité, mais le panneau étant plafonnant, cela limite leur interférence. On remarque aussi qu'au-delà de 10 m de distance, la surface est difficile à distinguer, bien que l'espace où il se trouve soit visible.

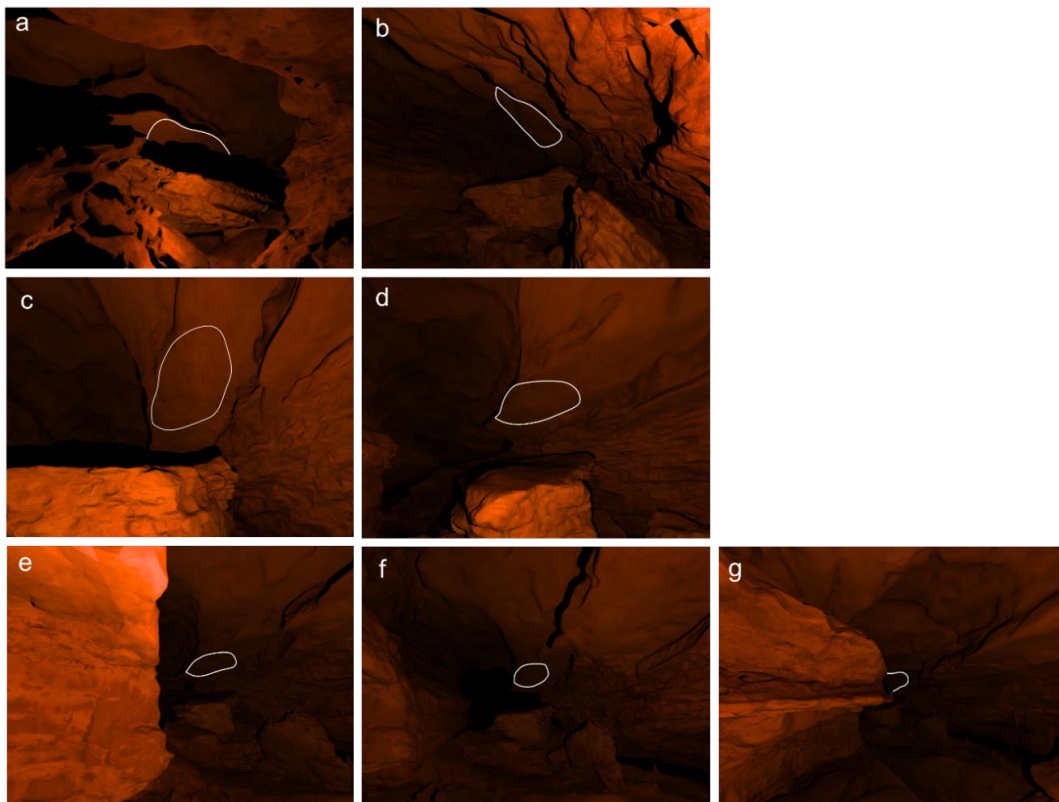
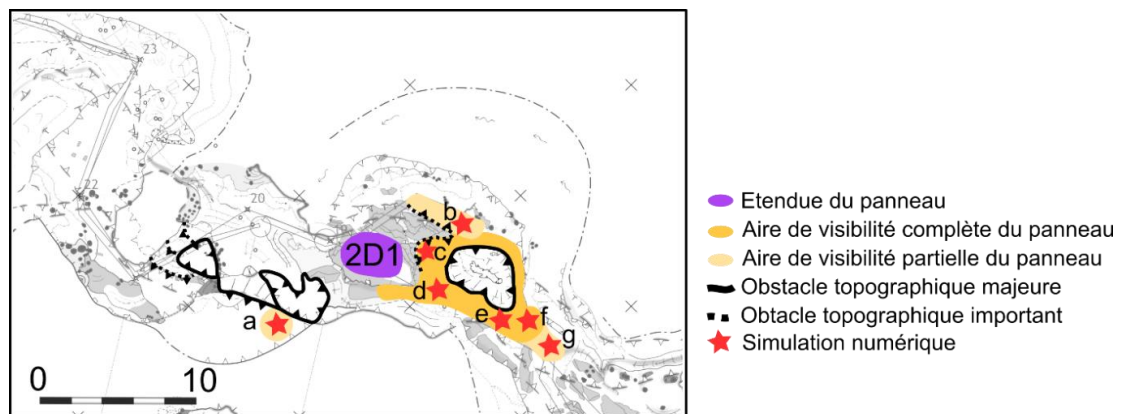


Figure 141 : Simulations numériques du champ de visibilité du Panneau de la Découverte (délimité par les traits blancs) par éclairage direct à l'aide d'une torche de type 3 (puissance moyenne). Simulations numériques réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire et d'une saturation de 10 000.

Éclairage direct à la lampe à graisse

Dans le cas d'un éclairage direct à la lampe à graisse, le champ de visibilité est très réduit (Figure 142). Seules les simulations produites dans un rayon inférieur à 5-6 m du panneau permettent d'en distinguer la surface.

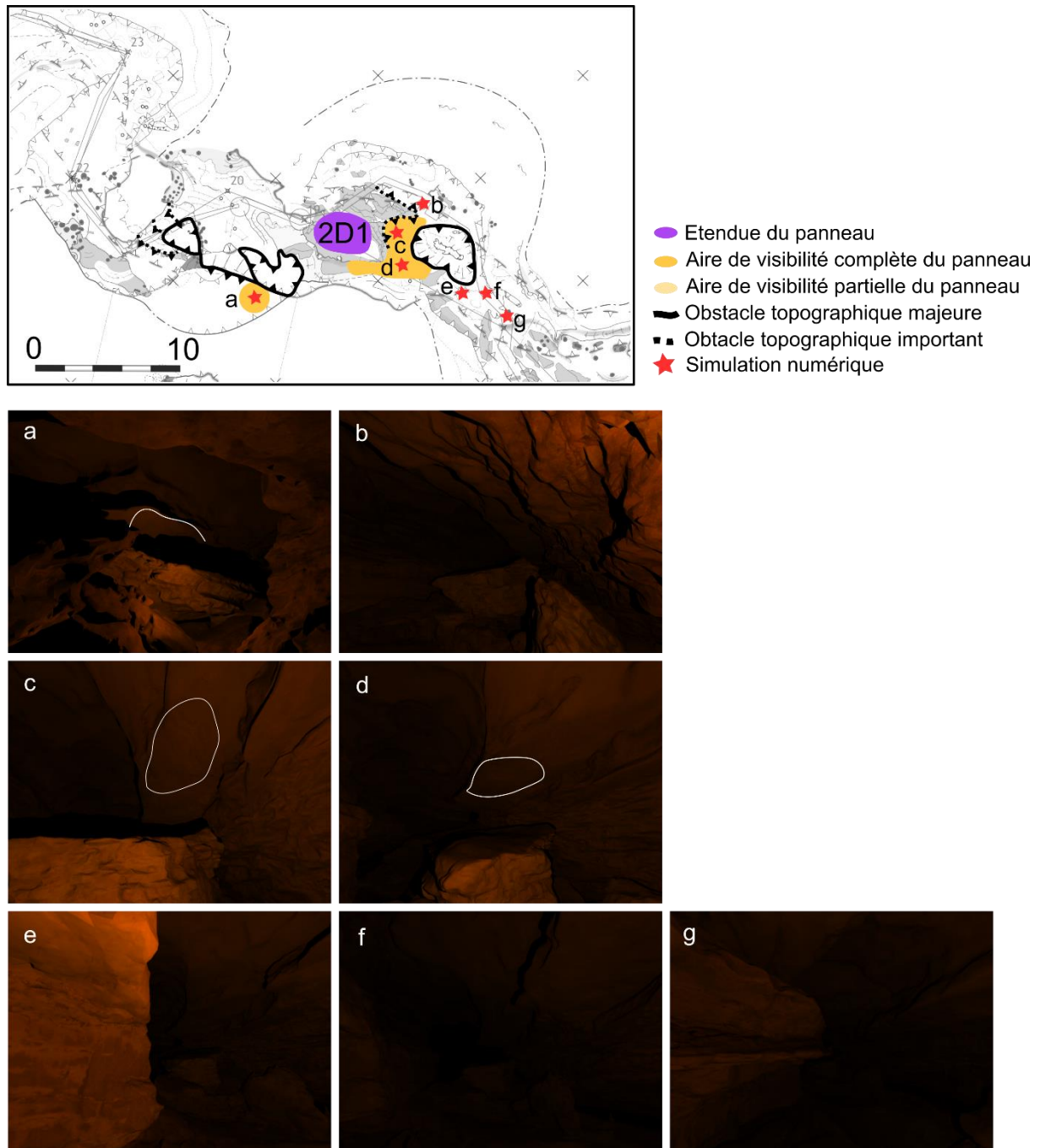


Figure 142 : Simulations numériques du champ de visibilité du Panneau de la Découverte (délimité par les traits blancs) par éclairage direct à l'aide d'une lampe à graisse de type 1B (puissance la plus élevée des lampes à graisse). Simulations numériques réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire et d'une saturation de 30 000.

Éclairage indirect à la torche

Une torche de puissance moyenne a été virtuellement placée à environ 50 cm sous le Panneau de la Découverte. Dans l’hypothèse où le ou les graveurs étaient droitiers (Aujoulat et Feruglio, 2009), la torche a été placée au centre-gauche du panneau. Un point de chauffe y a d’ailleurs été signalé par les prospections géomagnétiques, mais reste à vérifier (Lévêque et Mathé, 2013).

Avec ce type d’éclairage, l’ambiance lumineuse est beaucoup plus contrastée. Ainsi, les reliefs alentours sont moins visibles, mais le panneau en lui-même semble ressortir. Le champ de visibilité augmente, notamment car certains reliefs qui occultaient le panneau de par la projection de leur ombre sur la surface ne sont plus un obstacle lorsque le panneau est éclairé de près (Figure 143).

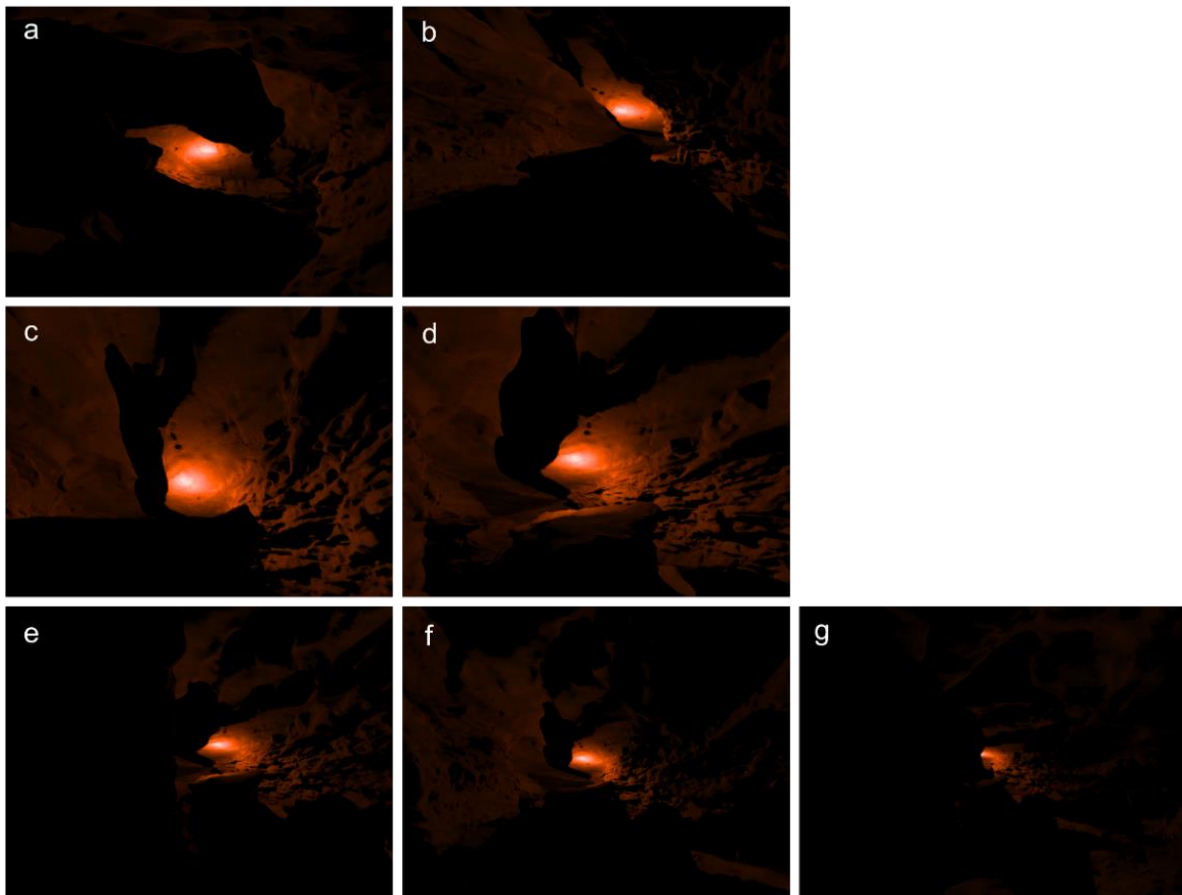
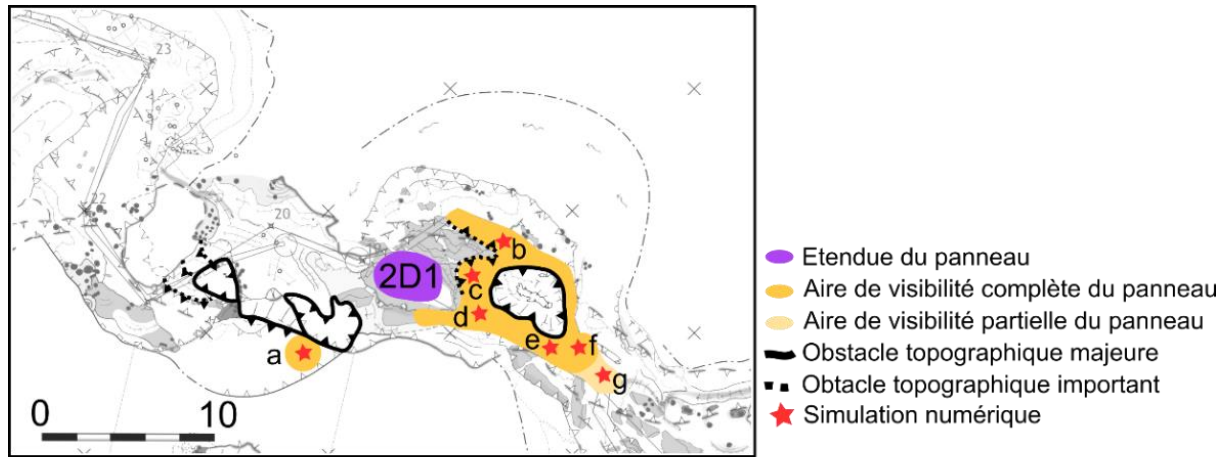


Figure 143 : Simulations numériques du champ de visibilité du Panneau de la Découverte par éclairage indirect à l'aide d'une torche de type 3 (puissance moyenne). Simulations numériques réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire et d'une saturation de 10 000.

Éclairage indirect à la lampe à graisse

L’éclairage du panneau à l’aide d’une unique lampe à graisse tenue à 50 cm du panneau permet, par le contraste qu’offre la surface éclairée vis-à-vis de l’obscurité totale du reste de l’espace, de discerner où se situe le panneau. Cependant, contrairement à la torche, la lampe ne permet pas d’éclairer seule l’ensemble du panneau (Figure 144).

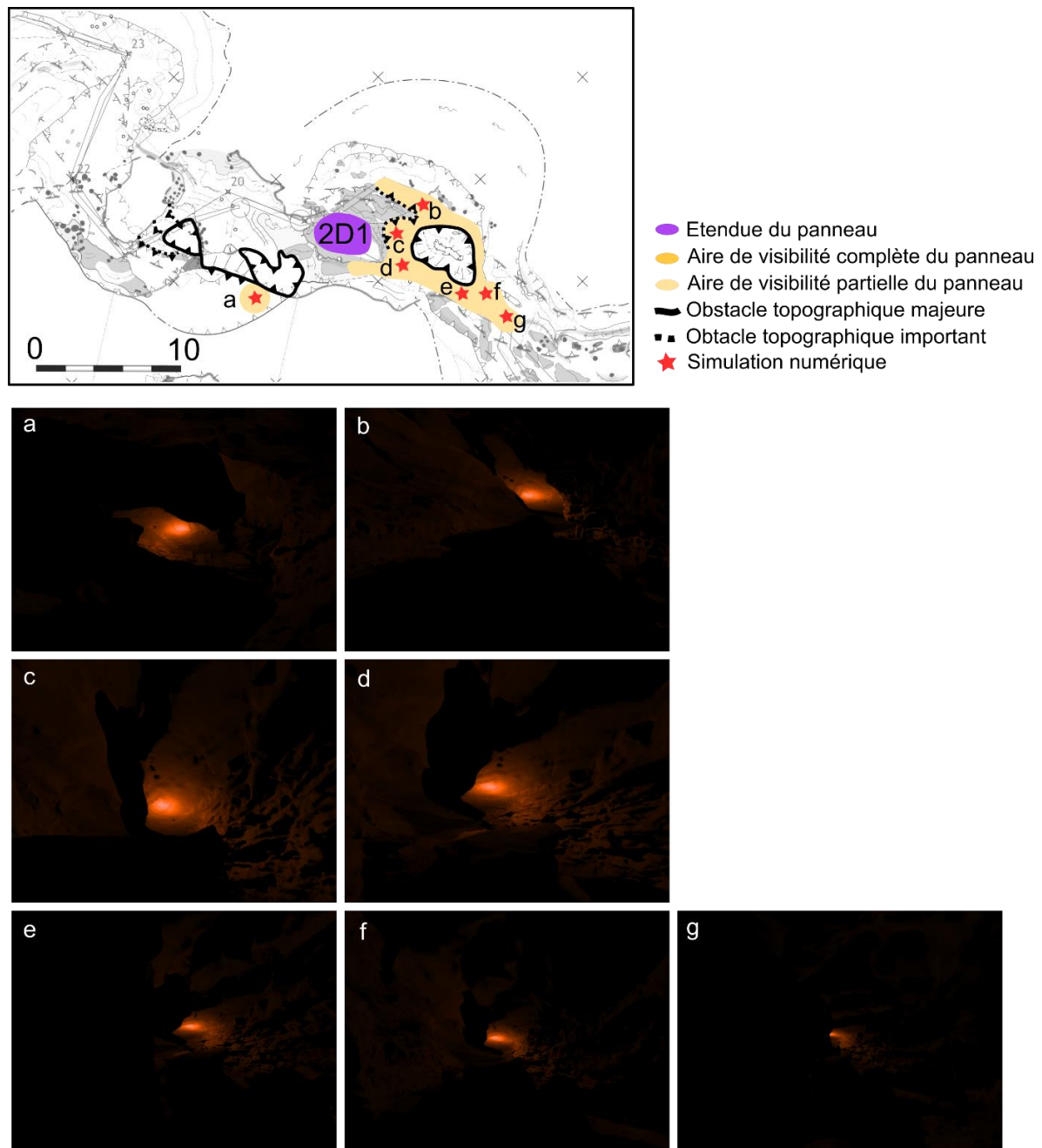


Figure 144 : Simulations numériques du champ de visibilité du Panneau de la Découverte par éclairage indirect à l’aide d’une lampe à graisse de type 1B (puissance la plus élevée des lampes à graisse). Simulations numériques réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d’illumination élémentaire et d’une saturation de 30 000.

Éclairage indirect avec trois lampes à graisse

Dans ce dernier cas de figure, nous proposons une simulation des mêmes localités éclairées à l'aide de trois lampes à graisse « puissantes » (du type 1B) situées à même le sol sous le Panneau de la Découverte. Deux d'entre elles ont été placées à gauche du panneau, dans l'hypothèse d'un graveur droitier, et la dernière a été placée à droite, afin de minimiser l'ombre potentielle produite par la présence du graveur. L'éclairage produit permet alors de visualiser l'ensemble du panneau dans toutes les situations, à l'exception de la plus lointaine (Figure 145 ; g).

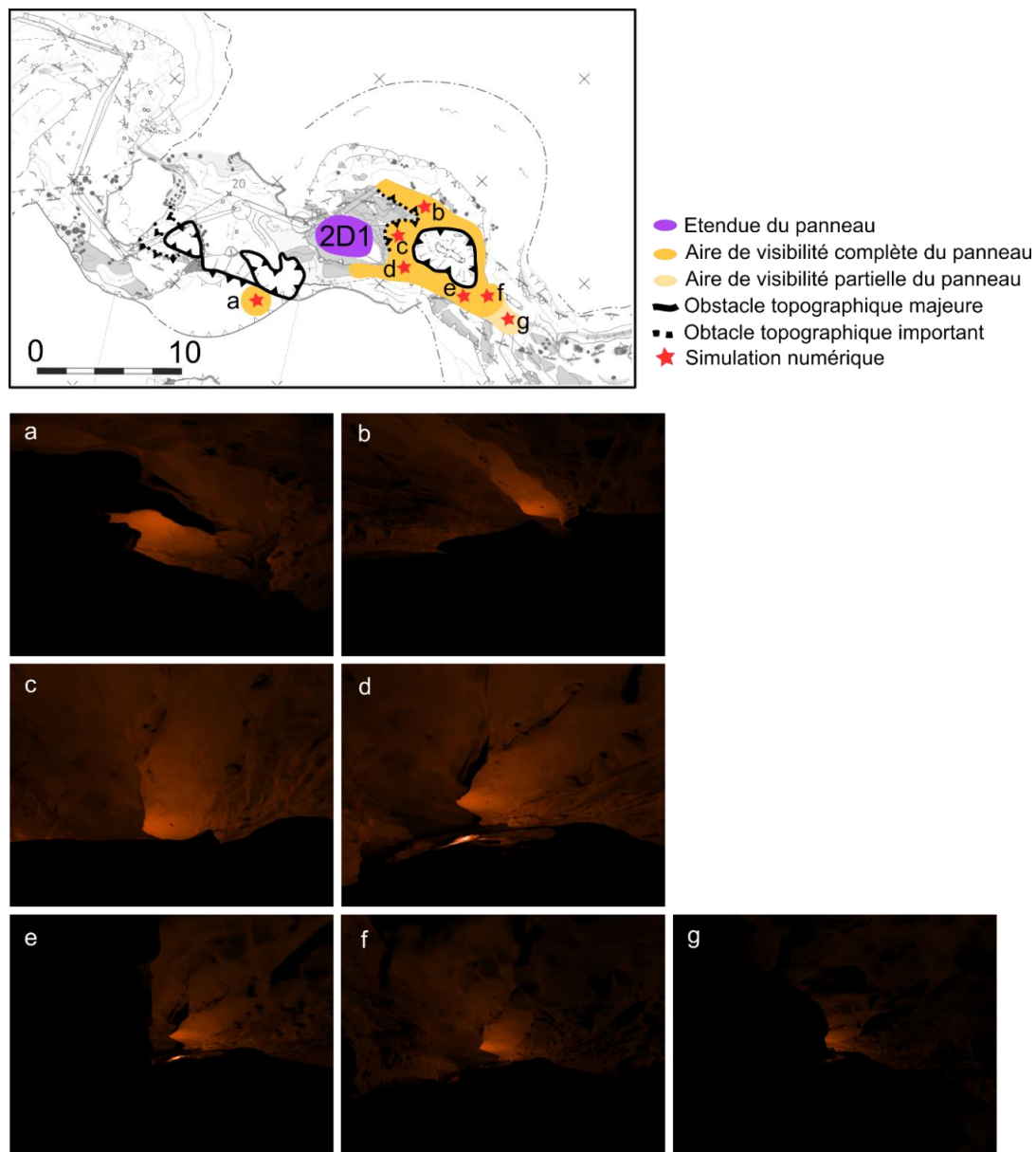


Figure 145 : Simulations numériques du champ de visibilité du Panneau de la Découverte par éclairage indirect à l'aide de trois lampes à graisse de type 1B (puissance la plus élevée des lampes à graisse) posées au sol sur le bloc sous-jacent au Panneau de la Découverte. Simulations numériques réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire et d'une saturation de 30 000.

Conclusions

Les simulations numériques précédentes montrent que le champ de visibilité varie selon un continuum depuis une visibilité très réduite dans le cas d'un éclairage à la lampe à graisse qui éclaire directement le panneau, à un champ de visibilité aussi étendu que l'actuel, dans le cas d'un éclairage indirect, avec une torche portée ou avec trois lampes posées au sol.

b) Observation du panneau

Concernant le ou les lieux d'observation du panneau, deux critères semblent particulièrement importants : la qualité de l'éclairage, et l'orientation du panneau. Dans le cas du Panneau de la découverte, toutes les figures sont orientées dans la même direction, on peut donc supposer que si elles étaient destinées à être vues, le point de vue des observateurs était important.

À cet égard, deux aires d'observation semblent se distinguer : depuis l'extrémité du méandre inférieur 5Av et juste en amont du panneau, sur la montée qui mène au bloc sous le panneau. En effet, ces deux emplacements, non seulement permettent une vue d'ensemble sur le panneau quel que soit l'éclairage, mais en plus permettent de l'observer depuis une perspective presque orthogonale, qui devrait limiter les déformations des entités gravées, bien que nous n'ayons pu vérifier ce dernier point.

L'éclairage indirect semble plus approprié à l'observation du panneau car la surface est ainsi exempte d'ombre projetée (Figure 143, Figure 144, Figure 145). On doit cependant noter qu'un éclairage strictement indirect aurait pour conséquence que la partie du groupe qui se trouve à quelques mètres du panneau se trouverait dans l'obscurité complète, en particulier dans le cas d'une présence humaine dans le méandre inférieur 5Av, qui se trouve à plusieurs mètres du panneau, sans chemin direct possible entre ces deux espaces. Il est bien sûr possible qu'un éclairage direct ait complété l'éclairage indirect afin que le groupe éloigné du panneau soit tout de même autonome. Avec un éclairage indirect, l'utilisation d'une torche ou de plusieurs lampes permettent d'éclairer l'ensemble du panneau tandis que l'utilisation d'une seule lampe ne permettrait que d'éclairer un motif gravé en particulier.

Il faut enfin noter que nous n'avons pas pu reproduire l'influence de la présence du ou des graveurs, mais si ceux-ci étaient bien droitiers, alors ils devaient se placer à droite de la source lumineuse afin de ne pas être gênés par leur propre ombre. Dans le cas d'un éclairage avec une

unique torche indirecte, il faut noter que les points d'observation situés en amont du panneau devaient être gênés par la présence de l'ombre du graveur. Dans le cas d'un éclairage réalisé par plusieurs lampes posées au sol, l'ajout d'une lampe à droite du graveur pouvait permettre de limiter la portée de l'ombre du graveur.

c) Création du panneau

Lors de la création du panneau, la présence d'un éclairage à proximité directe du panneau semble indispensable. Afin d'investiguer sur l'éclairage nécessaire pour le graveur, nous proposons une série de simulations dont l'observateur se situe légèrement en contrebas du panneau, ou directement dessous, à une cinquantaine de centimètres sous la surface gravée. Trois types d'éclairages sont proposés : une torche tenue à la main gauche, donc située à une cinquantaine de centimètres à gauche du graveur, trois lampes posées au sol dans la même configuration que précédemment, et une torche posée au sol, pour faire l'effet d'un petit foyer (voir une vidéo sur : <https://vimeo.com/374172429>). Nous ne proposons pas de simulation de lampe portée car ce type d'éclairage n'éclaire pas le sol, or la création du panneau a nécessité des déplacements sur un bloc rocheux incliné.

Résultats

On peut remarquer (Figure 146) qu'une torche portée à hauteur d'homme provoque une surexposition de la surface lorsqu'on se situe immédiatement dessous. Cela corrobore notre expérience lors de nos reproductions de torches en milieu souterrain. Cependant, ce mode d'éclairage, lorsque situé juste en contrebas amont du panneau, est celui qui permet le meilleur éclairage d'ensemble. L'éclairage par une torche posée au sol, à gauche du graveur, permet une bonne observation du panneau sur sa gauche, mais l'éclairage tend à diminuer sur la droite du panneau, au niveau de la limite du promontoire. Enfin, l'éclairage à l'aide de trois lampes à gauche posées au sol permet d'éclairer faiblement l'ensemble de la surface du panneau. Cet éclairage nous semble cependant suffisant pour réaliser les gravures.

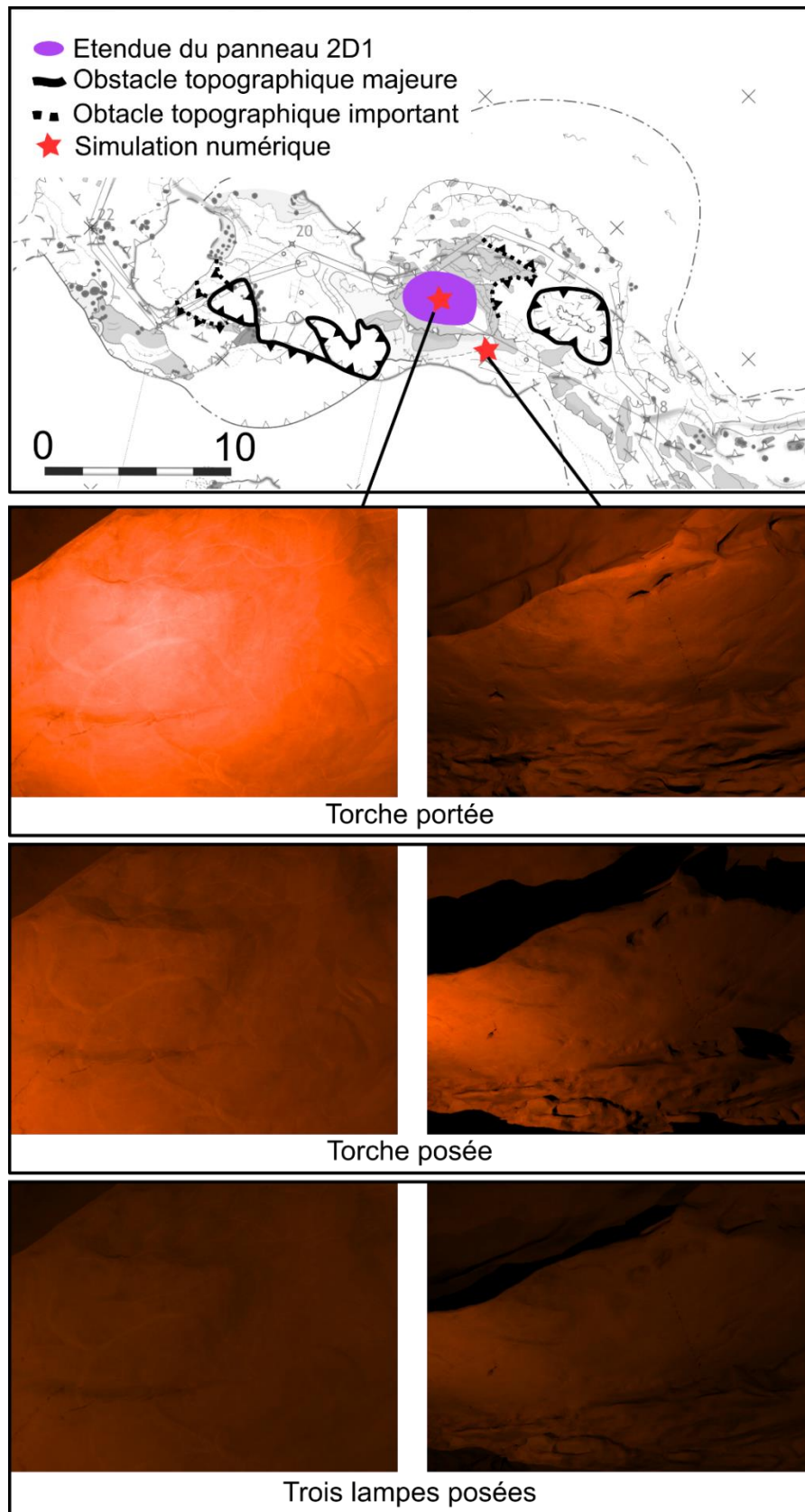


Figure 146 : Visibilité du Panneau de la Découverte par un éventuel graveur, selon trois hypothèses d'éclairage. Simulations numériques réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. Simulations d'une torche portée ou posée au sol (torche de type 3, avec une saturation de 10 000), ou de trois lampes à graisse posées au sol sous le Panneau de la Découverte (lampes de type 1B, avec une saturation de 30 000).

Discussion

La présence d'un signal magnétique de chauffe au sol du bloc, sur la gauche, soit en aval (Lévêque et Mathé, 2013), ainsi que l'absence de mouchage de torche sur la surface du panneau ou les parois à proximité sont un indice en faveur de l'utilisation d'une source lumineuse posée à même le sol. Cependant, l'absence de vestiges archéologiques nets sur cette surface rend la distinction impossible entre la présence d'une torche, d'un petit foyer, ou de lampes à graisse. Des expérimentations pourraient être envisagées afin de vérifier si ces différents dispositifs d'éclairages peuvent, ou non, fournir suffisamment de chaleur pour qu'un tel signal se mette en place. C'est par ailleurs l'éclairage posé selon cette disposition (à gauche sur le bloc) qui semble permettre au mieux d'éclairer le panneau. Cette disposition tendrait à soutenir deux hypothèses :

- La présence d'un groupe dans le méandre inférieur 5Av, c'est-à-dire sur la gauche du graveur, car l'ombre portée de ce dernier générerait la lecture des gravures d'un groupe situé sur sa droite (donc en amont du panneau).
- La présence d'individus sur la montée, en amont du panneau, qui seraient accompagnés de leur propre éclairage. Cela permettrait d'atténuer l'ombre du graveur mais ce dernier leur masquerait une partie au moins des gravures.

Réaliser des simulations numériques où la présence d'un graveur, et donc son ombre, pourrait être implémentée nous semble être une perspective intéressante pour confirmer ou infirmer ces hypothèses.

E. Propriétés acoustiques de la grotte de Cussac

Le monde souterrain est un milieu extrêmement sombre et silencieux, propice à l'éveil des sens. Ainsi, les qualités acoustiques des lieux sont particulièrement ressenties, bien que peu étudiées car souvent considérées comme secondaires au regard des vestiges graphiques. Une autre raison invoquée peut être le biais inhérent aux modifications de la morphologie des lieux. En effet, étudier l'acoustique d'une grotte ornée ne prend son sens que si la cavité a pu conserver une morphologie proche de celle que les Préhistoriques ont connu : l'effondrement de l'entrée, un dépôt sédimentaire de plusieurs centimètres, voire mètres, ou encore la pose d'éléments modernes (passerelles) peuvent par exemple biaiser une telle étude. Comme nous l'avons décrit précédemment (Sous-chapitre 3.1.B. *Cussac au Gravettien*), la grotte de Cussac a très peu évolué depuis le Gravettien, ce qui nous permet de proposer ici une étude acoustique de la cavité. Il faut tout de même noter que l'obstruction du porche, ainsi que le dépôt de spéléothèmes et l'effondrement de blocs dans le secteur de l'entrée nous ont amené à écarter ce dernier de notre étude.

Comme souvent, nos questionnements sont issus d'observations réalisées fortuitement sur le terrain. Bien que considérée comme peu impressionnante du point de vue acoustique, depuis la mise en place du PCR Cussac en 2008, les membres de l'équipe qui se sont succédé sur le terrain ont pu remarquer une singularité acoustique dans Cussac : lorsque deux groupes sont dans la grotte, le son provenant des voix de l'un d'entre eux n'est pas toujours entendu comme provenant de sa localisation. Par exemple, si une équipe est plus en aval que l'autre, les sons qu'elle produit peuvent être ressentis comme provenant de l'amont par les membres de la seconde. D'autre part, en certains lieux, les voix sont entendues à grande distance, ou au contraire semblent « coupées ». Cela est probablement dû à la présence d'un chenal de voûte qui recoupe le méandre où nous déambulons, conduisant parfois les voix au loin, ou dans des directions inattendues. C'est dans ce contexte qu'une étude de l'acoustique de la cavité a été envisagée.

Dans un premier temps, c'est une étude à la voix et à l'oreille qui a été réalisée par I. Reznikoff dans les deux premiers tiers de la Branche Aval (de l'Entrée au Grand Panneau). Par la suite, nous avons procédé à des enregistrements *in situ* de réponses impulsionnelles depuis le Grand Panneau, en aval, jusqu'au Panneau des Figures Féminines, en amont. Ces deux études ont permis de proposer une analyse acoustique globale de la cavité, mais ont été limitées par les

contraintes naturelles et conservatoires du site. Les simulations numériques acoustiques, qui constituent la dernière section de ce sous-chapitre, permettront d’outrepasser ces limites physiques et de proposer une analyse plus fine du secteur modélisé. Enfin, ces différentes méthodes pourront être confrontées : que s’apportent-elles mutuellement ? Une méthode semble-t-elle plus complète ou plus précise que les autres ?

1. Invitation de Iégor Reznikoff

Le 29 janvier 2019, Iégor Reznikoff (Professeur émérite, musicologue spécialiste du chant antique et de la musique ancienne qui a déjà eu l’occasion de travailler sur l’acoustique de quelques grottes ornées, voir p. ex. Reznikoff et Dauvois, 1988 ; Reznikoff, 2012) fut invité à parcourir la Branche Aval de la grotte de Cussac, de l’Entrée jusqu’au Grand Panneau, afin de réaliser une première analyse acoustique de la cavité, à la voix et à l’oreille.

a) Méthode

Équipé d’un diapason, notre invité a émis des sons graves, allant environ du Ré 88 Hz au La 220 Hz, et au Do 270 Hz pour les effets d’écho, avec une intensité d’environ 90 dB. Les sons ont été régulièrement produits au fil du cheminement dans la cavité, toujours selon un strict respect du parcours balisé, ce qui explique que seuls des effets acoustiques d’ensemble ont été réalisés. Ainsi, l’influence des éventuels laminoirs ou alcôves n’a pu être que très ponctuellement examinée. D’autre part, nous n’étions qu’une seule équipe lors de cette incursion et n’avons donc pas pu investiguer l’influence du chenal de voûte.

b) Résultats

Les résultats et conclusions de cette première étude menée par I. Reznikoff ont été relayés dans le rapport de terrain annuel du PCR Cussac (Reznikoff, 2019) et sont en projet de publication, mais nous souhaitons ici en rapporter les grandes lignes afin de pouvoir les comparer avec les résultats de nos mesures et/ou simulations.

Si de manière générale la grotte n’est pas très réverbérante, des variations de résonance ont pu être notées (Figure 147). Celles-ci nécessitant une grande finesse de perception, elles ont été entièrement perçues par I. Reznikoff.

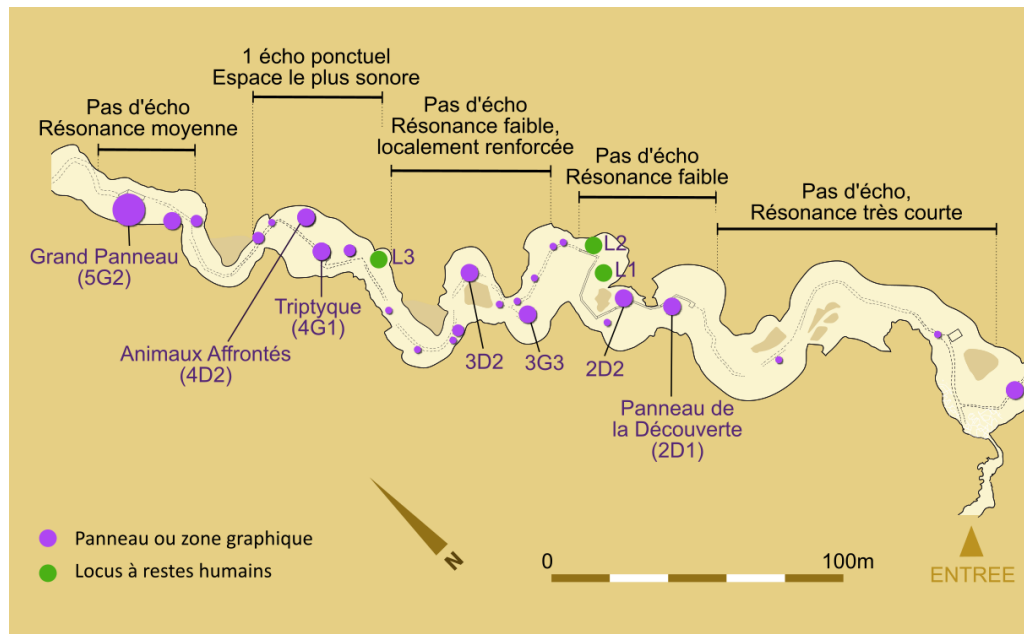


Figure 147 : Sectorisation de la Branche Aval en fonction des caractéristiques acoustiques constatées par I. Reznikoff. © Dao F. Lacrampe-Cuyaubère (d’apr. relevés terrain H. Camus & coll./Protée et Durif-Delluc-Massoulier/Spéleo-club de Périgueux), PCR Cussac/Mc.

Entre l’entrée de la cavité et l’entrée de la salle du Panneau de la Découverte (2D1), aucun effet acoustique d’ensemble n’a pu être repéré, il n’y a pas d’écho et les sons sont rapidement étouffés. La fréquence de résonance se précise progressivement en Fa (environ 88 Hz) et, à l’approche de l’espace intégrant le Panneau de la Découverte, semble signaler la présence d’un secteur plus large en aval.

Dans l’espace élargi qui va du bas du Panneau de la Découverte en aval jusqu’au Locus 2 en amont, on n’observe toujours ni écho ni effet sonore remarquable, mais la résonance, toujours en Fa, est meilleure que précédemment. Dans cet espace, on peut surtout poser l’hypothèse de la présence d’une meilleure résonance au niveau du méandre inférieur 5Av, en contrebas des panneaux de la Découverte (2D1) et du Pont d’argile (2D2). I. Reznikoff a par ailleurs proposé l’hypothèse que des chants ou d’autres effets sonores auraient pu y avoir lieu.

Dans le secteur du *By-pass*, en aval du Locus 2, la résonance est toujours assez faible, et près du Locus 2, le son semble se développer en direction de l'amont, vers le Panneau de la Découverte, démontrant la présence d'un secteur plus large. La résonance semble être légèrement amplifiée sous le Panneau du Bouquetin (3G3), ce qui pourrait être lié au redressement de la voûte. Dans la suite de la galerie, la résonance semble également se renforcer au niveau du Panneau du Réticulé (3D2), cela étant peut-être lié à la présence d'un laminoir.

La résonance s'amplifie à l'approche du Locus 3 (environ en Ré 73 Hz), où l'on peut entendre l'un des rares échos de la cavité. La galerie située entre le Locus 3 et le Panneau des Animaux Affrontés (4D2) est la plus résonante de tous les espaces analysés lors de cette étude. Un second écho peut y être produit en amont du Panneau du Triptyque (4G1). Cette galerie est directement reliée à la suivante, où se trouve le Grand Panneau (5G2), par le chenal de voûte. Nous avons ainsi pu vérifier que les sons peuvent être portés d'un espace à l'autre.

En entrant dans le secteur du Grand Panneau, on remarque que la résonance est moindre que dans la section précédente, tout en étant meilleure que celle du début de la Branche Aval. La résonance y est toujours en Ré et la présence de laminoirs en bas du Grand Panneau permet d'amplifier localement les sons.

c) Conclusions

Cette première étude sur site de l'acoustique de Cussac confirme l'impression d'une grotte peu résonante (la résonance n'excède quasiment jamais 1 s, selon I. Reznikoff). Cela peut être dû à la porosité importante du calcaire, mais aussi à la morphologie de la cavité, souvent formée d'un couloir. Cependant, quatre grands secteurs semblent se différencier. Le premier, de l'entrée jusqu'au Panneau de la Découverte (2D1), est très peu réverbérant, le second, du Panneau de la Découverte jusqu'au Locus 3 exclu, propose une résonance faible, en Fa, ponctuée de quelques secteurs qui se distinguent par une meilleure résonance, souvent liée à la présence d'un laminoir ou du chenal de voûte par exemple. Le second, du Locus 3 jusqu'au Panneau des Animaux Affrontés (4D2) inclus est le secteur le plus réverbérant, et le seul à présenter des lieux permettant la production d'un écho. Enfin, le secteur du Grand Panneau semble disposer d'une réverbérance intermédiaire, sans écho. On peut également noter que le parcours est ponctué d'alcôves, de niches et de laminoirs qui pourraient avoir des effets sonores mais dont il est impossible de s'approcher pour le vérifier. Enfin, le méandre inférieur 5Av,

sous les panneaux de la Découverte (2D1) et du Pont d’Argile (2D2), pourrait disposer d’une meilleure résonance, mais là encore, il est impossible d’y accéder sur place.

2. Mesures sur le terrain

Nous avons profité de notre venue sur le site avec du matériel d’enregistrement dédié à la production de réponses impulsionnelles dans les secteurs modélisés (voir Sous-chapitre 2.2.D. *Mesures des propriétés acoustiques des matériaux*) pour étendre ces mesures à d’autres secteurs de la grotte, non modélisés, afin d’en proposer une étude acoustique. Nous avons en particulier choisi d’analyser le temps de réverbération, le C80 et le D50.

a) Méthode

Pour réaliser ces mesures, nous n’avons pu strictement suivre les recommandations internationales ISO 3382 (2009) à cause des contraintes induites par le milieu souterrain. Par exemple, le choix de la localisation de l’émetteur et du récepteur a été principalement motivé par la présence d’un espace permettant de poser nos instruments de façon stable et suffisamment espacée (environ 2 m), et non par la pertinence archéologique (comme la proximité d’un panneau), ni par la norme ISO 3382 (qui recommande de placer le couple émetteur-récepteur au centre de l’espace analysé). Il faut également garder à l’esprit que nous avons sélectionné un dispositif d’enregistrement peu puissant, en particulier dans les basses fréquences, puisque nous étions contraints d’emmener sous terre un matériel léger et disposant d’une autonomie de plusieurs heures. Nous avons donc opté pour une configuration « basique » (Martellotta *et al.*, 2009) permettant de mesurer le TR (Temps de Réverbération), le C80 (indice de Clarté du son) et le D50 (indice de Définition du son).

Le matériel et les modalités précises de la mise en place des mesures sont décrits dans la Section 2.2.D.2. *Mesures des Réponses Impulsionnelles (RI) et des Temps de Réverbération (TR)*, ici nous rappellerons uniquement la localisation des mesures qui ont été réalisées sur 24 secteurs, du Grand Panneau en aval jusqu’au Panneau des Figures Féminines en amont (Figure 148).

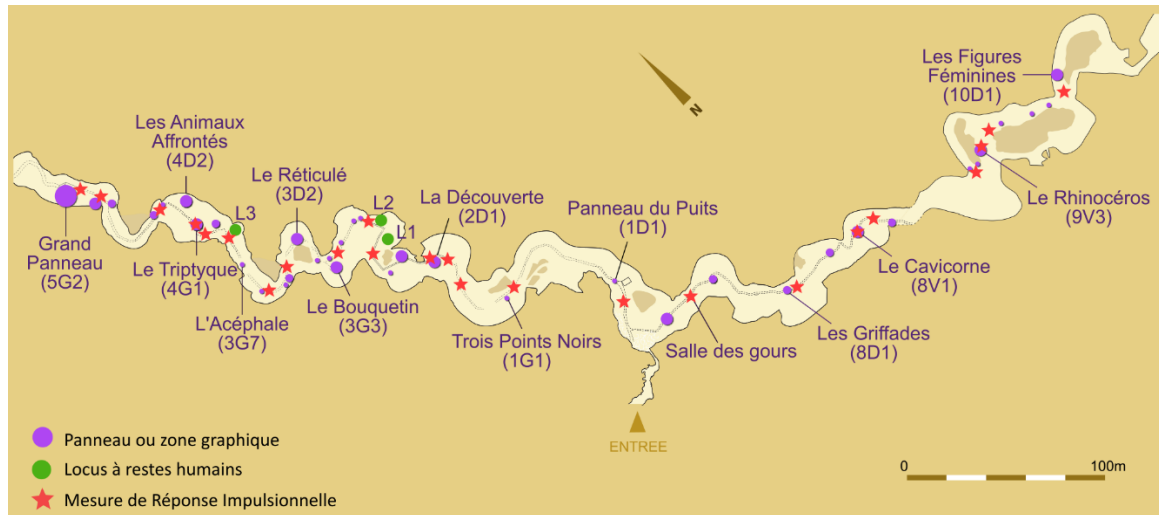


Figure 148 : Localisation des mesures de réponses impulsionnelles, © Dao F. Lacrampe-Cuyaubère (d'apr. relevés terrain H. Camus & coll./Protée et Durif-Delluc-Massoulier/Spéléo-club de Périgueux), PCR Cussac/Mc.

b) Mesures du Temps de Réverbération

Résultats

Le TR est le premier critère que nous proposons ici à l'analyse. Nous avons sélectionné le T_{opt} de REW , qui est un temps de réverbération dit « optimal » car calculé pour correspondre au mieux à la courbe de décroissance du son. Nos mesures étant nombreuses (quatre à six balayages de fréquences par mesure, sur 24 sites), nous avons réalisé des boîtes à moustache permettant de comparer les sites entre eux (Figure 149). Suivant les normes ISO 3382 (2009), les médianes et quartiles ont été obtenus à partir des mesures des bandes d'octave 500 et 1000 Hz (Figure 149).

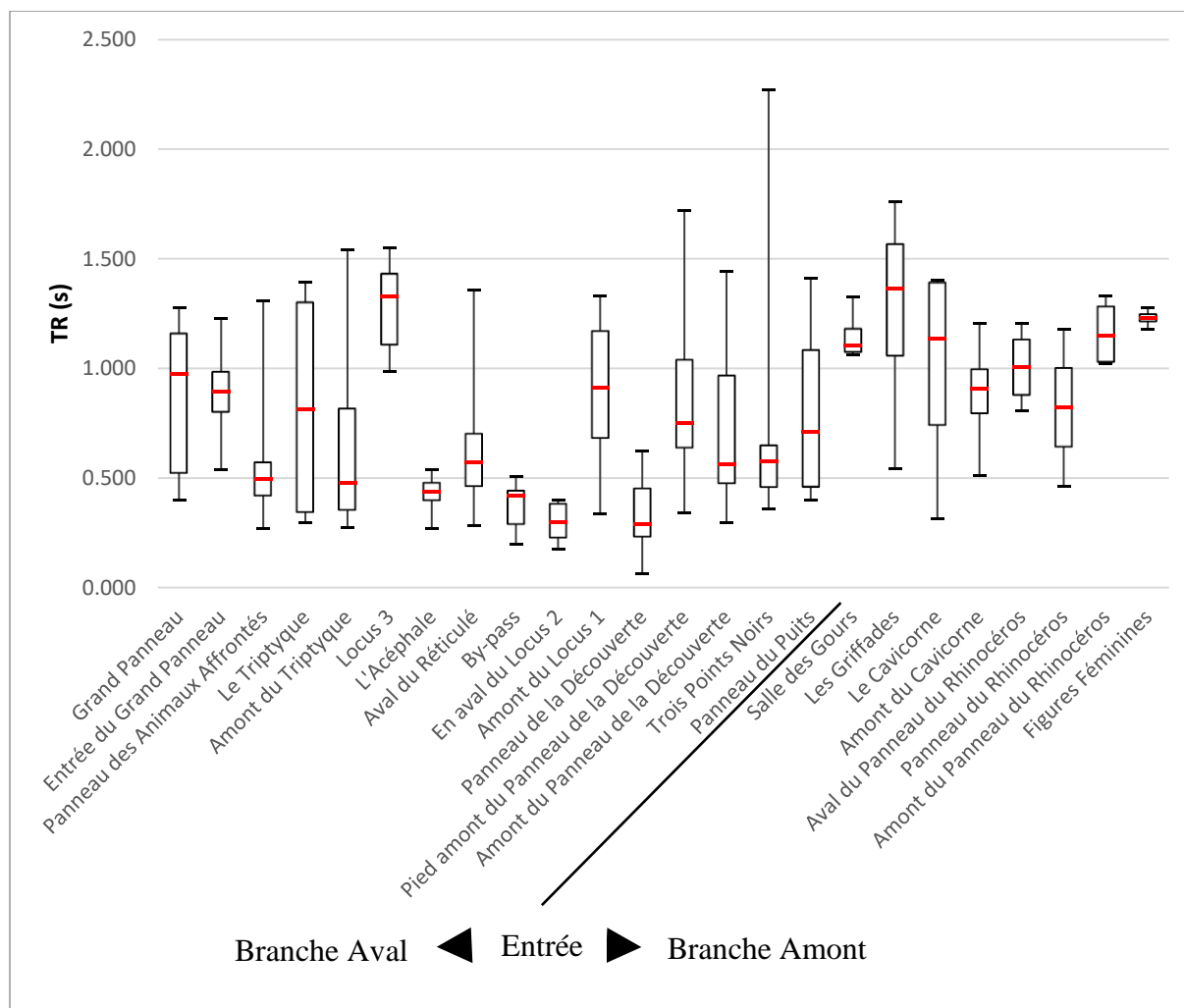


Figure 149 : TR optimal de différents secteurs de Cussac.

Dans une logique de progression de l’Entrée vers l’aval, la Figure 149 nous permet de concevoir que les résonances enregistrées entre l’entrée de la grotte et le contrebas amont du Panneau de la Découverte sont assez faibles, en moyenne entre 0,5 et 1 s. Ensuite, entre le Panneau de la Découverte et le Panneau de l’Animal Acéphale inclus, les résonances diminuent, avec une moyenne fréquemment située en-deçà de 0,5 s. On peut cependant noter une exception avec la mesure prise en amont du Locus 1, dont la résonance atteint presque les 1 s. On observe ensuite une assez forte réverbération au niveau du Locus 3 (entre 1 et 1,5 s de réverbération) puis une diminution dans l’espace qui s’ouvre jusqu’au Panneau des Animaux Affrontés, où l’on retrouve une réverbération semblable à celle du premier secteur en aval, avant d’augmenter dans l’espace où se situe le Grand Panneau.

Du côté de la Branche Amont, on observe une réverbération généralement plus importante qu'en Branche Aval (temps de réverbération du Locus 3 exclu), avec une moyenne fréquemment supérieure à 1 s.

Comparaison entre la réverbération de Cussac et des espaces modernes

Ces premiers résultats peuvent déjà être comparés à ceux d'espaces modernes connus (Tableau 29). Ainsi, les lieux les moins réverbérants de Cussac (entre le Panneau de la Découverte et le Panneau de l'Animal Acéphale) ont un TR assez comparable à celui d'une pièce conçue pour être silencieuse, comme une chambre. Mais certaines localisations se distinguent par un TR plus important, qui se rapproche plutôt de celui des théâtres modernes, entre 1 et 1,5 s.

Lieu	Chambre	Salle de cours	Théâtre	Salle de concert	Cathédrale
TR recommandé	0,3 – 0,6 s	0,5 – 1,1 s	1,0 – 1,5 s	1,2 – 2,5 s	2 – 10 s

Tableau 29 : Temps de réverbération courants de quelques espaces modernes.

c) Mesures du D50

La Définition, ou D50, est un critère acoustique extrait de la RI régulièrement utilisé pour décrire l'intelligibilité des sons dans les espaces où des performances sonores ont lieu (théâtres, opéras, lieux de culte, etc.). Il s'agit du pourcentage de l'énergie sonore reçu dans les 50 ms qui suivent l'envoi du signal par rapport à l'énergie sonore totale. Nous avons ici choisi de moyenniser les mesures enregistrées à 500 Hz, 1 kHz et 2 kHz, puisque ce sont les fréquences utilisées pour l'intelligibilité (Fazenda *et al.*, 2017). Ce critère est utilisé dans le cadre de l'analyse de l'intelligibilité de la parole : plus le D50 est élevé, plus l'intelligibilité est optimale, un D50 d'au moins 50 % étant recommandé pour disposer d'une bonne intelligibilité.

Résultats

À Cussac, sur tous les secteurs analysés (Figure 150), l'intelligibilité moyenne est excellente, et même quasiment parfaite dans certains secteurs (on peut par exemple citer le Panneau de la Découverte, ou l'aval du Locus 2). Cependant, quelques secteurs ont une intelligibilité moindre

(mais tout de même suffisante) : le Locus 3, le secteur des Griffades, l’espace situé en aval du Panneau des Rhinocéros, et le Panneau des Figures Féminines.

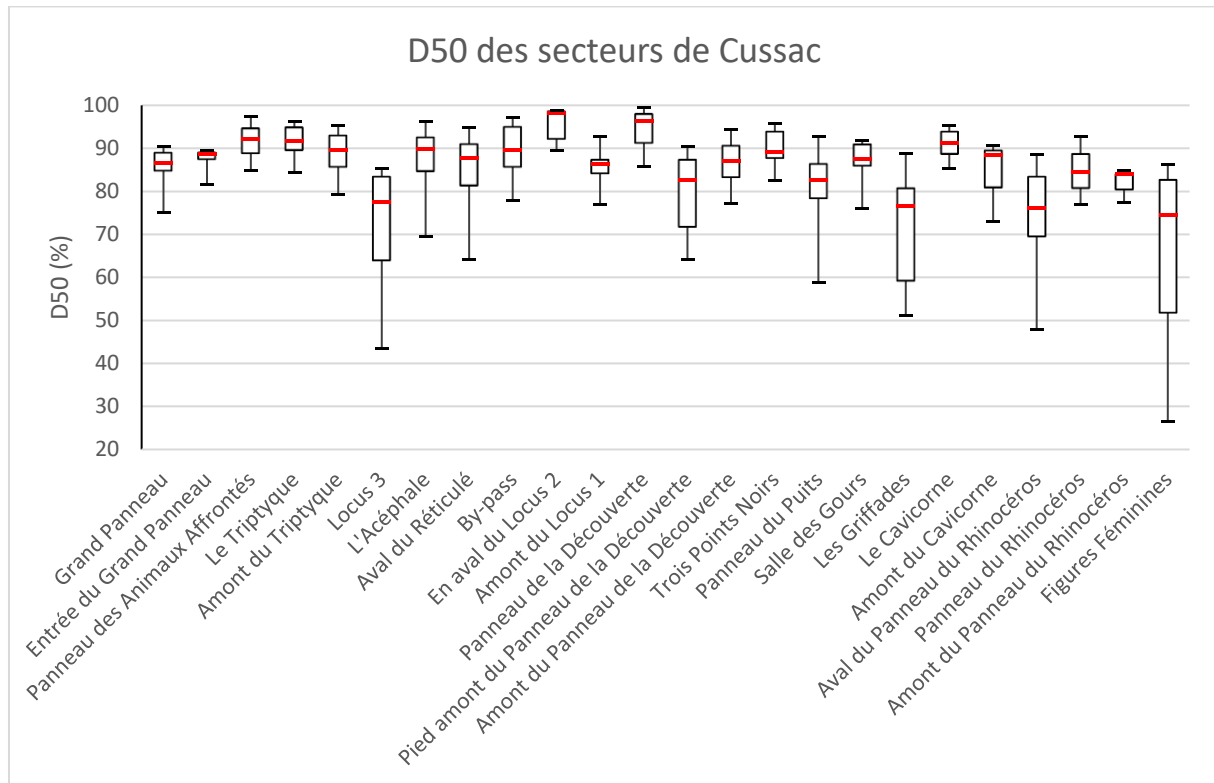


Figure 150 : D50 des différents secteurs de Cussac.

d) Mesures du C80

Le C80 et le C50 (Clarté) sont également des critères acoustiques extraits de la réponse impulsionnelle (RI). Comme pour le D50, nous avons moyenné les mesures enregistrées à 500 Hz, 1 kHz et 2 kHz (Fazenda *et al.*, 2017). La clarté, exprimée en dB, est le rapport entre la quantité d’énergie sonore contenue dans les premières millisecondes de la RI (50 ou 80 ms) et les suivantes (jusqu’à 2 s après l’émission du son). Le seuil de 80 ms est surtout utilisé dans le cadre musical (p. ex. salle de concert, opéra) tandis que le C50 est surtout utilisé dans les lieux adaptés à la discussion (salle de conférence et théâtres par exemple). Le C50 est directement corrélé au D50, déjà analysé, c’est pourquoi il ne sera pas pris en compte dans la suite de l’étude.

Un C80 positif est associé à la production d'un son clair, mais une grande valeur positive de C80 signifie que la salle est très peu réverbérante, le son est alors rapidement étouffé. À l'inverse, une valeur négative de la réverbération permet de donner de l'ampleur aux sons, au risque, s'il est trop important, de rendre l'ambiance confuse, comme dans une cathédrale par exemple. On estime pour nos bâtiments modernes que le C80 doit être compris en -6 et +6 dB, avec un idéal situé autour de 0 dB pour la musique symphonique, ou entre +1 et +4 dB pour l'opéra, par exemple.

Résultats

À Cussac, le C80 (Figure 151) se situe en moyenne autour de 10 dB, avec des valeurs qui, dans certains secteurs, peuvent monter à plus de 20 dB et qui ne descendent que rarement sous les 5 dB.

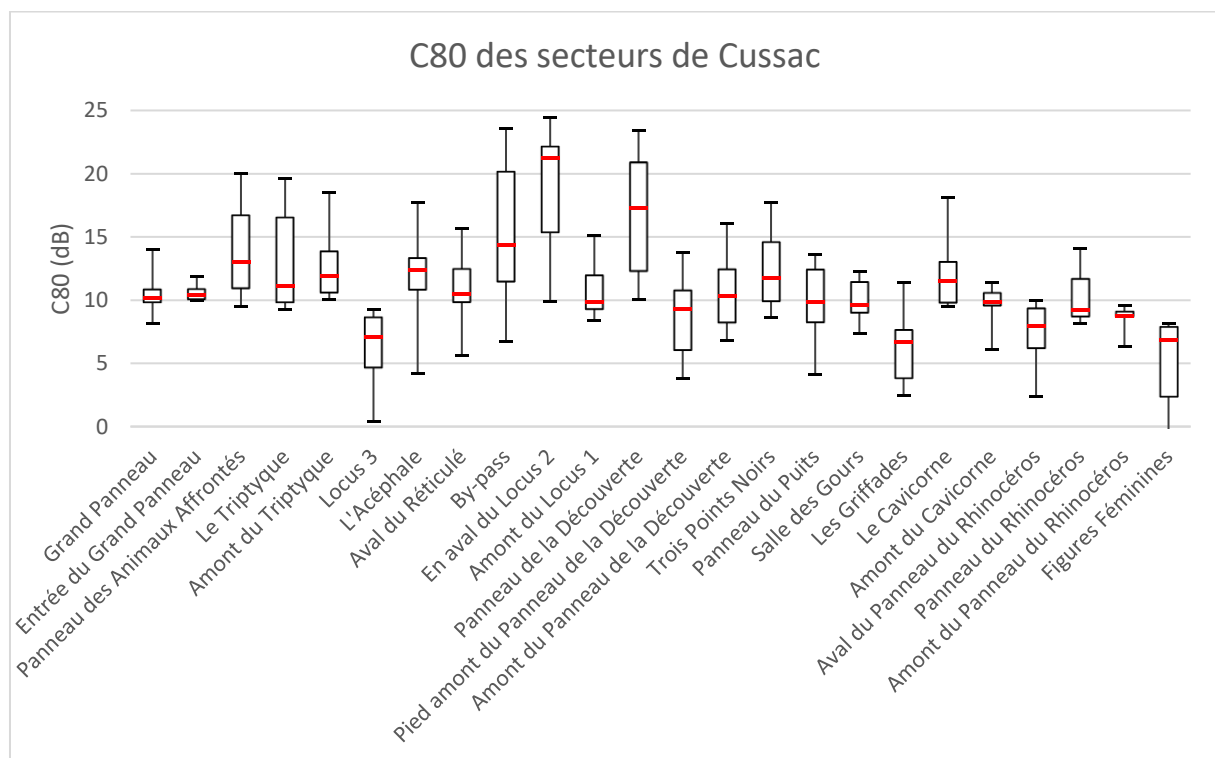


Figure 151 : C80 des différents secteurs de Cussac.

Discussion

Ces valeurs sont concordantes avec celles du TR : la grotte n'est pas très réverbérante et semble peu adaptée à la production d'effets musicaux. Cela est particulièrement le cas aux niveaux du Panneau de la Découverte, de l'aval du Locus 2, du secteur appelé *By-pass*, et tendrait à l'être moins près du Locus 3 ainsi que dans la Branche Amont, en particulier au niveau du secteur des Griffades, en aval du Panneau du Rhinocéros et près du Panneau des Figures Féminines, où le C80 est respectivement situé entre 0,4 et 9,3 dB, 2,4 et 11,4 dB, 2,4 et 9,9 dB, et -1,3 et 8,2 dB, ce qui en fait les espaces les plus propices au chant et à la musique de la cavité **selon des critères modernes**.

e) Conclusions

Selon nos mesures, la grotte semble, de façon générale, assez peu réverbérante (la moyenne des TR est comprise entre 0,3 et 1,3 s), et plus appropriée à la parole qu'à la musique. On peut toutefois distinguer des secteurs très peu réverbérants (TR moyen inférieur à 0,5 s), tous situés en Branche Aval (il s'agit des mesures réalisées sous le Panneau de la Découverte, en aval du Locus 2, dans le *By-pass* et près du Panneau de l'Animal Acéphale), des secteurs disposants de TR moyens intermédiaires, entre 0,5 et 1 s, situés en Branche Aval comme en Branche Amont, et des secteurs au TR moyen plus long, supérieur à 1 s. Il s'agit du secteur du Locus 3, seul de cette catégorie en Branche Aval, et des secteurs de la Salle des Gours (dont la morphologie a cependant beaucoup changé depuis le Gravettien), de la zone graphique des Griffades, du Panneau du Cavicorne, de l'aval et de l'amont du Panneau du Rhinocéros, et du Panneau des Figures Féminines en Branche Amont.

L'analyse du C80, constitué essentiellement de mesures élevées, peu propices aux effets musicaux, permet tout de même de distinguer quatre secteurs qui entrent dans la variabilité moderne des lieux propices à la musique : le Locus 3, la zone graphique des Griffades, l'aval du Panneau du Rhinocéros, et le Panneau des Figures Féminines.

L'examen du D50, quant à lui, semble démontrer une bonne, voire excellente, intelligibilité de la parole dans tous les secteurs de la cavité. Seuls les lieux qui semblent plus propices aux effets musicaux disposent d'un D50 moindre, mais leur valeur moyenne reste tout de même supérieure au seuil de 50 %.

Ces résultats nous permettent également de les confronter à l'analyse sensorielle réalisée par I. Reznikoff dans la Branche Aval, de l'entrée au Grand Panneau.

En premier lieu, nous retrouvons les mêmes lignes principales, à savoir que de l'entrée jusqu'au Locus 3, la grotte est peu réverbérante, avec des variations très ponctuelles liées à la morphologie du karst, que le Locus 3 est le point le plus réverbérant de la Branche Aval jusqu'ici testé, puis que le secteur suivant, jusqu'au Grand Panneau, dispose d'une meilleure résonance que le secteur précédent.

Quelques points de divergences émergent cependant, en particulier concernant l'espace comprenant le Grand Panneau, qui semble plus résonant, d'après nos mesures, que le secteur des Animaux Affrontés, contrairement à ce qu'a pu ressentir I. Reznikoff. D'autre part, nous n'observons pas que le secteur du Panneau de la Découverte soit plus résonant que l'entrée de la Branche Aval, là aussi à la différence des propositions de I. Reznikoff. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer les quelques nuances, voire différences, que nous observons :

- Nous n'avons pas testé les exacts mêmes lieux, et peut-être qu'une petite différence de positionnement peut avoir une incidence sur nos conclusions.
- Les fréquences émises, et donc analysées, ne sont pas strictement les mêmes puisque I. Reznikoff a essentiellement produit des sons graves tandis que nos instruments ont produit un balayage de fréquences de 0 à 24 000 Hz. Cependant nos résultats sont très bruités dans les basses fréquences et nous avons essentiellement analysé les bandes d'octaves de 500 Hz, 1000 Hz et 2000 Hz
- La localisation de nos capteurs était contrainte, ces derniers ne pouvant être positionnés que là où le sol est plat et stable sur plusieurs mètres, tandis qu'un homme, ici I. Reznikoff, a une plus grande mobilité (notre invité a par exemple pu produire des sons dans des niches, ou se tourner vers des espaces plus larges, ce qui amplifiait le son).

La concordance des grandes lignes nous permet d'affirmer que ces deux méthodes produisent des résultats fiables, ces deux approches semblant finalement assez complémentaires : le matériel de mesure permet une analyse plus fine de l'acoustique des lieux, notamment par l'apport du TR, du C80 et du D50, mais est limité par la localisation des capteurs, qui est dictée par les aspérités du terrain et ne permet de produire que des résultats ponctuels, contrairement à l'analyse sensorielle qui permet d'obtenir un continuum d'observations.

Enfin, nous souhaitons rappeler que malgré la cohérence de nos résultats entre eux, ce qui nous rassure quant à leur pertinence, il faut tout de même les prendre avec précaution, car nous n’avons pas toujours pu suivre les recommandations ISO 3382, que ce soit en termes de puissance du matériel ou de son arrangement dans l’espace lors des mesures.

3. Simulations

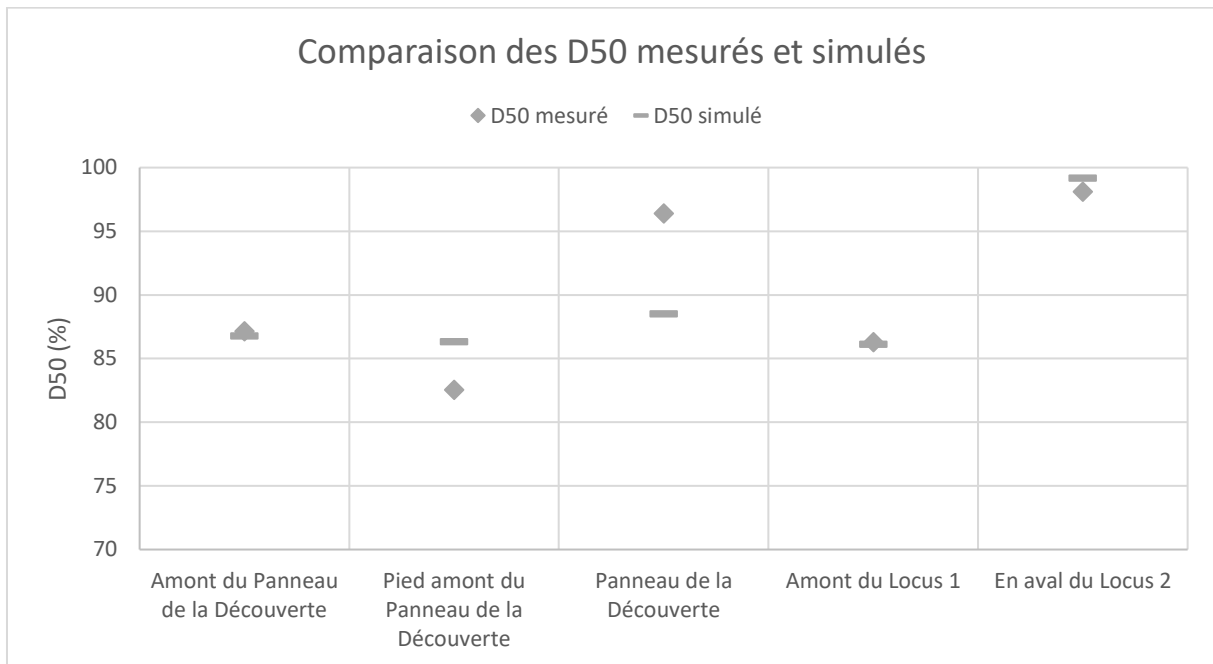
Suite aux mesures de terrain, et afin de les compléter, nous avons mis en place des simulations permettant d’obtenir les TR, C80 et D50 de secteurs non accessibles de la cavité.

a) Comparaison entre C80 et D50 mesurés et simulés

La première étape de ce travail fut de réaliser des simulations numériques là où ont été enregistrées les mesures sur le terrain, soit en amont du Panneau de la Découverte, au pied amont du Panneau de la Découverte, sous le Panneau de la Découverte, en amont du Locus 1 et en aval du Locus 2. Cela nous a permis de comparer les indices de D50 et C80 obtenus par les simulations avec ceux mesurés *in situ*, l’objectif étant de vérifier la cohérence de nos simulations. Nous n’avons pas, ici, calculé le TR car cela a déjà été fait pour calibrer le logiciel (voir Sous-chapitre 2.2.E. *Calibration du logiciel*).

Comparaison entre D50 mesuré et simulé

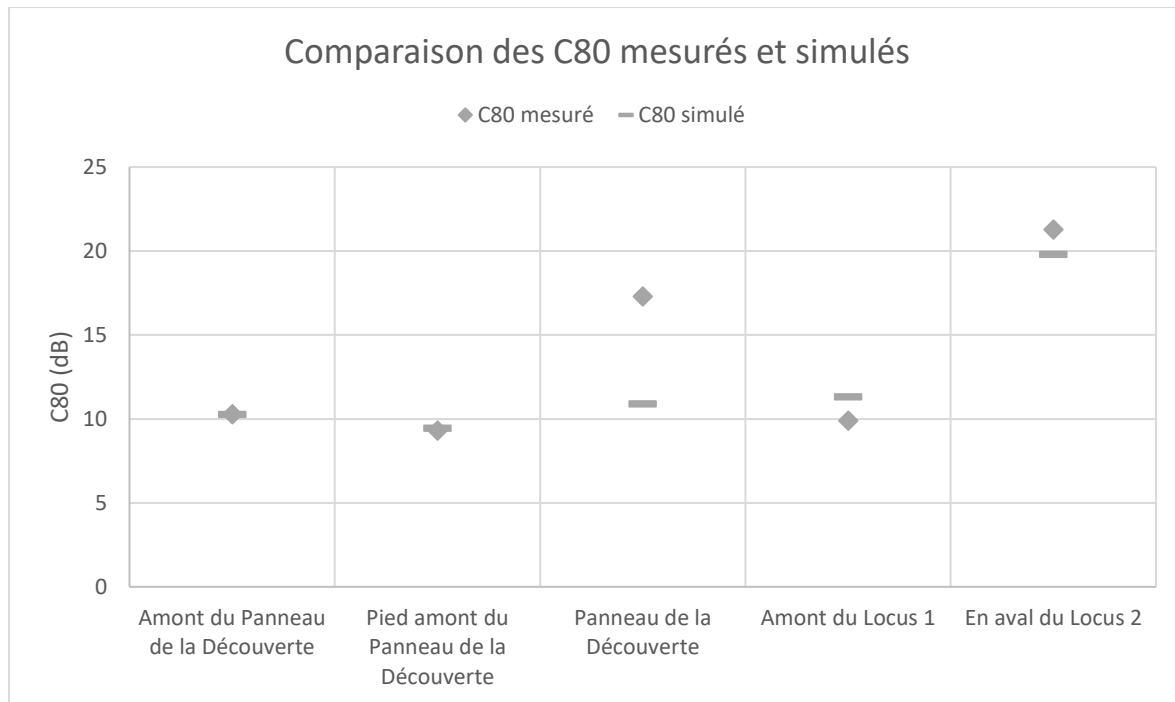
Le calcul par *Icare* du D50 et sa comparaison, en fonction des lieux de simulations, avec les mesures de terrain du D50 permet de remarquer que selon les localités, les résultats sont plus ou moins variables (Graphique 37). Ainsi, les D50 calculés en amont du Panneau de la Découverte, en amont du Locus 1 et en aval du Locus 2 sont très proches des D50 mesurés dans ces mêmes localités, avec une variation égale ou inférieure à 1 %. L’écart est plus important au pied amont du Panneau de la Découverte et sous le Panneau de la Découverte (environ 8 % de variation dans ce dernier cas). Cependant, ces différences restent suffisamment faibles pour ne pas modifier l’interprétation auditive de ces secteurs, à savoir que l’intelligibilité y est excellente.



Graphique 37 : Comparaison de la médiane des D50 obtenus par la mesure de réponses impulsionnelles sur le terrain avec celle des D50 obtenus par les simulations numériques réalisées avec Icare.

Comparaison entre C80 mesuré et simulé

La comparaison entre les C80 issus des mesures réalisées sur le terrain et des calculs du logiciel *Icare* permet de remarquer que la seule valeur dont la variation est importante est celle du Panneau de la Découverte (Graphique 38), bien que l'interprétation de ces résultats n'en est pas modifiée : dans ces secteurs, la grotte n'est pas très réverbérante et semble peu adaptée à la production d'effets musicaux, selon des critères modernes.



Graphique 38 : Comparaison de la médiane des C80 obtenus par la mesure de réponses impulsionnelles sur le terrain avec celle des D50 obtenus par les simulations numériques réalisées avec Icare.

Discussion

Les résultats des simulations sont dans l’ensemble cohérents avec les mesures de terrain, excepté au niveau du Panneau de la Découverte où les simulations proposent un D80 et un C50 inférieur aux mesures. Cela est peut-être dû à la configuration des lieux, puisqu’il s’agit d’un espace où la voûte est basse (moins d’un mètre de hauteur). Cela a pu biaiser nos mesures de terrain ou les simulations numériques. Dans les simulations qui vont suivre, nous aurons plus de liberté pour placer nos sources et récepteurs virtuels et il sera alors possible d’espacer les parois et la mesure virtuelle d’au moins un mètre.

b) Calculs des TR, D50 et C80 dans le modèle 3D

Méthode

Nous avons sélectionné quatre secteurs localisés entre la salle du Panneau de la Découverte et le Locus 2, inaccessibles selon le cheminement moderne et qui peuvent être considérés comme des points clés de la topographie des lieux : sous les gravures du Panneau de la Découverte, à l'extrémité du méandre inférieur 5Av , à proximité immédiate du Locus 1 et entre les locus 1 et 2 (Figure 152) afin d'y réaliser des simulations permettant d'obtenir le TR, le D50 et le C80. Les émetteurs et récepteurs virtuels ont été placés à 1,70 m de hauteur, espacés l'un de l'autre d'environ 2 m.

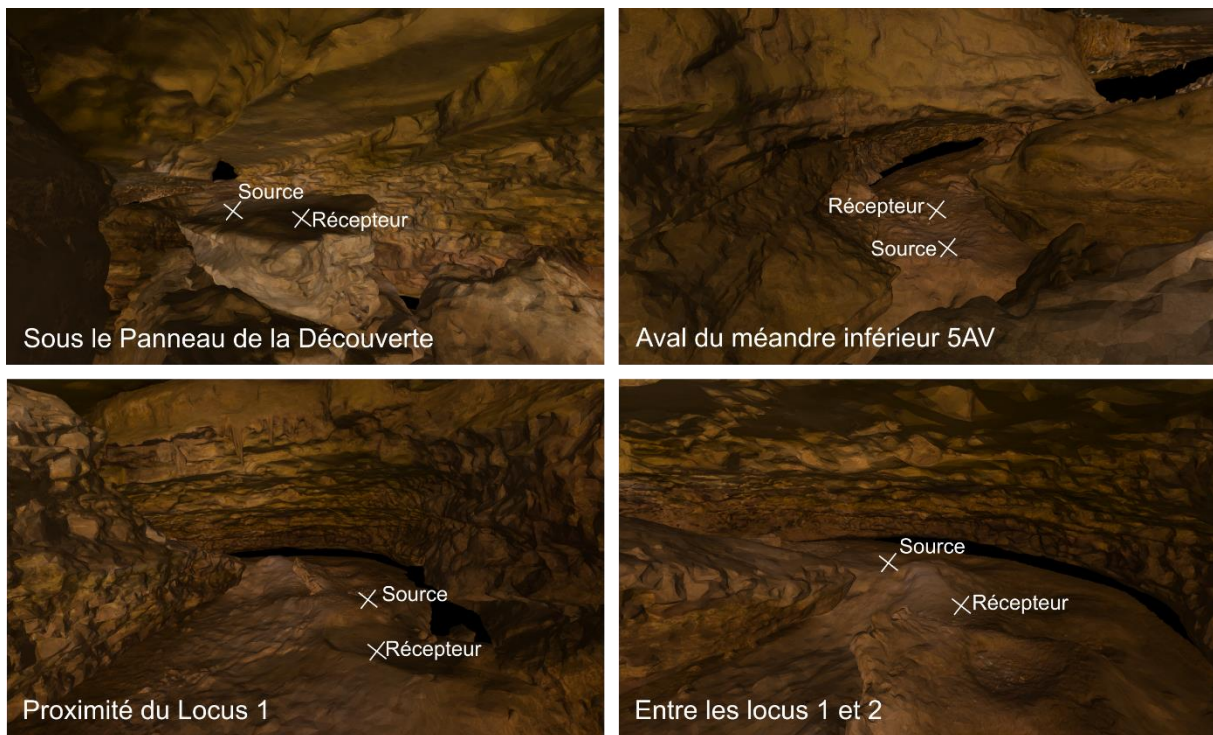


Figure 152 : Localisation des sources et récepteurs virtuels des quatre simulations.

Temps de Réverbération (TR) - Résultats

Le logiciel *Icare* propose plusieurs TR, dont un TR « optimal », qui propose la meilleure corrélation entre la pente théorique et la pente simulée, c’est pourquoi nous avons sélectionné ce TR dans les observations qui vont suivre. Les simulations ont été réalisées dix fois, ce qui permet de proposer des boîtes à moustache afin de comparer les simulations entre elles et avec les mesures *in situ*. Comme précédemment, les graphiques ont été réalisés en suivant les normes ISO 3382 (2009), les médianes et quartiles ont donc été calculées à partir des bandes d’octave 500 et 1000 Hz (Figure 153).

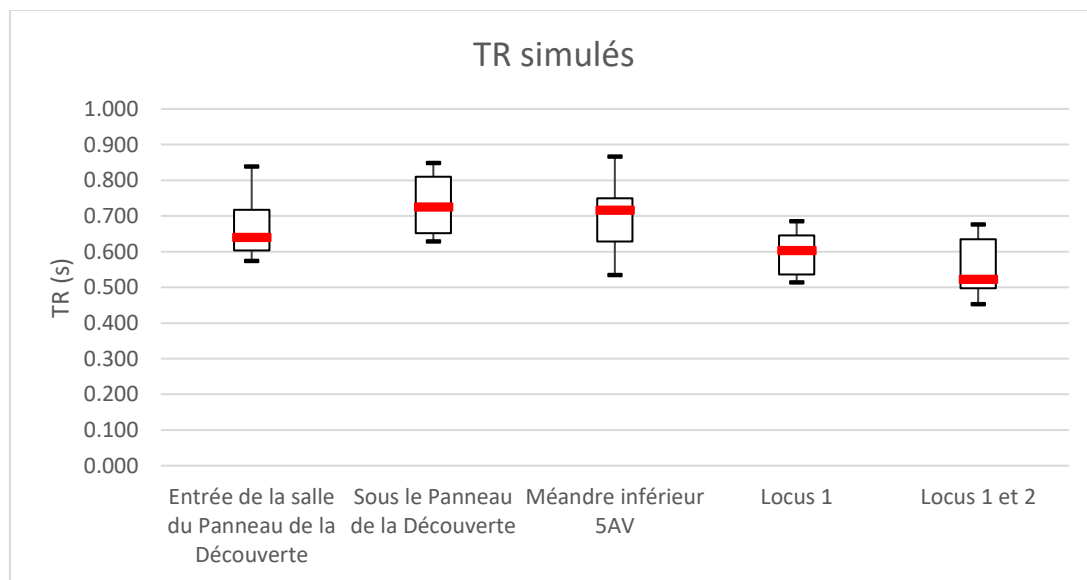


Figure 153 : TR optimaux simulés pour quatre secteurs du modèle 3D.

Temps de Réverbération (TR) - Interprétation

Les résultats obtenus montrent des temps de réverbération globalement compris, pour ces quatre secteurs, entre 0,5 et 0,9 s, ce qui est dans la moyenne des résultats obtenus dans les autres secteurs de la grotte et confirme la présence d’une réverbération moyenne et peu impressionnante à Cussac.

Ces résultats montrent également des valeurs intermédiaires à celles mesurées sur le terrain dans ce même secteur (Figure 154). Cela reflète peut-être une variabilité assez sensible des TR de ce secteur, qui, il faut le noter, présente une topographie variée (plafonds bas et hauts, galeries, méandres, salles, présence d’entonnoirs, de laminoirs, et de voûtes de formes variées).

Cette hypothèse pourrait expliquer les variations entre les mesures de terrain et les interprétations de I. Reznikoff (Reznikoff, 2019) : la localisation précise des mesures est très importante.

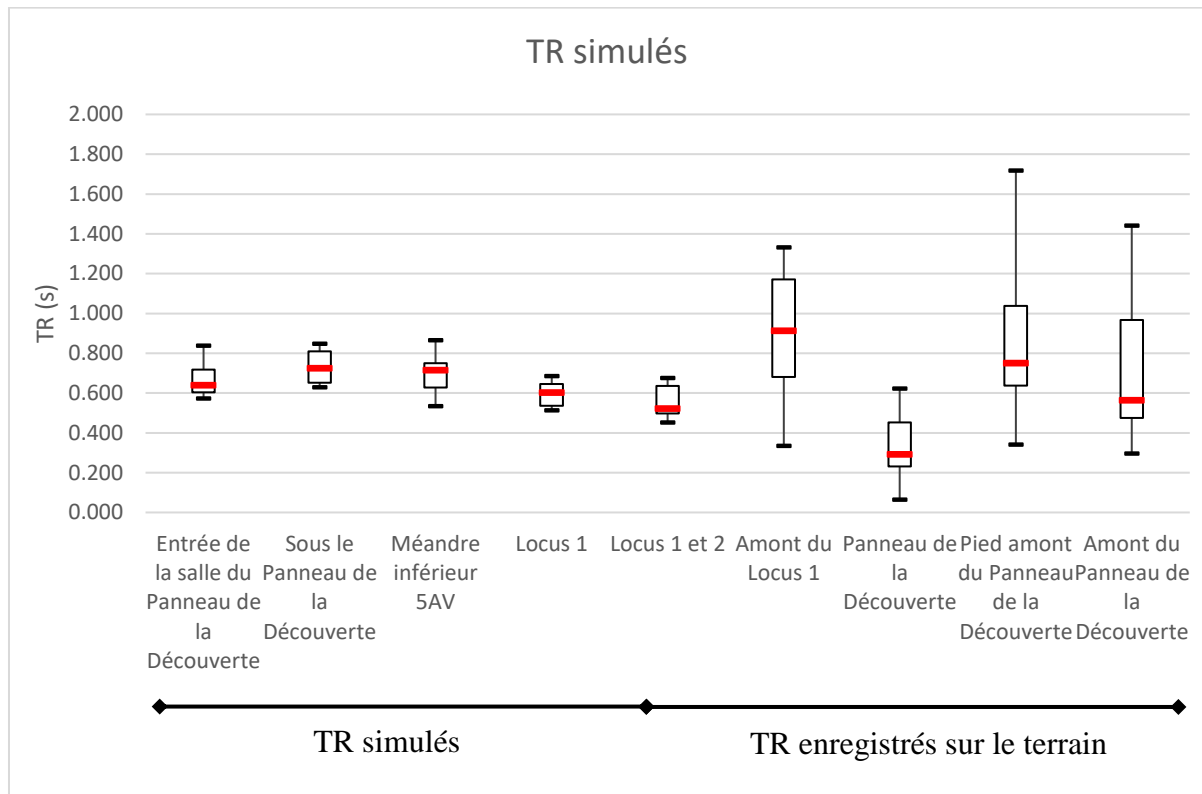


Figure 154 : Boîtes à moustache des mesures de TR issues des simulations avec celles enregistrées sur le terrain dans le même secteur.

Définition du son (D50)

Comme précédemment, pour représenter nos résultats, nous avons moyenné les mesures obtenues par les simulations à 500 Hz, 1 kHz et 2 kHz (Fazenda *et al.*, 2017).

Les données obtenues montrent une intelligibilité quasi-parfaite pour la mesure située entre les locus 1 et 2, mais une intelligibilité moindre dans les autres secteurs (Figure 155). Si le D50 moyen est toujours situé au-dessus de 70 %, ce qui montre une très bonne intelligibilité, ces résultats font cependant partie des mesures les plus basses enregistrées pour la grotte, avec les mesures du Locus 3, du secteur des Griffades, de l'espace situé en aval du Panneau des Rhinocéros, et du Panneau des Figures Féminines (Figure 150).

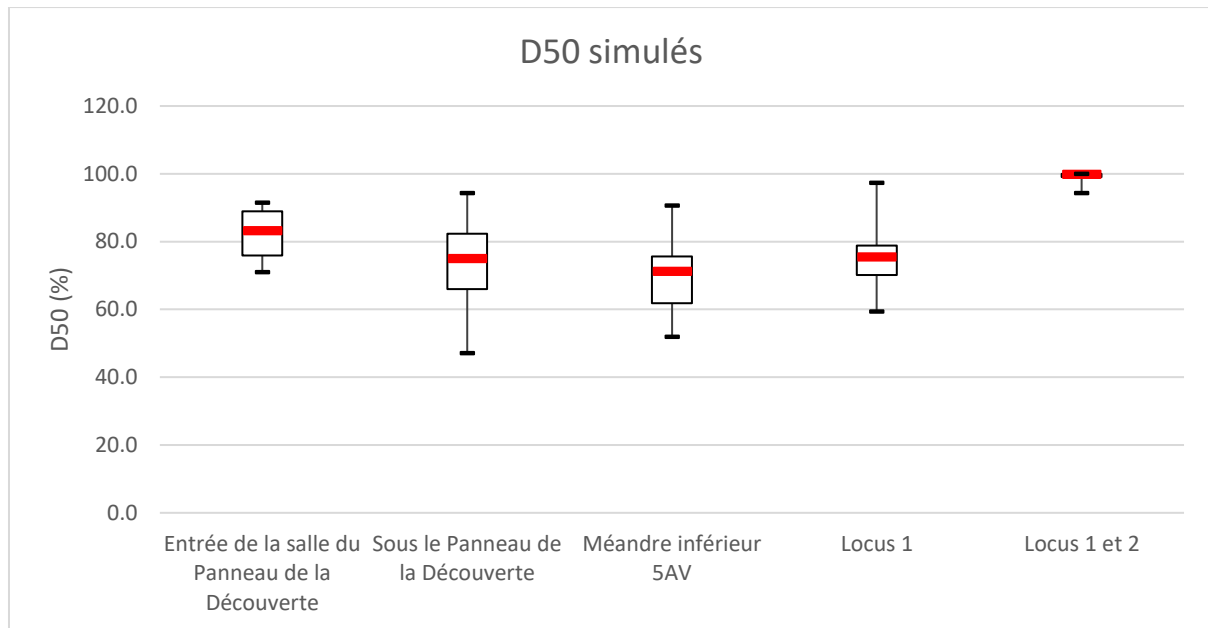


Figure 155 : D50 simulés pour quatre secteurs du modèle 3D.

Clarté du son (C80)

Comme pour le D50, nous avons moyenné les mesures enregistrées à 500 Hz, 1 kHz et 2 kHz (Fazenda *et al.*, 2017).

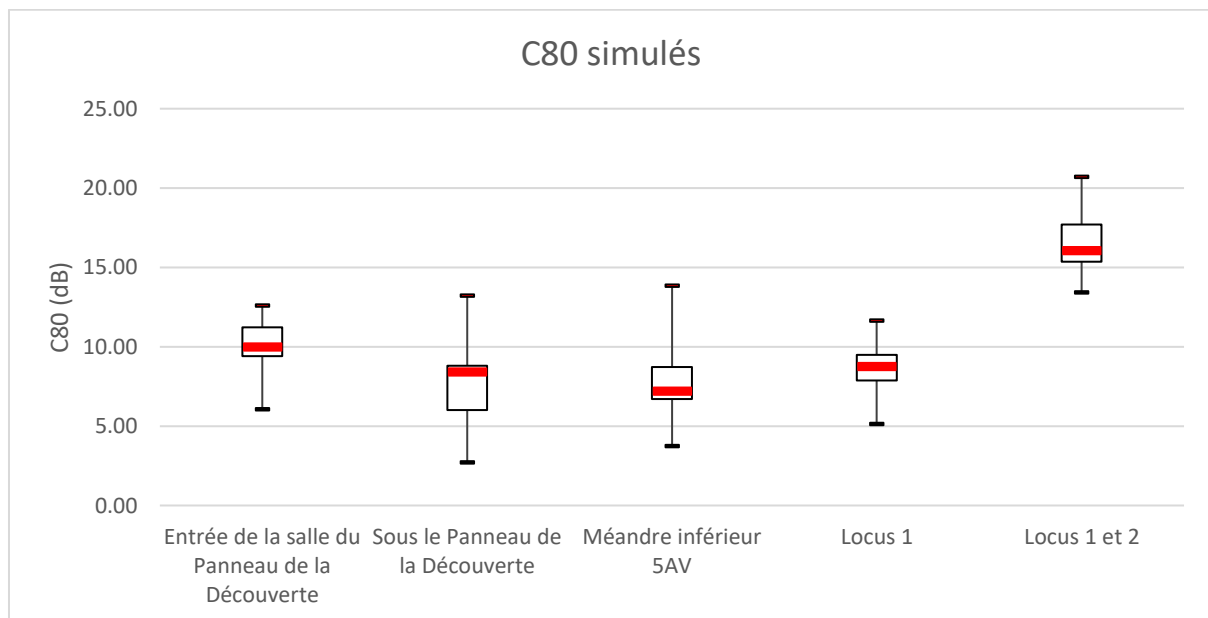


Figure 156 : C80 simulés pour quatre secteurs du modèle 3D.

Les valeurs obtenues (Figure 156) se situent dans la variabilité des mesures enregistrées à Cussac, et en particulier des valeurs basses, avec des médianes entre 5 et 10 dB, exceptées pour la mesure réalisée entre les locus 1 et 2 dont le C80 médian est d'environ 16 dB (Figure 156). Ces mesures sont alors compatibles avec celles du même secteur, mais aussi avec les mesures les plus propices à la musique de la cavité (Locus 3, secteur des Griffades, espace situé en aval du Panneau des Rhinocéros, et Panneau des Figures Féminines ; Figure 157).

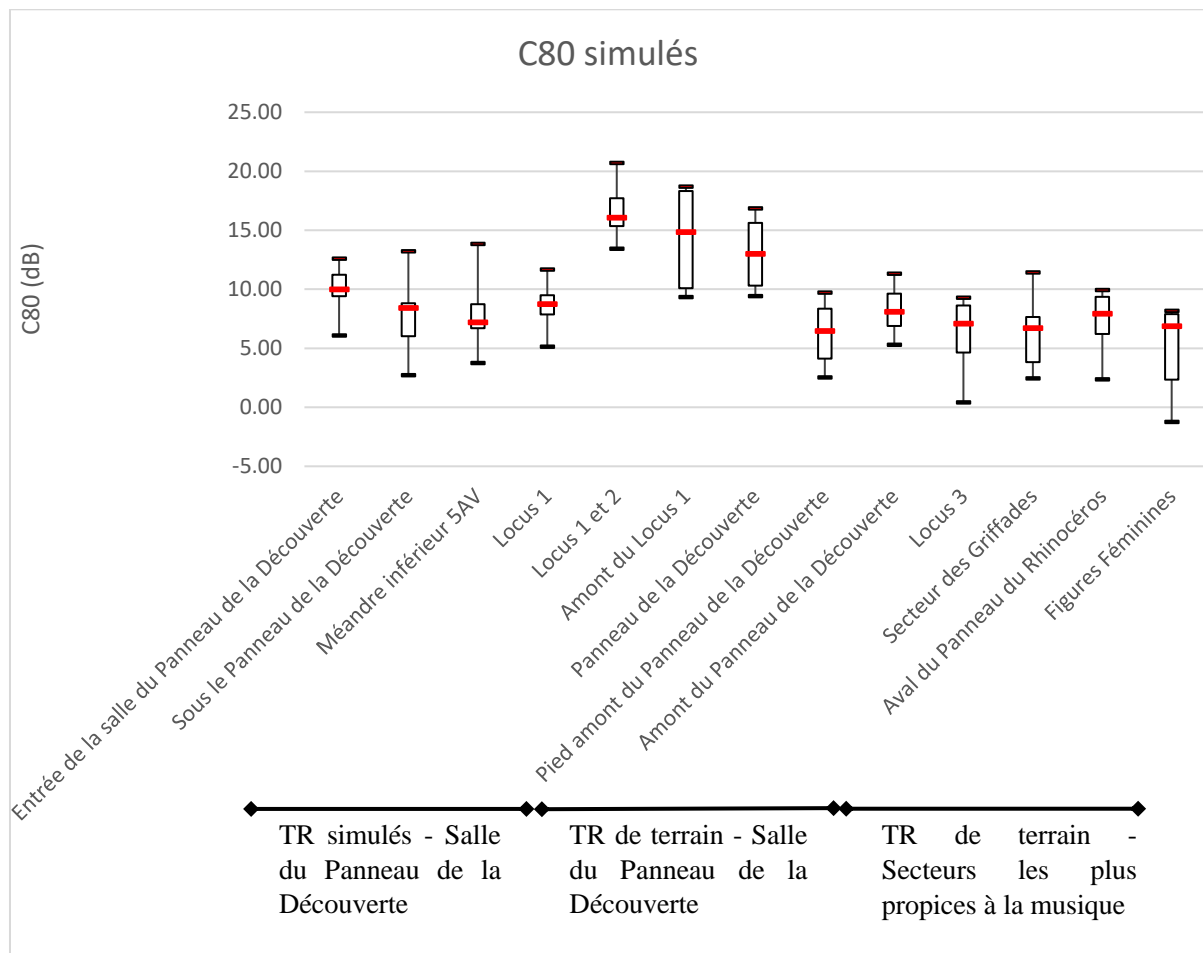


Figure 157 : Comparaison des mesures de C80 issues des simulations avec celles enregistrées sur le terrain dans le même secteur et celles issues des secteurs les plus propices à la musique.

Conclusions

Les mesures de TR, D50 et C80 réalisées par le biais du logiciel *Icare* montrent que les lieux analysés disposent de caractéristiques acoustiques comparables à celles enregistrées dans d’autres secteurs de la cavité, en particulier proches, situées entre la salle du Panneau de la Découverte et le Locus 2. Les simulations réalisées sous le Panneau de la Découverte, à l’extrémité du méandre inférieur 5Av et près du Locus 1 bénéficient d’une meilleure résonance mais d’une moindre intelligibilité que la simulation réalisée entre les locus 1 et 2. Enfin, nous avons noté une variabilité importante, en particulier du TR, dans le secteur modélisé, soit entre l’entrée de la salle du Panneau de la Découverte et le Locus 2. Cette variabilité peut s’expliquer par la présence d’une topographie particulièrement irrégulière dans cette partie de la cavité, et pourrait expliquer les différences entre les mesures *in situ* et les observations de I. Reznikoff dans cette partie de la grotte, puisque nous n’avons pas réalisé nos mesures aux exactes mêmes localisations.

4. Discussion

Lors de ce projet, nous avons eu la chance de pouvoir confronter trois méthodes différentes d’analyse de l’espace sonore : à la voix et à l’oreille par un musicologue, par des enregistrements *in situ*, et via des simulations. L’ensemble des méthodes présente des avantages et des inconvénients et chacune est complémentaire : la perception à la voix et à l’oreille permet une grande mobilité et une adaptation aux différents espaces mais elle n’est pas reproductible tandis que les mesures et simulations le sont, et offrent la possibilité d’obtenir des critères comparatifs. Par ce biais, on pourrait ainsi comparer l’acoustique de plusieurs sites. La méthode par les mesures de terrain est cependant limitée par les aspérités de celui-ci et l’impossibilité de placer librement les capteurs. Les simulations, elles, doivent être précédées de mesures sur le site afin de calibrer le logiciel de simulations, cette méthode est donc essentiellement un complément lorsque les mesures sur le terrain ne sont pas possibles. La confrontation des résultats, en un même lieu, a également permis de noter des différences qui peuvent être révélatrices de problèmes lors de l’enregistrement des sons et/ou du calcul (par exemple dans le cas des mesures réalisées sous le Panneau de la Découverte, pour lesquelles les C80 et D50 s’éloignent des simulations).

Les trois méthodes utilisées pour analyser l'acoustique de la grotte de Cussac amènent toutes à une conclusion semblable : la grotte de Cussac, bien que peu réverbérante dans son ensemble, dispose d'espaces aux caractéristiques variées, ces variations pouvant refléter des différences sectorielles (par exemple la grotte semble plus réverbérante dans le secteur du Grand Panneau que dans l'entrée de la cavité), mais aussi être dues à des influences plus ponctuelles de la topographie. Ainsi, entre la salle du Panneau de la Découverte et le Locus 2, les temps de réverbération moyens sont compris, selon les lieux, entre 0,3 et 0,9 s. Les mesures et simulations ont également permis d'aller un peu plus loin : selon nos critères modernes, Cussac est un lieu tout à fait adapté à la parole, l'intelligibilité étant généralement excellente. Seuls quelques secteurs semblent propices à la musique (c'est-à-dire disposant d'un C80 compris entre 6 et -6 dB) soit, en aval, sous les gravures du Panneau de la Découverte, dans le méandre inférieur 5Av, près du Locus 1 et du Locus 3, et, en amont, dans le secteur des Griffades, l'espace situé en aval du Panneau des Rhinocéros, et près du Panneau des Figures Féminines.

Enfin, nous n'avons pu approfondir notre connaissance du rôle du chenal de voûte dans l'acoustique de Cussac puisque cela aurait nécessité de disposer d'un modèle 3D plus vaste.

CHAPITRE 2 - LA GROTTE DE LASCAUX

A. Historique des recherches et problématiques

La littérature sur l'historique de la découverte, de l'exploitation touristique du site et des problématiques conservatoires engendrées est nombreuse, c'est pourquoi dans ce chapitre nous proposons un succinct résumé de ces événements, que le lecteur pourra retrouver plus détaillés dans les ouvrages suivants : Leroi-Gourhan et Allain dir., 1979 ; Delluc et Delluc, 2003, 2008 ; Glory, 2008.

1. Les temps de la découverte (1940-1948)²⁹

La grotte de Lascaux fut découverte le 12 septembre 1940 par quatre adolescents (M. Ravidat, J. Marsal, S. Coencas et G. Agniel) qui reconnurent les peintures de la Salle des Taureaux et du Diverticule Axial dès leur première exploration. Quelques jours plus tard, Léon Laval, instituteur à la retraite et membre de la Société préhistorique française fut mis au courant. La reconnaissance de la cavité comme site paléolithique, sera confirmée par la visite de l'abbé Breuil le 21 du mois de septembre. La grotte sera classée au titre des Monuments Historiques en décembre 1940.

a) *Modifications du site*

Dès la découverte, des modifications vont être réalisées dans la cavité : en premier lieu l'entrée. La découverte s'est faite par un trou créé par l'arrachement d'un pin 20 ans plus tôt, les quatre adolescents s'étaient laissés glisser le long d'une sorte de cheminée pour atteindre un éboulis menant à la première salle. Afin de faciliter l'accès, cette première cheminée a été agrandie. Les sols, potentiellement porteurs de traces paléolithiques, sont rapidement piétinés, les gours

²⁹ L'ensemble des données présentées dans ce chapitre peuvent être retrouvées dans la littérature suivante : Delluc et Delluc, 1979b.

de la Salle des Taureaux sont percés, ce qui en provoque la vidange dans un entonnoir de la même salle, provoquant quelques effondrements. Enfin, de nombreux vestiges, lampes, charbons, silex seront ramassés dès cette époque par les premiers visiteurs.

Entre 1940 et 1947, en ces années de guerre, la grotte est un peu délaissée, et il faudra attendre la Libération pour que son exploitation touristique soit envisagée. À cette fin, de 1947 à 1948, de grands travaux sont effectués : la colline et l’éboulis d’entrée sont creusés afin de mettre en place une porte et des escaliers d’accès. Des tranchées sont mises en place dans le Passage afin de pouvoir se tenir debout. Les premières visites publiques de la grotte débutent le 14 juillet 1948, année qui marque également la publication du premier ouvrage sur la grotte, issue du travail de F. Windels sur les œuvres pariétales et en collaboration avec Annette Laming-Emperaire, intitulé « Lascaux. Chapelle Sixtine de la Préhistoire » (Windels et Laming, 1948). Dans le même temps, en 1948, une courte fouille est menée par H. Breuil, S. Blanc et M. Bourgon dans le Puits (Blanc, 1948-1950, Breuil, 1960). Ces fouilles, menées dans l’espoir de découvrir des restes humains que l’on supposait pouvoir opportunément compléter cet espace particulier de la grotte, mettront au jour essentiellement des lampes de calcaire non aménagées, quelques artefacts et des charbons qui feront l’objet des toutes premières expériences de datation par la méthode du carbone 14 par W. F. Libby (Arnold et Libby, 1951).

2. Quand visites touristiques et relevés se côtoyaient (1948-1963)³⁰

a) Travaux d’aménagements

La décennie 1950 est marquée par l’intense exploitation touristique du site et ses conséquences. Alors que dès la fin des années 40 des inquiétudes apparaissent concernant la préservation des vestiges (Blanc, 1948-1950), on recense environ 30 000 visiteurs pour l’année 1955, et jusqu’à 100 000 visiteurs en 1960 pour atteindre en 15 ans le million de personnes. L’affluence provoque une hausse de la température et du taux de CO₂ qui génèrent à leur tour une gêne pour les visiteurs. La grotte, qui avait déjà été aménagée pour l’accueil du public (décaissement de l’éboulis d’entrée, nivellement des sols) va donc subir une seconde série d’aménagements avec la mise en place d’un système de renouvellement de l’air sous l’escalier d’entrée (au détriment

³⁰ De nombreux ouvrages retracent les événements qui suivirent la découverte du site, dont nous ne faisons qu’un résumé : Leroi-Gourhan, 1979 ; Delluc et Delluc, 2003, 2008 ; Geneste, 2006 ; Glory, 2008.

des derniers vestiges de l'éboulis d'entrée). Ces aménagements nécessitent également l'installation de gaines de 60 cm de diamètre dans le sol de la grotte, depuis l'entrée jusqu'au fond du Diverticule Axial d'une part et jusqu'à l'extrémité distale de la Nef d'autre part. Lors de ces travaux, ce sont environ 440 m³ de déblais qui ont été évacués, détruisant une grande partie des niveaux archéologiques paléolithiques alors encore en place.

Ces travaux avaient pour objectif de maintenir l'ouverture du site au public mais ils vont pourtant précipiter sa fin. Dès 1960, M. Sarradet, alors conservateur de la grotte, observe le développement de taches vertes liées à des colonies d'algues, ainsi que la formation d'un voile de calcite sur les parois, dû à la condensation et au trop grand nombre de visiteurs. Ces taches s'étendent jusqu'à ce qu'en janvier 1963 des observations alarmantes conduisent le propriétaire, le comte de la Rochefoucauld-Montbel, à fermer la grotte aux visiteurs et à solliciter des experts pour remédier aux problèmes. Cette fermeture sera rendue définitive par A. Malraux, alors ministre des Affaires culturelles : l'impact de la fréquentation touristique sur les déséquilibres climatiques et microbiologiques est mis en évidence, et un seuil de présence humaine maximale cumulée par semaine est alors défini à 20 h. Dans ces conditions, il est impossible de continuer les visites grand public.

b) Le travail de l'abbé Glory

De 1952 à 1963, dans un contexte d'intense exploitation touristique, il paraît naturel que peu de projets de recherche d'envergure aient pu avoir lieu. L'abbé Breuil confie le relevé des gravures de l'Abside à l'abbé Glory. Ce travail sera réalisé en dehors des visites, souvent la nuit, ce qui n'empêche pas l'abbé de relever jusqu'à 1 434 figures gravées. En parallèle, il est chargé, en 1957 et 1958, de suivre les travaux de terrassement. S'il se trouve impuissant face à la destruction des sols et niveaux archéologiques, il en profite pour relever 15 coupes stratigraphiques en différents points de la grotte et pour ramasser une partie du matériel archéologique excavé (lampes, colorants, pièces issues des industries osseuses et lithiques, coquillages, faune, charbons...). Cependant, aucun moyen ne lui fut donné pour les étudier. Il conduit une fouille à la suite de H. Breuil et S. Blanc lui aussi dans le Puits de 1959 à 1961 où il découvre la célèbre lampe façonnée et les sagaies en bois de cervidé décorées.

3. Protéger Lascaux³¹

La fermeture de la cavité (1963) est rapidement suivie par la mise en fonction d’un système d’assistance climatique dont l’objectif est d’éviter que la condensation se concentre sur les parois (1965-1967). Dans le même temps des mesures assurant la protection du site sont prises : J. Marsal est nommé gardien, on imagine la création d’un fac-similé Lascaux II en 1970 afin de déporter la pression des visiteurs du site d’origine, l’inscription sur la liste du patrimoine mondiale de l’UNESCO intervient en 1979, et, en 1995, un « Livre Blanc » est mis en place sous la direction de J.-M. Geneste, alors conservateur de la grotte de Lascaux. Enfin, l’accès à la grotte est encore réduit à cinq personnes par jour.

L’état de la grotte semble alors stable quand, entre 2000 et 2001, le dispositif d’assistance climatique est remplacé. Ce dernier, qui devait être identique au précédent, se révèle au final moins modulable et produit une nouvelle contamination fongique. C’est alors le début d’une seconde crise bioclimatique : des moisissures blanches apparaissent sur les banquettes argileuses de la Salle des Taureaux en juillet 2001. Elles se développent rapidement sur les sols, banquettes, parois et voûtes, et l’ensemble sera traité entre 2001 et 2003 par pulvérisation de biocide. En 2002, un nouveau Comité scientifique est mis en place sous la direction de M. Gauthier, inspecteur général honoraire de l’archéologie afin de proposer un plan pour assurer un retour à l’équilibre de la cavité. Cela n’empêche malheureusement pas, en 2006, le développement de taches noires dans la cavité, en particulier dans le Passage, l’Abside, et la Nef. Ces taches sont à leur tour traitées au biocide en 2008. Cette même année marque la sanctuarisation de la colline, l’accès à la cavité devient extrêmement contraint sur le principe de laisser la cavité retrouver d’elle-même un équilibre naturel. De ce jour, aucune nouvelle attaque microbienne n’a été attestée.

La question de la sauvegarde en trois dimensions des données connues sur la grotte se pose dès sa fermeture (Bassier, 1979), mais il faut attendre 2012 pour qu’un relevé 3D complet de la cavité soit commandé au cabinet Perazio. Il permettra de sauvegarder l’état de la cavité et sera mis à profit afin de créer un nouveau fac-similé, ouvert en décembre 2016 : « Centre International de l’Art Pariétal - Lascaux IV ».

³¹ Les problématiques liées à la conservation de Lascaux font l’objet d’une vaste littérature, dont ce chapitre n’est qu’un résumé : Delluc et Delluc, 2003, 2008 ; Geneste, 2007, 2008 ; Vidal, 2008.

4. Étudier Lascaux

Dans ce contexte sensible, les recherches à Lascaux ont été dominées, après les rares opérations archéologiques ou ce qui pouvait en tenir lieu, par des préoccupations d'ordre conservatoires. La seconde crise climatique du début du millénaire a profondément ému le grand public et la pression de l'opinion internationale a contraint l'État à prendre ses responsabilités. Dès la création du comité scientifique, les recherches tournées vers les problématiques conservatoires se sont intensifiées et ont embrassé un plus large panel de disciplines. On peut par exemple citer les travaux portant sur l'analyse des micro-organismes (*e.g.* Sire, 2006 ; Oriol et Mertz, 2006 ; Martin-Sanchez *et al.*, 2014 ; Alonso, 2018), sur la compréhension du système karstique (p. ex. Lopez, 2009 ; Xu *et al.*, 2015 ; Verdet *et al.*, 2020), ou encore sur l'influence de l'environnement climatique (p. ex. Ferchal, 2003 ; Malaurent *et al.*, 2006 ; Lacanette *et al.*, 2007, 2009 ; Lacanette et Malaurent, 2010, 2015 ; Houillon *et al.*, 2017).

Dès 1979, une volonté s'est faite jour de clarifier les données alors disparates accumulées depuis la découverte afin de faire un bilan de l'état des connaissances. Une équipe de l'IPH dirigée par Arl. Leroi-Gourhan et J. Allain rassemble l'ensemble des données et vestiges collectés jusque-là, souvent par l'abbé Glory, et qui n'avaient jamais pu bénéficier d'une étude et d'une publication scientifique. Ce travail constituera l'ouvrage collectif « *Lascaux Inconnu* » (Leroi-Gourhan et Allain dir., 1979).

Suite à cet ouvrage, les recherches sur Lascaux ralentissent, l'accès très limité à la cavité étant une contrainte forte. Seul Norbert Aujoulat pourra mener une étude approfondie sur plusieurs années du dispositif pariétal tout en se pliant aux contraintes de limitation du temps de présence dans la cavité (Aujoulat, 2002 ; 2004). Il axera ses recherches sur les modalités d'intégration de la grotte au sein de son territoire, et des figures pariétales au sein de la topographie du karst. Cette problématique permet de renouveler l'approche scientifique de la grotte tout en apportant un renouvellement méthodologique à la discipline. À la suite de la découverte des archives de l'Abbé Glory par G. et B. Delluc paraissent plusieurs ouvrages (Delluc et Delluc, 2003 ; Glory, 2008) complétant Lascaux inconnu.

Devant les difficultés d'accès au site, des alternatives ont dû être trouvées afin d'enrichir nos connaissances de la grotte. C'est ainsi que dans les années 2010 voient se profiler un renouvellement méthodologique avec l'exploitation du modèle 3D complet de la cavité (cabinet Perazio, 2012) et la mise en place de nouveaux projets collectifs s'appuyant sur celui-ci.

Le projet MicroPaGO (dir. D. Lacanette, 2014-2021) a pour objectif, à partir du modèle 3D présentant la morphologie actuelle, de proposer une restitution de la morphologie passée de la cavité, et en particulier du niveau et de l'état des sols lors de la découverte du site (en septembre 1940) puis lors de sa fréquentation paléolithique. Ce travail est mené à partir des données et archives disponibles (textes retraçant les premières incursions, photographies anciennes, coupes de l'abbé Glory, hauteur du niveau archéologique encore en place, etc.).

Le PCR LAsCO (dirs. M. Langlais et S. Ducasse, 2018-2021) propose la révision de l'ensemble du matériel archéologique découvert dans la grotte à l'aide des nouvelles technologies disponibles, et notamment de la possibilité de scanner ces vestiges. Par la suite, et en partenariat avec le projet MicroPaGO, il est prévu que les objets soient virtuellement replacés sur les sols paléolithiques du modèle 3D (reconstitué selon l'état et le niveau présumé des sols au Paléolithique récent).

Nos travaux, adossés aux projets MicroPaGO et LAsCO s'intègrent naturellement dans cette dynamique d'utilisation des modèles 3D des différents états de la grotte (état actuel, de 1940 et du Paléolithique récent lorsque disponible) afin de répondre à des questions d'ordre archéologique.

5. Questions de recherche

Lascaux est à plusieurs égards très différente de Cussac, presque opposée.

Sur le plan de la géologie, tout d'abord, où la nature matériaux et la forme des parois a pu avoir une influence sur les propriétés acoustiques et d'éclairage de la grotte : à Lascaux les espaces sont dans l'ensemble moins encombrés de spéléothèmes qu'à Cussac, les parois calcaires disposent d'un facteur de réflectance plus élevé, facteur peut-être encore plus élevé dans les espaces où le calcaire est couvert de calcite blanche, tandis que la cavité présente plusieurs types d'espaces (salles, couloirs, puits, cul-de-sac) fréquemment surmontées de dômes à la voûte.

Sur le plan de la recherche, aussi, où contrairement à Cussac il n'y a pas d'équipe pluridisciplinaire ayant livré des données contextuelles. De plus, l'accès extrêmement réduit à la cavité ne permet pas de compenser cette absence. Ces barrières sont cependant contrebalancées par des innovations méthodologiques majeures, notamment en ce qui concerne

Chapitre 2 - La grotte de Lascaux

la reproduction de l'état de la cavité à plusieurs époques de son histoire, selon des hypothèses proposées par l'équipe du projet MicroPaGO (dir. D. Lacanette). Nos questions archéologiques ont donc évidemment été adaptées à ce contexte.

Nous proposons ici d'investiguer dans un premier sous-chapitre la notion d'éclairage à travers l'étude de la visibilité des couleurs des peintures en fonction de l'éclairage préhistorique choisi, dans un second sous-chapitre l'accès au Puits à l'aide de l'analyse de la visibilité et de l'acoustique de ce secteur, et, enfin, dans un dernier sous-chapitre, nous proposons un travail sur l'acoustique de la grotte, et notamment sur l'influence de l'évolution de la morphologie des sols sur l'acoustique de la grotte.

Cependant, avant d'exposer nos résultats, nous présentons le contexte physique de Lascaux, la grotte ayant vécu de nombreuses modifications depuis le Paléolithique.

B. Lascaux, le contexte physique

Dans ce sous-chapitre, nous proposons de revenir sur une description physique générale de la cavité avant de décrire plus précisément l'aspect et les modifications effectuées dans les espaces que nous allons investir lors des simulations³². C'est pourquoi le Conduit Terminal, la Galerie du Mondmilch, le Diverticule des Félines, la Grande Diaclase et la Salle Ensablée, au sein desquels aucune simulation ne fut réalisée, ne seront pas décrits.

1. Considérations générales

La colline de Lascaux, qui abrite la cavité, est située à 1 km au sud-est de la commune de Montignac, en Dordogne, sur la rive gauche de la vallée de la Vézère que l'entrée actuelle de la cavité domine d'environ 110 m. L'histoire géologique de la cavité débute au Coniacien supérieur (horizon du Crétacé), lorsque se déposent les bancs calcaires horizontaux dans lesquels la grotte va être creusée. Une première diaclase principale va ensuite se mettre en place, suivie par un réseau hydrographique exploitant cette première fracture. À partir d'un réseau de diaclases, des phases de creusement vont alterner avec des phases de comblement jusqu'à former le réseau karstique actuel. L'étendue de ce dernier est inconnu, la grotte n'étant accessible que sur environ 235 m (Aujoulat, 2002).

Dans la prolongation de l'entrée actuelle (Figure 158), le premier espace orné est la Salle des Taureaux, ou Rotonde, elle-même prolongée par un long couloir en cul de sac dénommé Diverticule Axial. Les parois couvertes d'une calcite blanche de ces deux espaces sont ornées de peintures polychromes. Sur la paroi droite de la Salle des Taureaux, s'ouvre une autre galerie qui, après un premier secteur dit du Passage, s'élargit pour former un large couloir, la Nef, puis se prolonge vers une longue galerie étroite, le Diverticule des Félines. La sortie du Passage s'élargit également vers l'ouest pour former l'Abside. Cet ensemble, comprenant la Nef, l'Abside et le Diverticule des Félin, est majoritairement gravé, quelques panneaux y sont peints mais de nombreux restes de figures peintes témoignent d'une conservation plus précaire des

³² Dans ce sous-chapitre, l'essentiel des informations sont issues d'un nombre restreint d'ouvrages : Leroi-Gourhan et Allain dir., 1979 ; Aujoulat, 2002, 2004 ; Delluc et Delluc, 2003 ; Glory, 2008.

pigments dans cette zone. Au fond de l’Abside, dont la voûte est littéralement couverte d’un palimpseste de figures gravées et peintes, une cheminée conduit en contrebas à une diaclase : le Puits, dont les parois portent des dessins noirs dont la célèbre Scène du Puits qui oppose comme rarement un homme ithyphallique renversé entre un bison perdant ses entrailles et un rhinocéros accompagné d’un groupe de six ponctuations également noires (Figure 158).

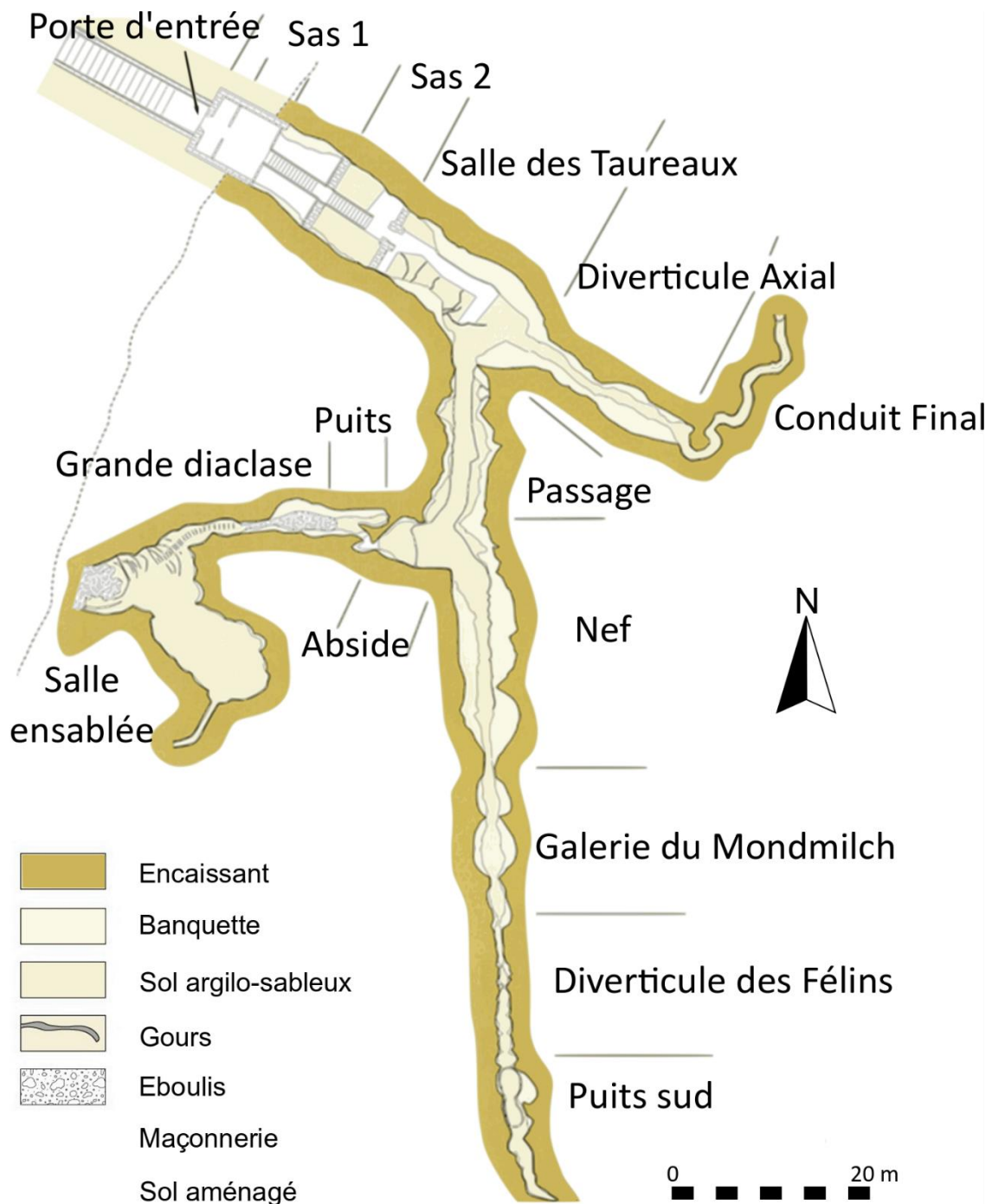


Figure 158 : Plan topographique de la grotte de Lascaux, d’après doc. N. Aujoulat, fond topographique C. Bassier.

La grotte est assez sèche bien que de nombreux dépôts de calcite y soient présents. De très anciennes percolations ont provoqué le dépôt de calcite qui a produit, en certains endroits, un support blanc propice à la peinture dont les Paléolithiques ont su tirer profit, ainsi que la formation de quelques rares stalactites. Des entrées d'eau d'âge Holocène ont conduit à la formation d'un plancher calcité et de gours qui ont recouvert une partie importante des sols paléolithiques (en particulier dans la Salle des Taureaux, le Passage, et une partie de la Nef ; Genty *et al.*, 2011). Enfin, d'importants dépôts de mondmilch localisés dans la galerie du même nom n'ont pas été datés (Berrouet, 2009).

2. L'Entrée

L'entrée principale – et peut-être unique – de Lascaux est aujourd'hui creusée dans l'éboulis qui obstruait l'entrée en 1940. Au moment de la découverte, l'ouverture était constituée d'un étroit trou dans la colline, qui se poursuivait par une cheminée verticale de 3 à 5 m de long avant de faire un coude qui permettait d'avancer dans la cavité, selon une forte pente (Figure 159). Cette entrée fut très rapidement élargie afin de laisser entrer les visiteurs, toujours plus nombreux, jusqu'à ce qu'une entrée monumentale soit creusée dans l'éboulis (Figure 159).



Figure 159 : Évolution de l'entrée : Premier agrandissement en 1940 (photographie en haut à droite ; Ph. M. Larivière/CNP), Travaux d'aménagement pour l'accueil du public en 1947 (photographie de gauche ; © D.R.), et état actuel de l'entrée (photographie en bas à droite : O. Huard/Centre National de la Préhistoire/Ministère de la Culture).

Les nombreux travaux nécessaires à la mise en place de l'entrée détruisirent de nombreux indices concernant l'évolution de la morphologie de l'entrée, puisque seule deux coupes purent être réalisées par l'abbé Glory lors des travaux dans l'éboulis, avant d'être retravaillées par N. Aujoulat (Leroi-Gourhan, 1979b ; Aujoulat, 2004). Heureusement, ces coupes présentent la pente du niveau archéologique, ce qui a permis à l'équipe MicroPaGO, avec des compléments issus des études géologiques des abords de la cavité (détectations, carottages...), de proposer une reconstitution de l'entrée telle que l'ont peut-être connue les Préhistoriques. Parmi les informations à notre disposition, nous savons que le porche d'entrée s'est effondré entre l'occupation paléolithique et 1940, l'entrée était alors plus avancée que l'actuelle. De plus, les coupes montrent que la pente d'accès était d'environ 20° (Aujoulat, 2002). Enfin, concernant l'aspect et les dimensions du porche d'entrée, l'équipe a prolongé l'avancée de la strate supérieure (qui s'est effondrée et est observable dans les coupes de l'abbé Glory, recouvrant les niveaux paléolithiques), et s'est basée sur l'hypothèse de N. Aujoulat qui a proposé une entrée

semblable à celles des autres grottes des environs, c’est-à-dire une entrée qui s’ouvre à flanc de colline, assez haute mais peu visible dans le paysage (Aujoulat, 2002, 2004 ; Figure 160).

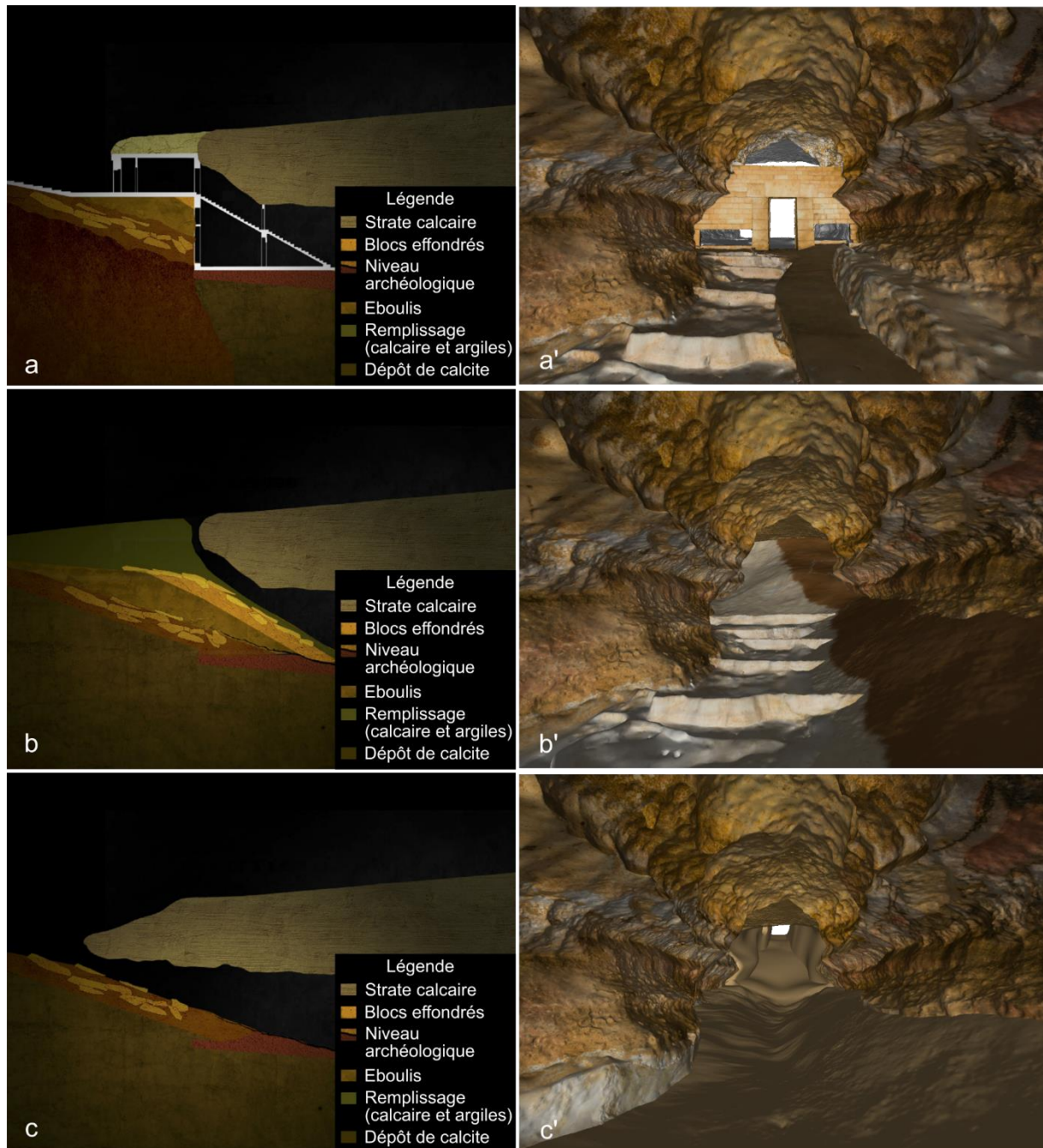


Figure 160 : Évolution de l’aspect du secteur d’entrée de la grotte de Lascaux avec un éclairage omnidirectionnel de couleur blanche situé depuis l’intérieur de la cavité. a) Coupe de l’entrée actuelle (Ministère de la Culture/Centre National de la Préhistoire) ; a’) Vue de l’entrée actuelle depuis la Salle des Taureaux dans le modèle 3D (Perazio engineering, 2012) ; b) Coupe d’une hypothèse de l’entrée en 1940 (Ministère de la Culture/Centre National de la Préhistoire) ; b’) Reconstitution de l’entrée lors de la découverte, vue depuis la Salle des Taureaux dans le modèle 3D (projet MicroPaGO, d’après 3D Perazio engineering, 2012) ; c) Coupe d’une hypothèse de l’état de l’entrée Paléolithique (Ministère de la Culture/Centre National de la Préhistoire) ; c’) Hypothèse de reconstitution de l’entrée Paléolithique, vue depuis la Salle des Taureaux dans le modèle 3D (projet MicroPaGO, d’après 3D Perazio engineering, 2012).

3. La Salle des Taureaux

La Salle des Taureaux est la première zone ornée de la cavité depuis l'entrée, seules quelques traces de colorants ayant été observées dans la zone vestibulaire (Aujoulat, 2002). Cette grande salle (d'environ 18 m de long pour 6 à 8 m de large) est marquée par un profil en diabolo, avec des coupoles au plafond et un retour de paroi calcité sur lesquelles les figures ont été peintes (Aujoulat, 2002 ; Figure 161, a).

Lors de la découverte, le sol était fortement calcité, marqué par une série de gours sur la droite de la salle débouchant sur un entonnoir central à l'extrémité distale (Figure 161, c). Nous ne savons pas si cet entonnoir était actif au moment de la découverte, ou s'il a été réactivé par l'abbé Breuil lorsque ce dernier perça la base des gours afin d'y faire circuler l'eau qui était rentrée suite à de fortes pluies peu après la découverte (Breuil, 1950).

Aujourd'hui, le sol y est presque entièrement artificiel, seuls quelques gours ayant été conservés : lors des travaux pour installer les gaines d'extraction de l'air ambiant, le sol fut creusé, atteignant et détruisant les niveaux archéologiques, puis remblayé, parfois bétonné, y compris dans la zone de l'entonnoir qui n'existe pour ainsi dire plus (Leroi-Gourhan, 1979b ; Figure 161, b).

L'état préhistorique de ces sols a été reconstitué par l'équipe MicroPaGO selon une hypothèse appuyée sur deux coupes de l'abbé Glory qui représentent le niveau archéologique de ce secteur (Leroi-Gourhan, 1979b), ainsi que par des indices d'ordre géologique et par quelques datations réalisées sur les gours (Genty *et al.*, 2011) et à partir de la reconstitution de l'état de la salle lors de la découverte. Le sol archéologique semble plus bas que le sol de la découverte (entre quelques centimètres et quelques décimètres selon l'endroit), dépourvu de calcite et de gours. La présence ou l'absence de l'entonnoir est extrêmement difficile à trancher, l'hypothèse sélectionnée proposant le maintien de l'entonnoir (Figure 161, d).

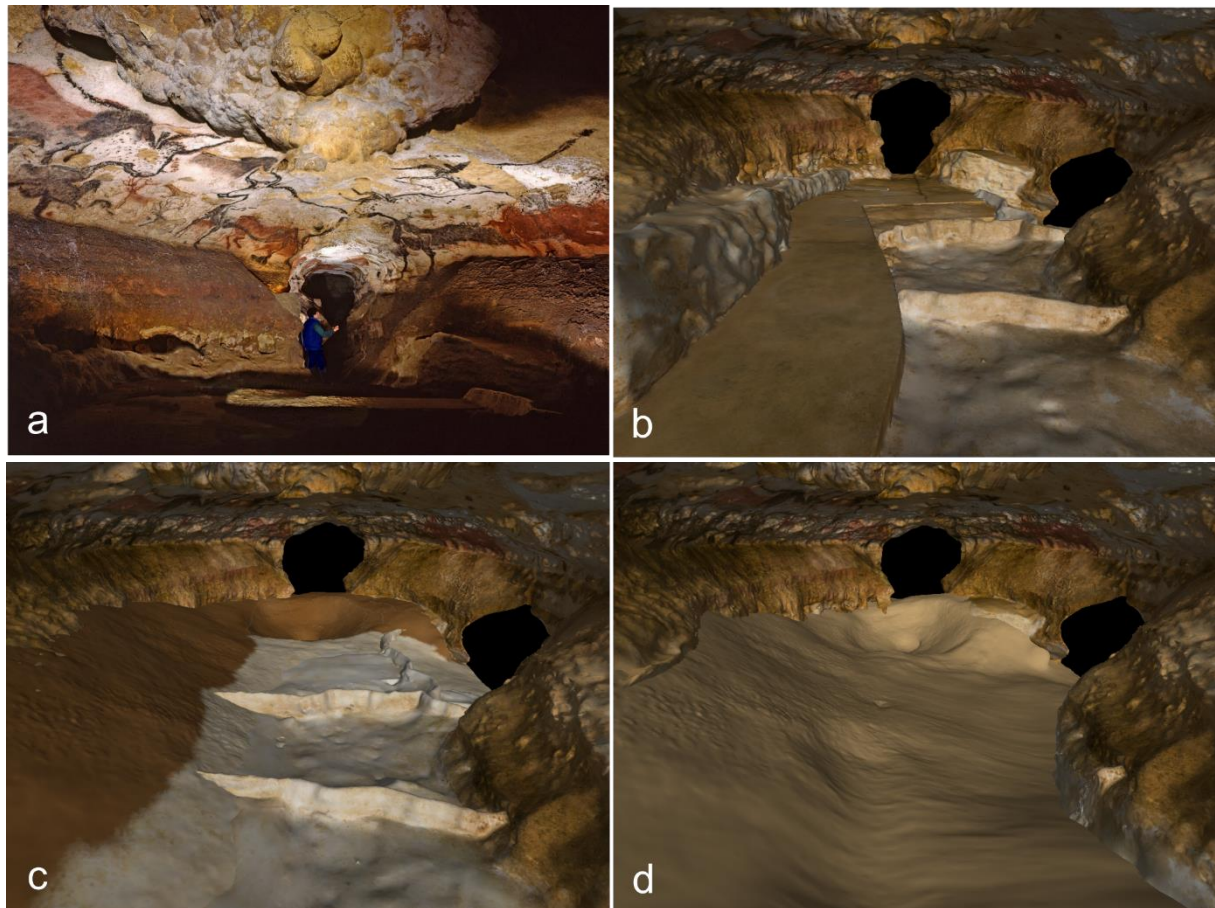


Figure 161 : Différents états de la Salle des Taureaux, depuis l’entrée de la salle.

- a) Photographie de grandes figures peintes sur le retour de paroi calcifié (N. Aujoulat / Centre National de la Préhistoire/Ministère de la Culture).
- b) Modèle 3D de la morphologie actuelle de la Salle des Taureaux (Perazio engineering, 2012).
- c) Hypothèse de reconstitution de la morphologie des sols de la Salle des Taureaux lors de la découverte du site (projet MicroPaGO, d’après 3D Perazio engineering, 2012).
- d) Hypothèse de reconstitution de la morphologie des sols de la Salle des Taureaux lors de la fréquentation paléolithique du site (projet MicroPaGO, d’après 3D Perazio engineering, 2012).

4. Le Diverticule Axial

Cette galerie en cul-de-sac prolonge la Salle des Taureaux dans le même axe NO-SE, mais elle s’en démarque par un fort rétrécissement de sa largeur (qui varie entre 0,40 et 2 m dans la partie accessible à la circulation).

Le sol actuel a été aplani et nivelé vers le bas lors des différents travaux (Leroi-Gourhan, 1979b ; Figure 162). Des traces du niveau du sol précédant ces travaux sont toujours présentes sur les parois, ce qui a permis, conjointement à un travail d’archive, de proposer une restitution de l’état des sols de ce secteur en 1940 par l’équipe du projet MicroPaGO (Figure 162). Le sol apparaît alors constitué de sédiments ponctuellement accumulés de sorte à former des élévations

et des creux. Les indices concernant le niveau et l'aspect du sol Paléolithique sont très peu nombreux, la seule coupe qu'a pu réaliser l'abbé Glory étant située à l'extrémité distale du Diverticule Axial, à l'entrée du méandre du Conduit Final, près du Cheval Renversé. Cette coupe indique que le sol Paléolithique, à cet endroit, se situe environ 10 cm sous le sol de la découverte (Leroi-Gourhan, 1979b). On pourrait supposer la même chose dans tout le Diverticule Axial, mais il est aussi possible que des écoulements d'eau holocènes aient modifiés la morphologie du sol de ce secteur.

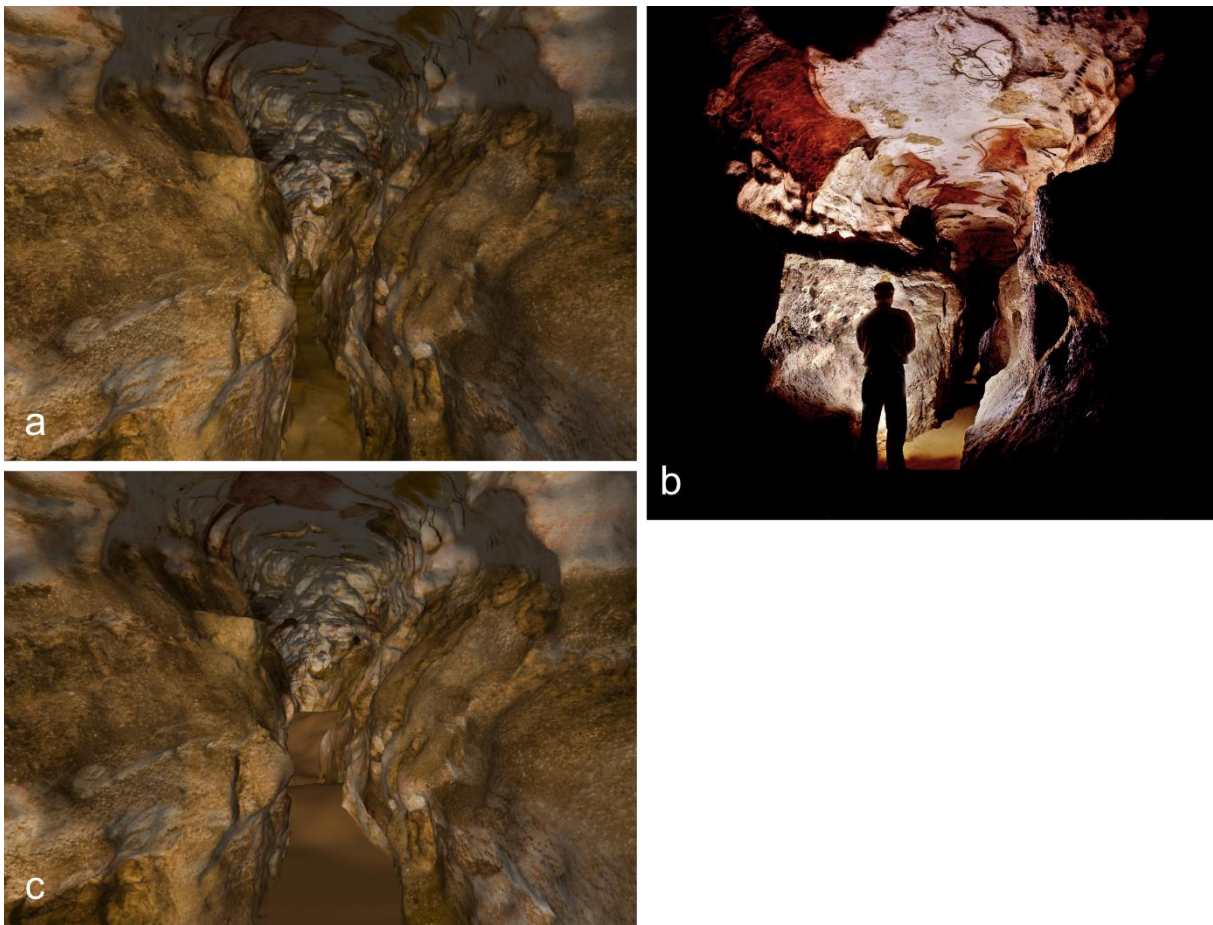


Figure 162 : Différents états du Diverticule Axial, depuis l'entrée de la galerie.

a) Modèle 3D de la morphologie actuelle du Diverticule Axial (Perazio engineering, 2012).

b) Photographie de N. Aujoulat de dos à l'entrée du Diverticule Axial (N. Aujoulat/Centre National de la Préhistoire/Ministère de la Culture).

c) Hypothèse de reconstitution de la morphologie des sols du Diverticule Axial lors de la découverte du site (projet MicroPaGO, d'après 3D Perazio engineering, 2012).

5. Le Passage

Le Passage est une galerie d’une quinzaine de mètres de long et de quatre mètres de large qui s’ouvre sur la paroi droite de la Salle des Taureaux. Sur toute sa longueur, des concavités et convexités alternent en quinconce sur les deux parois opposées (Aujoulat, 2002). À la découverte du site, cette galerie au plancher calcité, barré par une succession de petits gours, était assez basse comparé aux autres espaces de la grotte (entre 1,50 et 1,70 m de hauteur environ), avec un sol fortement décliné dans sa largeur (Figure 163).



Figure 163 : L’entrée du Passage vue de la Salle des Taureaux, en 1940 (photographie et légende d’après Leroi-Gourhan, 1979b, in Leroi-Gourhan et Allain dir., 1979, p. 56).

Rapidement après la découverte, une tranchée y est creusée afin d’y faciliter la circulation (Figure 164). Les travaux successifs, bien que défigurant ce secteur, permettent à l’abbé Glory de relever cinq coupes qui situent le niveau archéologique quelques centimètres sous la base du plancher stalagmitique, lui-même d’épaisseur variable, jusqu’à 30 cm à son maximum (Leroi-Gourhan, 1979b).

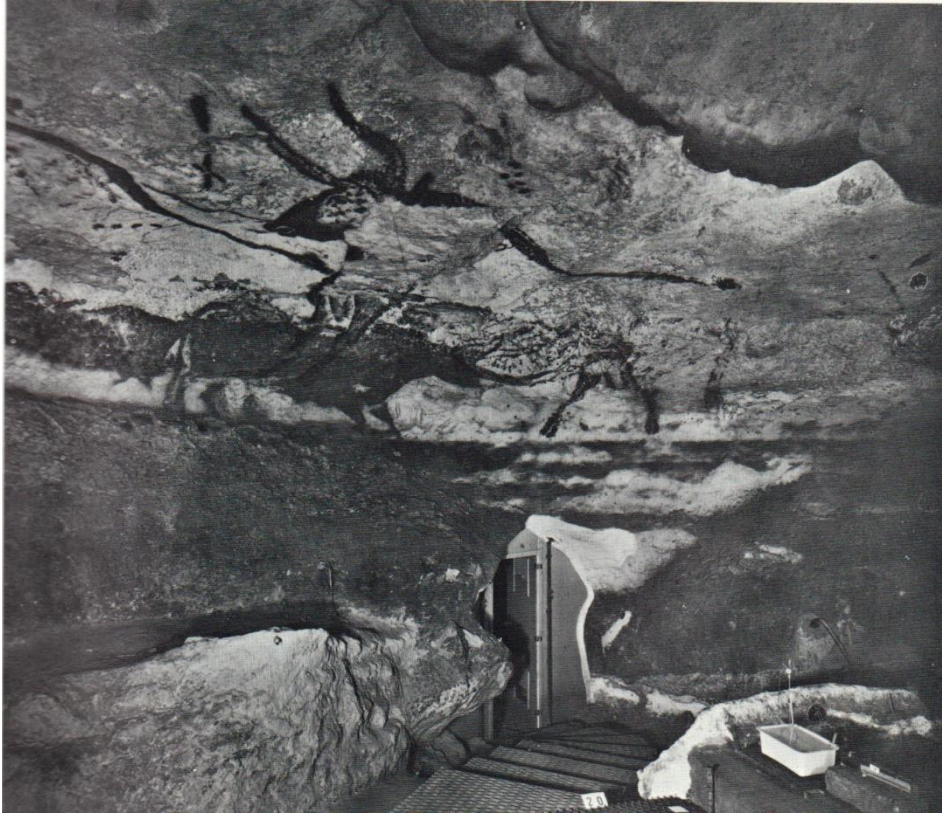


Figure 164 : L'entrée du Passage a été creusé et tout l'avant dégagé pour l'escalier (photographie et légende d'après Leroi-Gourhan, 1979b, in Leroi-Gourhan et Allain dir., 1979, p. 56).

Ces coupes, associées aux niveaux archéologiques encore en place le long de la tranchée, ont permis à l'équipe MicroPaGO de proposer une restitution de l'état des sols lors de la découverte de la cavité, en 1940 (Figure 165), et de travailler sur une restitution de la morphologie paléolithique de ce secteur (en cours).

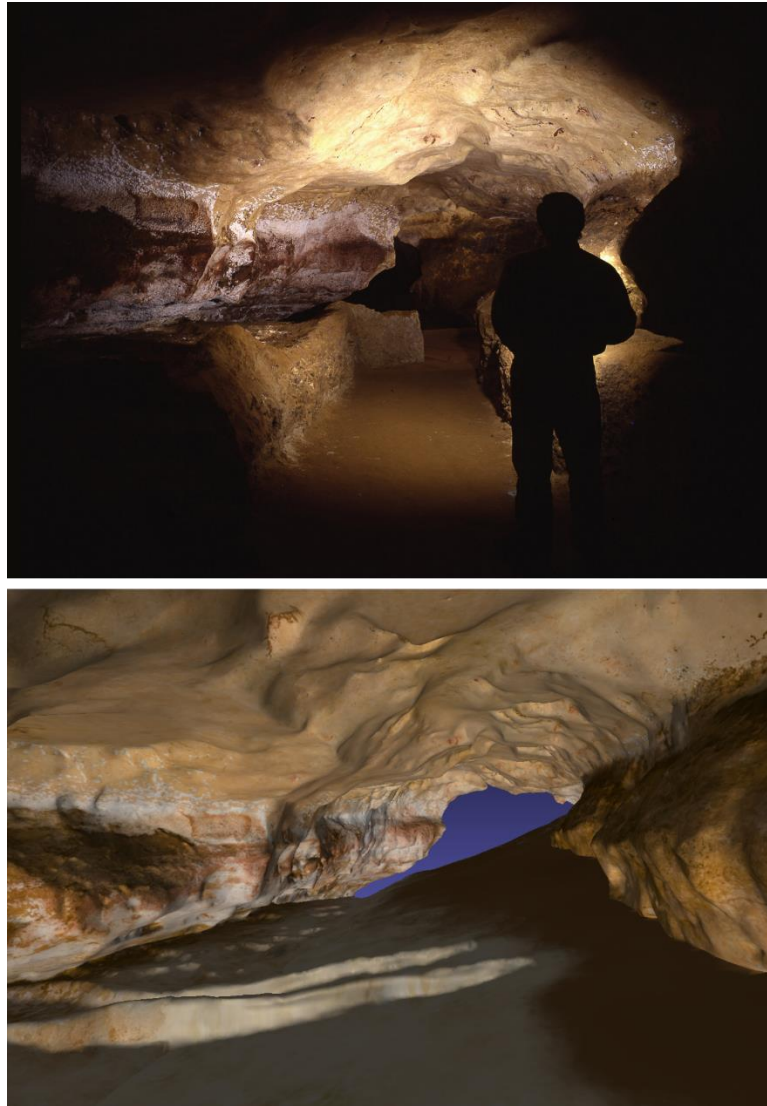


Figure 165 : Passage, vue depuis l’entrée nord. Photographie du haut : état actuel (N. Aujoulat/Centre National de la Préhistoire/Ministère de la Culture) et image du bas : restitution de l’époque de la découverte par l’équipe MicroPaGO (projet MicroPaGO, d’après 3D Perazio engineering, 2012).

6. La Nef

Cette large galerie (jusqu’à 5 m de large) s’ouvre à la suite du Passage. Sa hauteur actuelle varie entre 2,50 et 7 m car le sol y accuse une pente régulière d’environ 30 % avant de former un replat juste avant la Galerie du Mondmilch (Aujoulat, 2002). La voûte de cette galerie est composée de coupoles, tandis que les parois latérales sont symétriques, ce qui donne une forme de diabolo à la galerie. Les deux parois présentent une banquette dans la partie inférieure, qui a pu être utilisée par les Paléolithiques pour se hausser et réaliser les

panneaux des Cerfs Nageant et de la Vache Noire, situés à plus de 4 m du sol de la découverte (Aujoulat, 2002, 2004).

Le sol de ce secteur accusait initialement une très forte pente (environ 45 %, Leroi-Gourhan, 1979b) et était largement calcité (Figure 166). Les travaux de 1957-59 décaissèrent le sol de ce secteur sur quelques décimètres, ainsi que le niveau archéologique, dont les seules informations à notre disposition sont consignées dans les deux coupes réalisées par l'abbé Glory et les notes associées. Ces dernières indiquent que le niveau archéologique était situé une quinzaine de centimètres sous le niveau du sol de 1940, et une vingtaine de centimètres au-dessus du sol actuel.

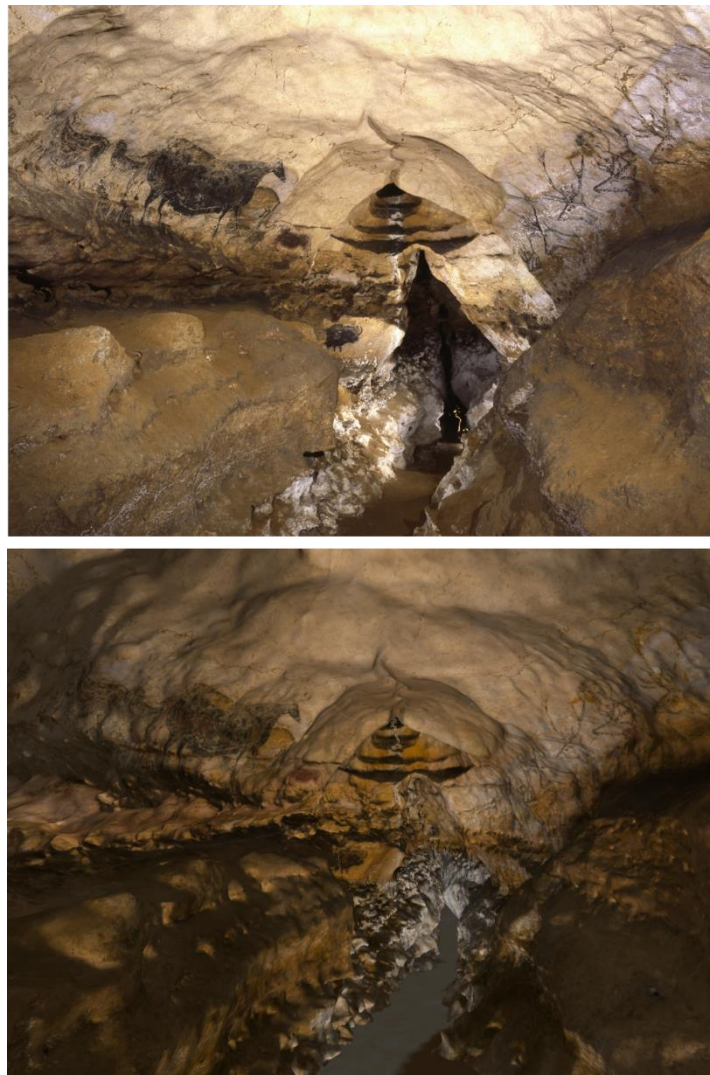


Figure 166 : La Nef, vue depuis la sortie du Passage. En haut, photographie de l'état actuel (N. Aujoulat/Centre National de la Préhistoire/Ministère de la Culture). En bas, proposition de restitution de la morphologie de la découverte (projet MicroPaGO, d'après 3D Perazio engineering, 2012).

7. L’Abside

L’Abside est un espace en morphologie de cul-de-four, d’environ quatre mètres de large pour six mètres de long, avec un toit formé par une grande coupole. Ce secteur s’ouvre sur la droite de la sortie du Passage. Il était, au moment de la découverte, en continuité avec la Nef, le sol argileux menant progressivement d’un espace à l’autre, mais il subit plusieurs aménagements. Suite au creusement de la tranchée du Passage, il a été nécessaire d’aplanir le sol à la sortie de ce dernier, et il devint alors nécessaire de retenir l’important remplissage argilo-sableux qui constitue le sol de l’Abside par un escalier et un blindage artificiels (Figure 167). D’autre part, les sédiments constituant ce sol ont été décaissés de plusieurs décimètres. Ces aménagements ont accentué la hauteur sous voûte, la faisant passer d’un maximum de 3 m en 1940 à plus de 5 m (Leroi-Gourhan, 1979b).

La présence de nombreux vestiges archéologiques découverts en surface ou sous à peine quelques centimètres de sédiments, combiné à l’absence d’évènement géologique enregistré ou de traces de circulations d’eau, conduisent à supposer que le sol paléolithique devait être extrêmement proche du sol de la découverte (Figure 167).

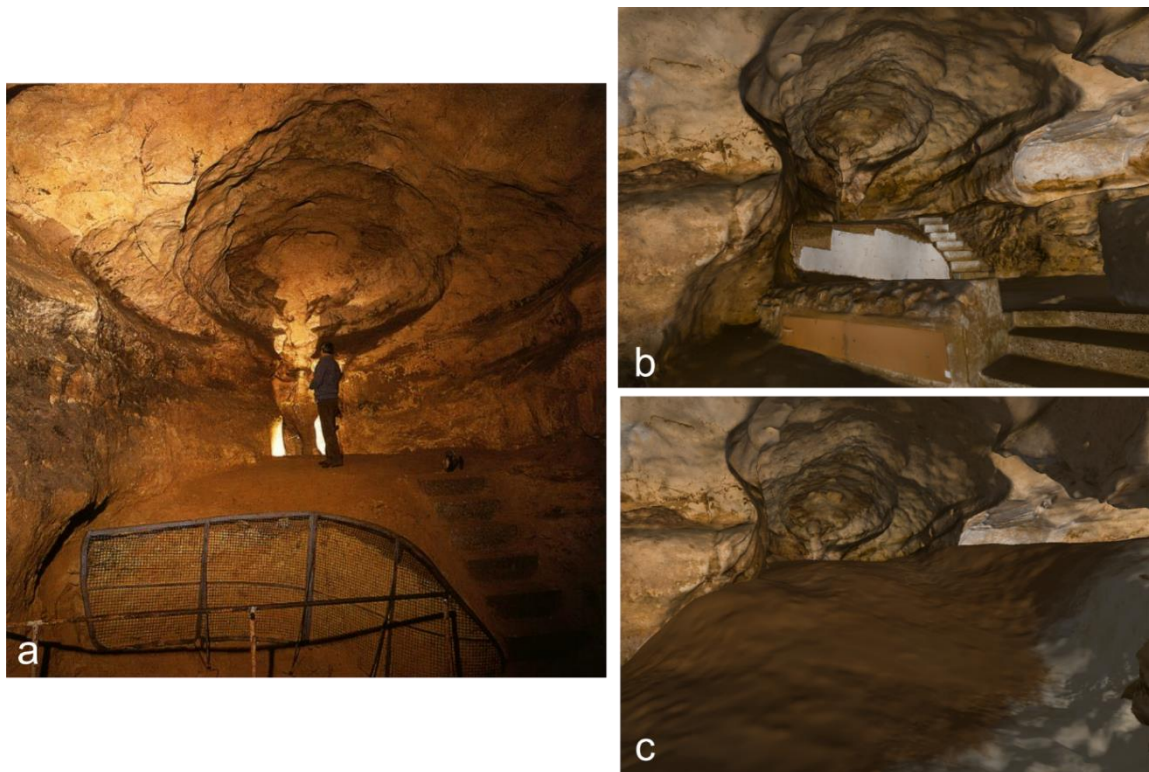


Figure 167 : Différents états de l’Abside, vues, depuis la Nef.

a) Photographie récente (N. Aujoulat/Centre National de la Préhistoire/Ministère de la Culture).

b) Modèle 3D de la morphologie actuelle (Perazio engineering, 2012)

c) Hypothèse de reconstitution de la morphologie de l’Abside lors de la découverte (projet MicroPaGO, d’après 3D Perazio engineering, 2012).

8. Le Puits

a) L'accès

À l'extrémité distale de l'Abside, un bouchon argileux rendait le passage vers la Grande Diaclase, dont la partie proximale est appelée « le Puits », très délicat au moment de la découverte : les inventeurs ont dû ramper sur près de deux mètres avant d'atteindre un à-pic d'environ 4,50 m qui mène au pied du Puits et de la scène éponyme. Aujourd'hui, le bouchon argileux est remplacé par un plancher artificiel dans lequel s'ouvre une trappe qui permet d'accéder à une échelle.

La nécessité, par les inventeurs, de creuser le sédiment qui bouchait partiellement l'accès du Puits, puis d'utiliser une corde et un rondin de bois pour stabiliser cette dernière (propos de M. Ravidat recueillis par N. Aujoulat le 03/01/1993, *in* Aujoulat, 2002), amènent des questions concernant l'accès à cette partie de la grotte au Paléolithique : la sédimentation semble avoir été très faible dans cette partie de la grotte depuis le Paléolithique, ce qui exclurait un accès plus large, et donc plus aisé, tandis que la configuration des lieux, avec un conduit en méandre à deux coudes interdit l'introduction d'un mât ou d'une échelle de perroquet de plusieurs mètres de long. Enfin, l'escalade à main nue semble également risquée puisque le profil transversal en cloche de la descente n'autorise pas une descente en opposition (Aujoulat, 2002).

L'accès au Puits a donc, dès sa découverte, fait l'objet de nombreux débats et n'est toujours pas résolu : les paléolithiques ont-ils utilisé la même méthode que les inventeurs, ont-ils emprunté une autre entrée depuis l'extérieur, par la Salle Ensablée ou la Grande Diaclase (hypothèse par exemple proposée par N. Aujoulat ; Aujoulat, 2002), ou bien la sédimentation des lieux a-t-elle été plus importante que ce que les témoins géologiques laissent penser ?

Ces discussions sont par ailleurs actuellement en cours au sein de l'équipe MicroPaGO afin de proposer une ou plusieurs hypothèses de restitution de la morphologie paléolithique, qui soient appuyées à la fois sur des informations géologiques et archéologiques.

b) Les sols

Le Puits est en fait la partie proximale de la Grande Diaclase, une étroite galerie orientée Est-Ouest. Le seul secteur graphiquement investi de cette Grande Diaclase étant « le Puits ». De

nombreuses fouilles ont été organisées dans ce secteur, dont l’iconographie dénote du dispositif pariétal du reste de la cavité. Les fouilles de H. Breuil, S. Blanc et M. Bourgon, en 1949, puis d’A. Glory de 1960 à 1962, ont fortement modifié la morphologie et le niveau des sols. De plus, de nombreux déblais issus des travaux opérés dans le Passage et l’Abside avaient été évacués dans le Puits, augmentant artificiellement son volume. À la fin des fouilles de l’abbé Glory, on estime que le sol a été abaissé de 0,70 à 3,50 m, selon les secteurs, par rapport au niveau de 1940 (Figure 168). Ces fouilles ont permis, ou la mise au jour de nombreux vestiges archéologiques, d’obtenir le relevé du niveau de sol paléolithique, une dizaine de centimètres sous le niveau de la découverte (Leroi-Gourhan, 1979b).



Figure 168 : Puits, morphologie actuelle en haut (Perazio engineering, 2012) et proposition de restitution de la morphologie de 1940 (projet MicroPaGO, d’après 3D Perazio engineering, 2012).

9. Conclusion

La grotte de Lascaux a vécu de nombreuses modifications de sa morphologie, en particulier en ce qui concerne les sols, mais également dans la configuration de son entrée, que ce soit par des évènements naturels entre le Paléolithique récent et sa redécouverte en 1940, ou par l'action anthropique depuis cette date. On ne peut évidemment que déplorer qu'aucune étude pluridisciplinaire n'ait été menée avant les premiers travaux (1947) puis ceux de 1957-58, mais les coupes réalisées par l'abbé Glory à ces occasions, ainsi que les vestiges qu'il aura pu sauver de ces travaux sont de précieux indices quant à la fréquentation préhistorique du site. Ces données ont été étudiées par l'ensemble des projets s'intéressant à la configuration préhistorique des lieux (Leroi-Gourhan et Allain dir., 1979 ; Aujoulat, 2002, 2004 ; Glory, 2008) et servent de base aux propositions de reconstitution virtuelle de la morphologie paléolithique du site (projet MicroPaGO, dir. D. Lacanette, Lacanette *et al.*, 2018). Ces travaux, encore en cours concernant la reconstitution paléolithique du site, nous ont permis de disposer d'une base de travail pour nos simulations numériques, ainsi que des éléments nécessaires à un regard critique sur ces hypothèses de reconstitution.

C. Influence de l'éclairage sur la distinction des couleurs

« On voit très bien avec très peu de lumière, c'est une question d'adaptation. Moi, j'ai fait l'expérience avec trois bougies posées sur le sol de la Salle des Taureaux. Au bout d'une heure d'obscurité totale, on voit toute la composition générale, tous les détails, sans aucun problème. On voit très bien la gravure avec une bougie. C'est même beaucoup plus impressionnant avec une bougie, parce que la flamme bouge et fait bouger l'animal. À Lascaux, moins il y a d'éclairage, plus les animaux sont impressionnants, plus contrastés. » (J. Marsal, propos recueillis dans Delluc et Delluc, 2003, p. 305).

Cette citation de J. Marsal, guide et co-inventeur de la grotte de Lascaux permet de souligner l'importance de l'éclairage dans l'appréciation du dispositif pariétal, et ce n'est pas un hasard si l'une des plus importantes études sur les lampes à graisse a eu lieu à Lascaux, où au moins 36 lampes à graisse ont été découvertes (Delluc et Delluc, 1979a). L'absence de preuve de présence de torches (comme des mouchages par exemple) ne peut cependant pas exclure l'utilisation de ce type d'éclairage à Lascaux. Les modalités d'utilisation des lampes à graisse et éventuelles torches sont cependant restées du domaine de l'inconnu car aucune expérimentation sur le site n'a été, à notre connaissance, réalisée. Pourtant, de nombreuses questions peuvent être soulevées concernant le dispositif d'éclairage de Lascaux : les nombreuses lampes découvertes sur le site sont-elles le produit d'une accumulation ou la preuve d'un dispositif complexe ? Les lampes à graisse permettent-elles d'éclairer les ensembles monumentaux tels que la Salle des Taureaux ? L'utilisation de torches pouvait-elle apporter des informations visuelles supplémentaires ? L'éclairage naturel atteignait-il les premières peintures ? Les éclairages préhistoriques permettaient-ils de percevoir les riches nuances de couleurs que présentent les œuvres peintes de la cavité ? Quel éclairage semble le plus adapté à l'observation des figures peintes ? Des gravures ? Des palimpsestes ?

Devant le nombre de potentielles questions et l'ampleur du modèle 3D à notre disposition, nous avons sélectionné une question permettant d'aborder la problématique de l'éclairage à Lascaux et de son influence sur l'organisation du dispositif pariétal : Quelle est l'influence de l'éclairage sur la perception des couleurs et des espaces ?

L'éclairage influence la couleur perçue de deux façons : d'une part le spectre émis par le dispositif lumineux influe sur le spectre réémis par l'objet éclairé, et d'autre part, selon la luminosité ambiante, la sensibilité de l'œil aux couleurs varie. Une luminosité très faible (inférieure à $0,001 \text{ cd/m}^2$) n'active que des cellules insensibles aux couleurs mais qui permettent une vision plus large et plus sensible aux contrastes d'intensité et aux mouvements. Une luminosité forte (à partir de 10 cd/m^2), au contraire, permet une meilleure vision des nuances de couleurs. Enfin, une luminosité intermédiaire (entre $0,001$ et 10 cd/m^2) permet de percevoir les couleurs, mais de manière déformée, assombrie (par exemple le rouge devient bordeaux sombre). D'autre part, plus l'environnement s'assombrit, plus la sensibilité spectrale se décale du vert-jaune (lors d'un éclairage puissant) vers le bleu (effet Purkinje), jusqu'à ce que l'ensemble des cônes de la rétine soient inactifs et qu'il soit impossible de distinguer des couleurs (pour plus de détails, voir Section 2.1.A.2. *Le récepteur : l'œil humain*). Cette influence de l'éclairage sur la perception des couleurs va amener notre première question : « Dans quelle mesure l'éclairage utilisé (lampe à graisse ou torche) influence-t-il sur la perception des couleurs ? ».

1. Méthode

Pour répondre à cette question, nous avons réalisé des simulations d'éclairages avec *Phanie* dans le Diverticule Axial, un secteur riche en peintures de couleurs variées. Nous avons utilisé le modèle 3D retravaillé pour présenter l'état des sols de 1940, puis nous avons posté l'éclairage à environ 1,60 m du sol et la caméra à environ 1,65 m de hauteur. Cinq éclairages ont été testés :

- La lampe 3A, composée d'une mèche en amadou et de graisse de bœuf, cette lampe présente un spectre orange tirant vers de l'orange clair, et dispose d'un éclairage moyen parmi les lampes que nous avons produites.
- La lampe 1B, composée d'une mèche en amadou et de graisse de cheval, cette lampe est la plus puissante enregistrée, et son spectre se situe à l'extrémité orangée parmi les spectres des lampes à graisses (donc vers de l'orange plus rouge).
- Les torches 2, 3 et 4, qui présentent un spectre moyen (aucune différence importante n'avait été mise à jour parmi les torches, voir Section 2.1.E.4. *Données spectrales*), la torche 2 étant la moins puissante, et la torche 4 la plus puissante.

Toutes les observations ont été réalisées dans le noir, sur un écran calibré et auprès des images originelles produites par *Phanie*, et disponibles en Annexe 14. Pour plus de confort pour le lecteur, des images observables dans une pièce éclairée seront proposées dans la suite du manuscrit. Cependant, les ombres de ces images sont plus marquées que dans l'originale.

Enfin, avant de présenter nos résultats, il nous semble utile de rappeler que les couleurs présentes sur le modèle 3D ne sont pas exactement celles de la grotte réelle, encore moins au moment de la réalisation des œuvres. En effet, nous savons que d'une saison à l'autre, en fonction de l'état d'hydratation des parois, les couleurs peuvent présenter des intensités différentes (Berrouët, 2009). D'autre part, les événements climatiques qu'a vécus la cavité au cours des derniers millénaires a pu altérer les pigments. Nous avons donc une version des motifs du Diverticule Axial, certes bien préservée, mais pas identique à ce que les Paléolithiques ont pu connaître.

2. Résultats

a) *Panneau des Chevaux Chinois – Vache Rouge à Tête Noire et Troisième Cheval Chinois*

Ces deux figures occupent la partie droite du Panneau des Chevaux Chinois (Aujoulat, 2002) et présentent trois couleurs, bien distinctes : le noir, le rouge, et le jaune (Figure 169), utilisées en aplat pour le corps, et en lignes ou en ponctuations pour les contours des corps. Des dégradés sont également présents entre ces différents aplats (du rouge vers le noir dans la vache, et du jaune vers le noir dans le cheval mais aussi pour ce dernier du rouge inclut dans du jaune) ainsi qu'entre l'aplat rouge et un espace dénué de couleur, soit la « couleur » de la calcite, au sein de la vache.



Figure 169 : Panneau des Chevaux Chinois – Vache Rouge à Tête noire et Troisième Cheval Chinois, prise de vue de la simulation avec un éclairage blanc (modèle 3D Perazio Engineering, 2012).

L'éclairage à la lampe 3A ne permet pas d'éclairer l'ensemble de ces deux figures : une ombre couvre le haut du panneau, et en particulier semble suivre la ligne d'aplat de couleur rouge du haut de la vache (Figure 170). De ce fait, le signe à l'intérieur de la vache n'est pas visible. En termes de visibilité des couleurs, si le noir se distingue bien, la couleur rouge semble brune et le jaune du cheval prend la couleur de l'ombre de la paroi, créant un contraste avec celle-ci.

L'éclairage à la lampe 1B produit également une ombre, mais celle-ci est moins marquée. Si elle suit encore la limite supérieure de l'aplat de couleur rouge, les traits figurant le dos de l'animal et les signes rouges sont alors visibles. De même que pour la lampe 3A, les couleurs sont déformées : le rouge est brun et le jaune est jaune foncé, ou marron clair. Les nuances de couleur à l'intérieur des aplats, dues à des dégradés et mélanges, sont perceptibles, mais seul le noir tranche nettement (Figure 170).

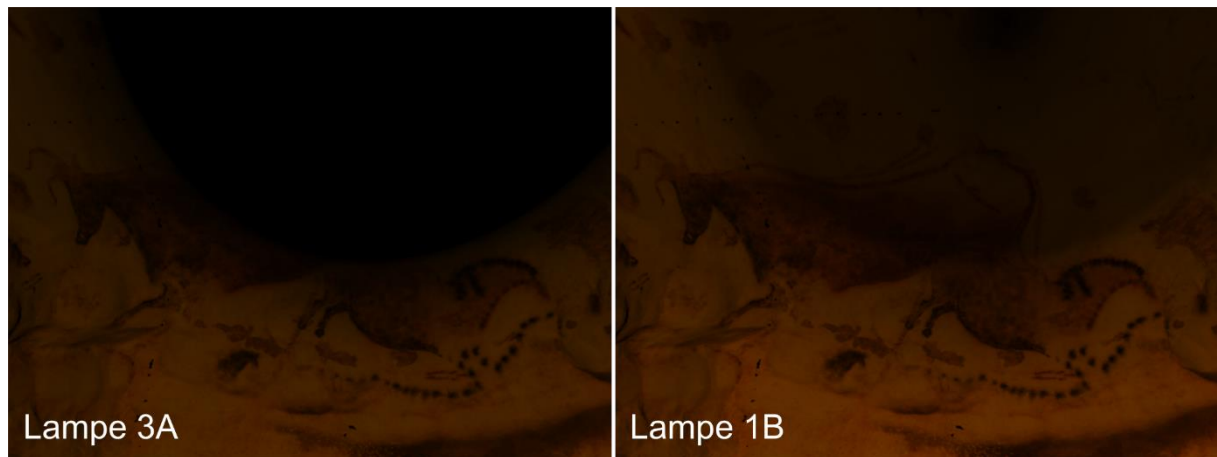


Figure 170 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d’illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Diverticule Axial Perazio Engineering, modifié par l’équipe MicroPaGO : simulation d’éclairage avec une lampe à graisse de type 3A (à gauche) ou de type 1B (à droite) sur la Vache Rouge à Tête Noire et le Troisième Cheval Chinois. Distance entre la caméra et la paroi d’environ 1,70 m. Saturation de 30 000.

Avec l’éclairage produit par les torches, l’ensemble des détails sont visibles, les couleurs sont également plus faciles à nommer : rouge (plus la torche est puissante, moins le rouge semble brun) et jaune foncé, et les dégradés bien visibles, les couleurs semblent moins homogènes qu’avec les lampes à graisse (Figure 171).

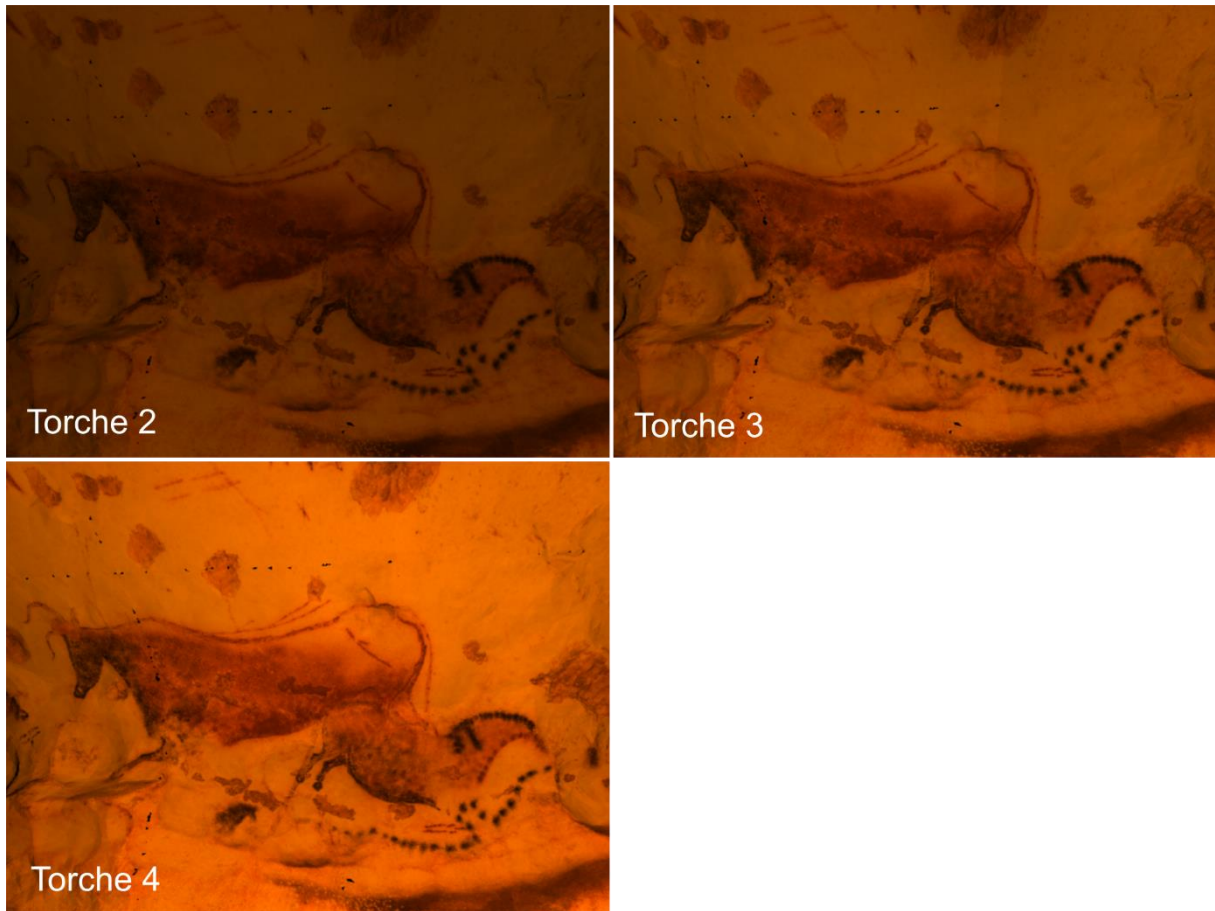


Figure 171 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Diverticule Axial Perazio Engineering, modifié par l'équipe MicroPaGO : simulation d'éclairage avec les torches de types 2, 3 et 4 sur la Vache Rouge à Tête Noire et le Troisième Cheval Chinois. Distance entre la caméra et la paroi d'environ 1,70 m. Saturation de 10 000.

a) *Panneau de la Vache Tombant – Vache Rouge et Noire et Frise de Chevaux*

Cette partie du Panneau de la Vache Tombant est constitué de la Vache Rouge et Noire, dont la disposition des pattes l'a qualifiée de vache tombant ou sautant (Aujoulat, 2002), et d'une frise de chevaux polychromes : nuances de rouges et de bruns, noirs, jaune et noir. À l'avant de la vache prend place un signe quadrangulaire rouge (Figure 172). L'intérêt de cette frise se situe dans les nombreuses variantes de rouges, de bruns, de noirs et de jaunes présents : ces nuances sont-elles visibles avec un éclairage paléolithique ?



Figure 172 : Panneau de la Vache Tombant – Vache Rouge et Noire et frise de petits chevaux, prise de vue de la simulation avec un éclairage blanc (modèle 3D Perazio, 2012).

L'éclairage à la lampe à graisse, quel que soit le modèle utilisé, permet de visualiser l'ensemble des motifs de ce panneau (Figure 173). La lampe 3A produit des couleurs plus foncées que la lampe 1B. Ainsi, le signe quadrangulaire paraît brun sous la lampe 3A et rouge-brun sous la lampe 1B. Quelle que soit la lampe testée, la patte arrière gauche de la vache peinte en noir à l'intérieur du corps rouge, est curieusement peu visible, et les trois premiers chevaux de la file semblent bruns, de la même couleur que la tache de la vache. Le quatrième cheval paraît noir et le dernier jaune et noir, bien que la notion de « jaune » soit là encore à nuancer : la couleur ressemble à du marron clair.



Figure 173 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Diverticule Axial Perazio, modifié par l'équipe MicroPaGO : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 3A (à gauche) ou de type 1B (à droite) sur la Vache Tombant et la frise de petits chevaux. Distance entre la caméra et la paroi d'environ 2 m. Saturation de 30 000.

L'éclairage à la torche permet une meilleure appréciation des détails et des nuances de couleur. Ainsi, la patte arrière gauche de la vache est bien visible, la tache rouge sur son corps facile à délimiter, et des nuances de couleurs sont observables sur la robe des chevaux : brun, brun foncé, rouge foncé, noir et jaune foncé. De la torche 2 (la moins puissante) à la torche 4, ces nuances sont de plus en plus faciles à observer (Figure 174).

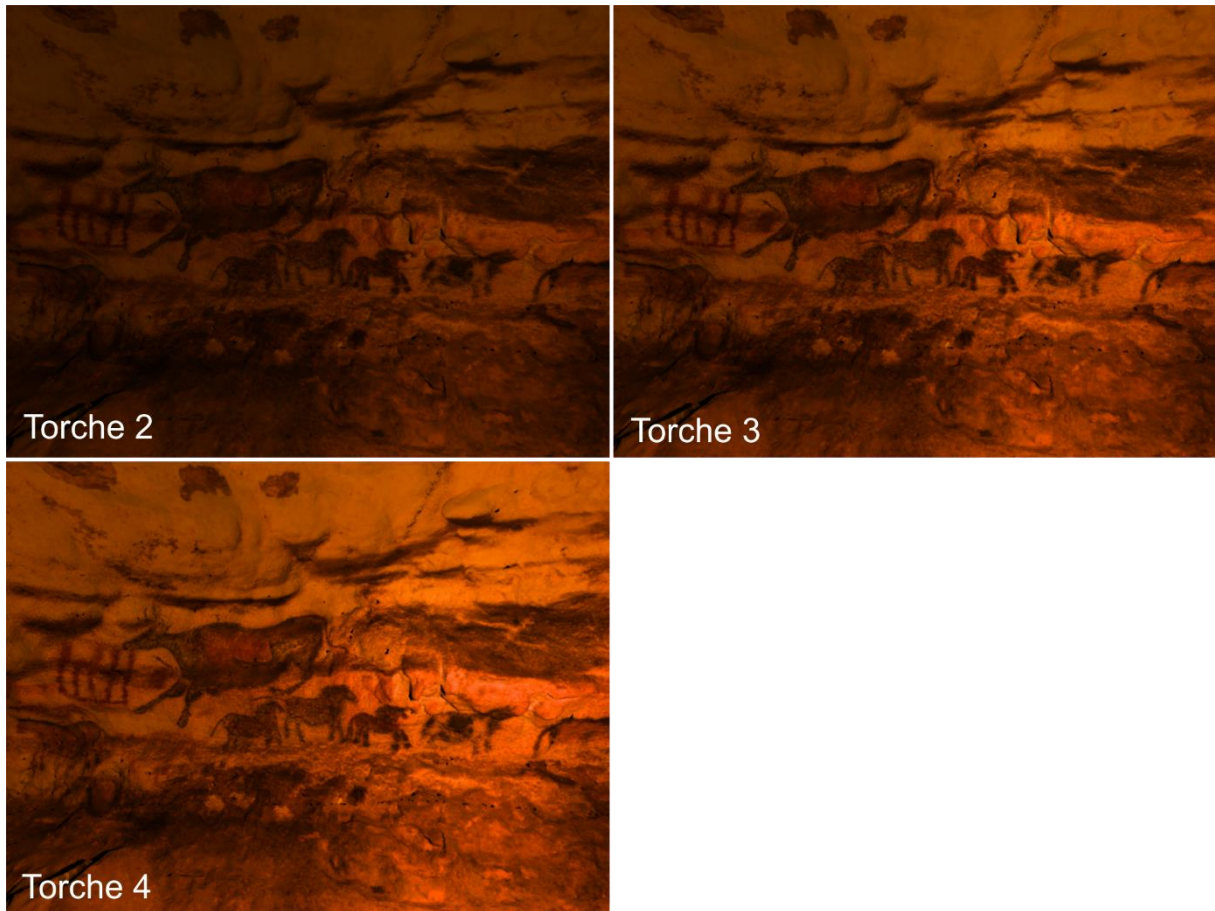


Figure 174 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d’illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Diverticule Axial Perazio Engineering, modifié par l’équipe MicroPaGO : simulation d’éclairage avec les torches de types 2, 3 et 4 sur la Vache Tombant et la frise de petits chevaux. Distance entre la caméra et la paroi d’environ 2 m. Saturation de 10 000.

b) Panneau de la Vache Tombant – diptyque des Bouquetins Affrontés

Le Panneau de la Vache Tombant comporte, dans son volet gauche, un ensemble constitué de deux bouquetins affrontés, l’un noir et l’autre jaune, entre lesquels figure un signe quadrangulaire rouge. Ils sont associés à une série d’équidés, ceux situés à gauche du premier bouquetin sont incomplets l’un rouge et l’autre rouge et noir. Le second bouquetin est accompagné de chevaux rouge bruns complets. (Figure 175 ; Aujoulat, 2002). Les deux bouquetins sont peints par des contours en pointillés soufflés, le signe est dessiné au trait, et nous avons souhaité vérifier si ces délimitations sans aplats de remplissage, en particulier en ce qui concerne le bouquetin jaune, sont malgré tout discernables avec un éclairage paléolithique.



Figure 175 : Panneau de la Vache Tombant – diptyque des Bouquetins Affrontés, prise de vue de la simulation avec un éclairage blanc (modèle 3D Perazio, 2012)

L'éclairage à la lampe à graisse 3A n'atteint pas les hauteurs du panneau, ce qui rend invisible les chevaux situés au-dessus des bouquetins. Les autres motifs, à savoir les deux bouquetins, le signe quadrangulaire, le cheval de gauche et le cheval de droite sont tous perceptibles (Figure 176). L'ombre est moins marquée dans le cas de la lampe 1B, ce qui permet aux chevaux d'être tous visibles, mais les détails et couleurs des chevaux situés au-dessus des bouquetins ne sont pas perceptibles. Les chevaux de ce panneau sont situés à peu près à la même hauteur depuis le sol actuel que la Vache Rouge et Noire du Panneau de la Vache Tombant, mais cette dernière est située face à un ressaut du sol reconstitué, ce qui permet à l'éclairage d'être porté plus haut, et donc d'éclairer l'ensemble de la scène (Figure 173).

Quelle que soit la lampe à graisse utilisée, la perception des couleurs est très modifiée, le rouge paraît brun, et le jaune prend la même couleur que l'ombre des parois. Le bouquetin jaune est alors essentiellement perçu grâce au contraste produit sur la paroi, plus claire, comme s'il s'agissait d'une ombre de la forme d'un bouquetin.

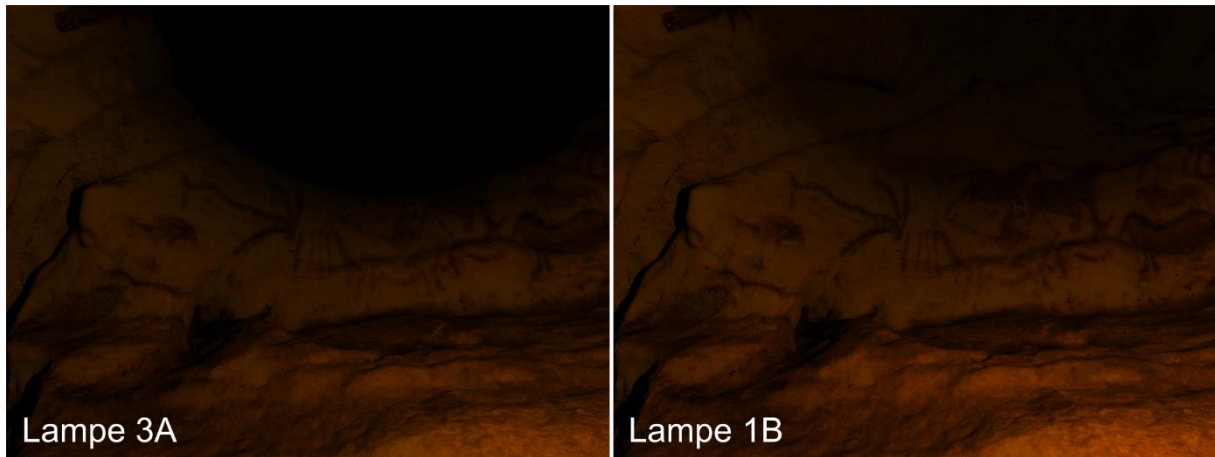


Figure 176 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d’illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Diverticule Axial Perazio, modifié par l’équipe MicroPaGO : simulation d’éclairage avec une lampe à graisse de type 3A (à gauche) ou de type 1B (à droite) sur le diptyque des Bouquetins Affrontés. Distance entre la caméra et la paroi d’environ 2,50 m. Saturation de 30 000.

L’éclairage produit par les torches (Figure 177) permet dans tous les cas de visualiser l’ensemble des entités graphiques, y compris les plus hautes. Les couleurs sont tout de même difficiles à identifier, le rouge semble brun, et le jaune prend ici encore la couleur des ombres de la paroi. Cependant, plus la torche est puissante (T4), plus il est facile de distinguer les nuances de couleur.

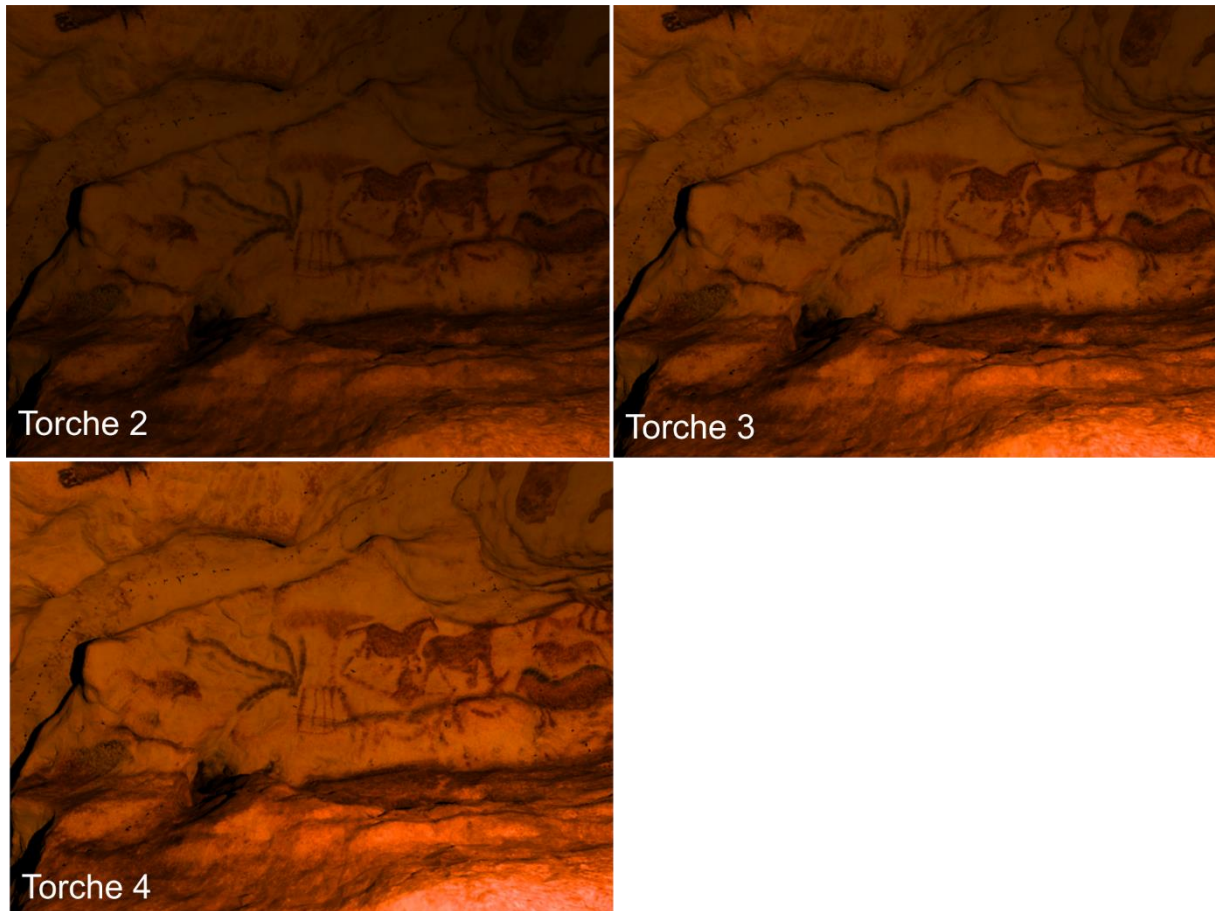


Figure 177 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Diverticule Axial Perazio, modifié par l'équipe MicroPaGO : simulation d'éclairage avec les torches de types 2, 3 et 4 sur le diptyque des Bouquetins Affrontés. Distance entre la caméra et la paroi d'environ 2,50 m. Saturation de 10 000.

c) Panneau du Grand Taureau Noir –Taureau Noir, Vaches Rouges et Protomés d'Aurochs Jaunes

Ici, un grand taureau noir domine l'espace graphique du volet gauche du panneau, qui pourtant contient plusieurs figures. Tout d'abord, deux vaches, peintes par aplat rouge, sont superposées à l'aplat noir du corps du taureau. Quatre protomés d'aurochs dessinés en jaune pré-existaient, alignés au-dessus des vaches toujours dans l'aplat noir de l'animal. Ces têtes à la délinéation fine sont difficilement perceptibles à l'éclairage moderne (Aujoulat, 2002). Enfin, juste en avant du taureau, un motif en « trident » noir est superposé à un cheval jaune (Figure 178). Nous avons ici essentiellement souhaité vérifier la visibilité de la vache rouge et des têtes jaunes sur le taureau noir.



Figure 178 : Panneau du Grand Taureau Noir – détail du Grand Taureau, accompagné d’une Vache rouge et de quatre protomés d’Aurochs Jaunes, prise de vue de la simulation avec un éclairage blanc (modèle 3D Perazio, 2012).

Lorsqu’éclairée par une lampe à graisse, cette scène présente une ombre qui couvre toute la partie supérieure du panneau (Figure 179), et épouse parfaitement le dos du grand taureau, depuis sa corne de droite. Cette ombre est particulièrement épaisse dans la simulation par la lampe 3A, et si les traits noirs qui forment le haut du dos de l’animal sont visibles, les traits jaunes formant les protomés ne sont pas apparents. La vache rouge est visible mais semble brune, et, surtout, l’aplat formant sa tête, plus foncé, est difficile à distinguer du noir du taureau. Les détails de ce dernier, ainsi que le cheval jaune et le signe en trident sont facilement observables.

La lampe à graisse 1B produit une ombre moins sombre, ce qui laisse plus facilement entrevoir les lignes du dos du taureau, ainsi que les lignes des protomés qui dépassent du taureau noir, bien que ces dernières restent difficiles à déchiffrer (Figure 179).

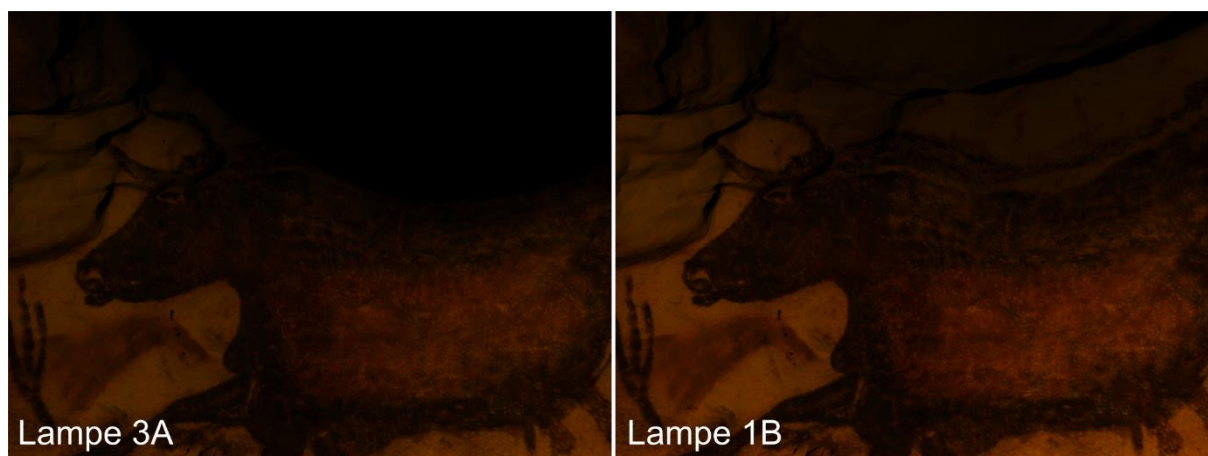


Figure 179 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Diverticule Axial Perazio Engineering, modifié par l'équipe MicroPaGO : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 3A (à gauche) ou de type 1B (à droite) sur le Grand Taureau Noir, accompagné d'une Vache Rouge et de quatre Protomés d'Aurochs Jaunes. Distance entre la caméra et la paroi d'environ 1,20 m. Saturation de 30 000.

L'éclairage des torches permet d'éclairer l'ensemble de ce panneau, y compris les Protomés Jaunes, bien que comme précédemment, les lignes à l'intérieur du Grand Taureau Noir soient beaucoup plus difficiles à discerner que les lignes qui s'en extraient (Figure 180). Enfin, de la torche 2 (la moins puissante) à la torche 4 (la plus puissante), les couleurs sont de plus en plus visibles, la Vache Rouge et les Protomés Jaunes deviennent alors plus faciles à distinguer du Grand Taureau. Le signe en trident et le cheval jaune sont toujours aisément perçus.

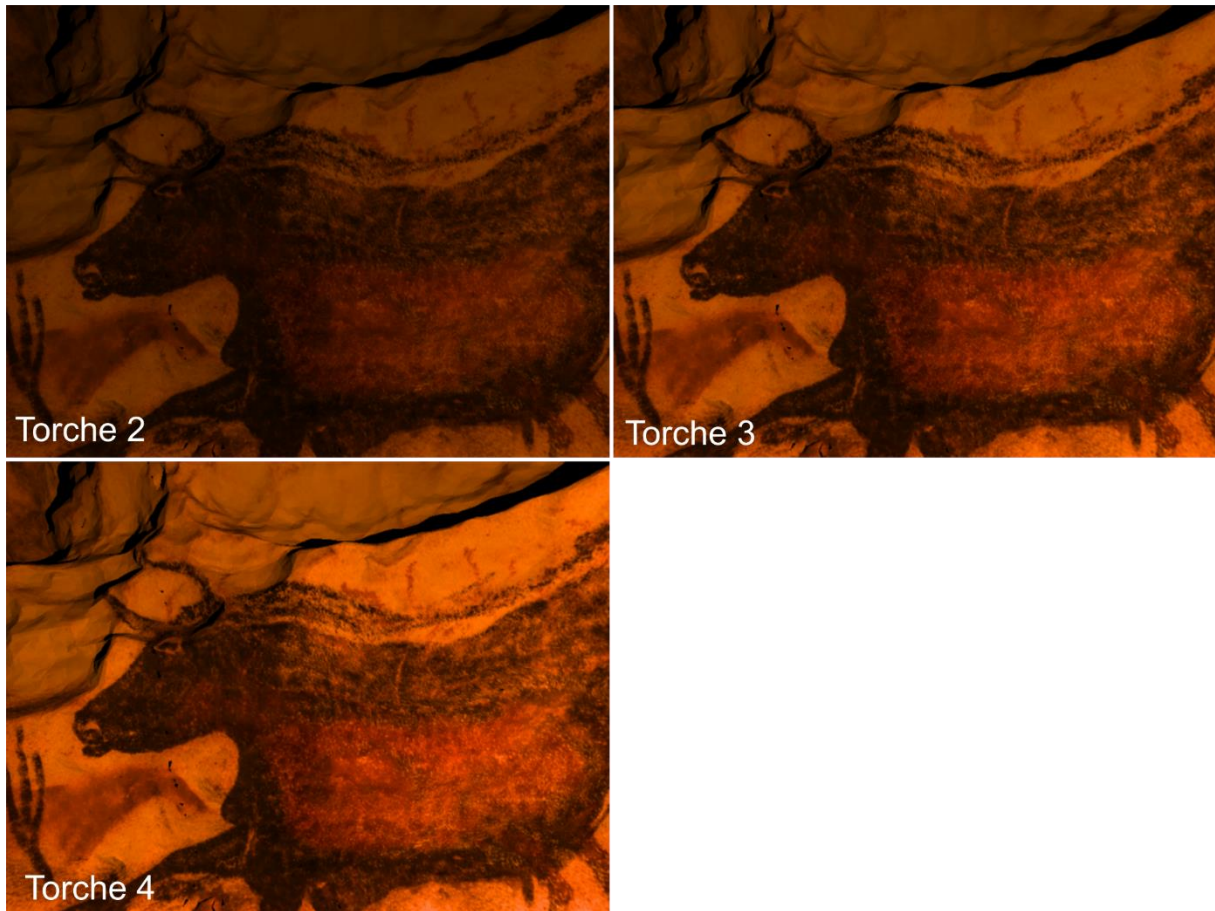


Figure 180 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d’illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Diverticule Axial Perazio Engineering, modifié par l’équipe MicroPaGO : simulation d’éclairage avec les torches de types 2, 3 et 4 sur le Grand Taureau Noir, accompagné d’une Vache Rouge et de quatre Protomés d’Aurochs Jaunes. Distance entre la caméra et la paroi d’environ 1,20 m. Saturation de 10 000.

3. Discussion

Avant de discuter et d’interpréter nos résultats, il semble ici important de préciser que les interprétations de ces observations ne peuvent être transposées à d’autres secteurs de la grotte, encore moins à d’autres cavités, car elles sont étroitement liées aux distances entre la caméra, le luminaire et la paroi, ainsi qu’au comportement optique de cette dernière. En effet, nous avons par exemple pu observer que la couleur jaune produit une sensation d’ombre sur la paroi car cette couleur reproduit la couleur d’une ombre sur cette paroi très claire, mais le contraste sur une paroi plus ocrée pourrait ne pas être suffisant pour que cette couleur soit visible.

Bien que déformées (assombries), ce qui était prévisible dans des conditions d'éclairage si faibles, les couleurs sont visibles quel que soit le luminaire utilisé. Les nuances semblent surtout différenciables lorsque placées côte à côte : par exemple les dégradés des aplats de la Vache Rouge à Tête Noire et du Troisième Cheval Chinois sont visibles quel que soit l'éclairage tandis que les nuances dans la robe des chevaux de la Frise de Chevaux ne le sont pas (en particulier avec les lampes à graisse).

Les torches, à l'éclairage plus puissant, permettent de mieux observer les nuances de couleurs et détails des motifs et figures, cependant, dans un couloir aussi étroit, on peut mettre en doute que ce luminaire soit le mieux adapté (surexposition de l'observateur et production de fumée pourraient gêner l'observation). D'autre part, si l'observation de ces panneaux peut se faire assez rapidement, leur création a pu demander un temps assez long, ce qui rajoute aux inconvénients précédents la durée de vie limitée des torches (telles que nous les avons conçues, les torches durent environ une demi-heure, mais il est possible que d'autres techniques permettent d'en allonger la durée de vie).

Les lampes à graisse, par leur faible portée, produisent des ombres qui soulignent les contours de certaines figures (par ex. le Grand Taureau ou la Vache Rouge à Tête Noire), et la lampe de type 1B semble à cet égard particulièrement intéressante, car assez puissante pour laisser entr'apercevoir les détails des lignes présentes dans l'ombre, contrairement à la lampe 3A. Nous pouvons alors nous demander dans quelle mesure ces ombres ont pu servir à mettre en scène ou encadrer les panneaux ? Cependant, dans certains cas, l'ombre occulte une partie des figures (notamment les chevaux au-dessus des bouquetins affrontés dans le panneau éponyme). Est-ce dû à l'utilisation d'un autre type de luminaire (telles les torches) ? On ne peut pas non plus exclure l'utilisation simultanée de plusieurs lampes à graisse, ou de lampes aux propriétés éclairantes différentes des nôtres (nous avons en particulier pu observer une dissimilitude dans le rendu entre nos deux lampes, dont la seule différence réside dans la nature de la graisse utilisée). Il est également possible que le placement de la lampe ait une importance non négligeable : nous avons placé la lampe à 1,60 m du sol, soit légèrement plus bas que la tête d'un potentiel observateur, mais ce n'était peut-être pas la façon de procéder des Paléolithiques. De plus, nous avons utilisé la reconstitution du sol présumé de 1940, le sol paléolithique n'étant probablement situé que quelques centimètres plus bas, mais nous avons peut-être sous-estimé les modifications du sol entre le Magdalénien initial et 1940 en certains endroits.

Partie 3 – Envisager l'humain dans son contexte, L'apport des simulations

Enfin, il nous faut noter que le mouvement des flammes des luminaires utilisés a peut-être aussi eu un impact sur la visibilité des œuvres, que nous ne pouvons pas estimer avec notre outil. Par exemple, le jaune devait être différenciable des ombres par le simple vacillement des flammes, ce qui n'est pas le cas dans nos simulations.

Si les simulations ne permettent pas de trancher entre l'utilisation de torches ou de lampes à graisse pour éclairer ces panneaux, elles apportent de nouveaux éléments à la compréhension des choix opérés par les Paléolithiques lors de la création du dispositif pariétal.

D. L'accès au Puits

Aujourd'hui, le Puits est le secteur à l'accès le plus difficile de la grotte. Cette dénomination recouvre une réalité qui n'est pas à proprement parlé un puits karstique. Il s'agit d'une diaclase dont l'accès se fait par le haut. Depuis le fond de l'Abside, un passage bas (d'une cinquantaine de centimètres de hauteur sur près de 2 m –Leroi-Gourhan, 1979b, p. 62) mène au sommet d'un surplomb d'environ 6 m. On atteint alors un espace qui correspond à une longue diaclase colmatée d'un éboulis. Au pied de la descente, se trouvent plusieurs motifs dessinés, dont la célèbre Scène du Puits mais sur la paroi gauche figure également un protomé de cheval. Des fouilles archéologiques menées dans un premier temps par H. Breuil et S. Blanc puis par A. Glory ont également démontré la présence d'un riche niveau archéologique dans ce secteur (Blanc, 1948-1950 ; Leroi-Gourhan, 1979b). Ces deux indices valident la présence d'au moins un passage humain dans ce secteur, dont l'accès paléolithique pose cependant question (voir Sous-chapitre 3.2.B. *Lascaux, le contexte physique*).

Nous proposons ici des simulations d'éclairages et de sons dans le secteur de l'extrémité distale de l'Abside afin de mieux comprendre comment la configuration de cet espace était perçue : sa profondeur, l'écartement des parois latérales, la profondeur de la diaclase, c'est-à-dire des informations essentielles pour prévoir le matériel et les moyens nécessaires à la descente puis à la remontée. Cet accès par l'Abside n'est pas la seule hypothèse existante, une ouverture par l'autre extrémité de la Grande Diaclase depuis l'extérieur ayant été proposée (Aujoulat, 2002, 2004), mais nous nous concentrons sur cette première hypothèse car il est certain que ce passage par l'Abside a existé, tandis qu'aucun élément n'a permis, à ce jour, de démontrer une seconde entrée paléolithique.

1. Méthode

Nous avons utilisé le modèle 3D qui propose une hypothèse de reconstitution de l'état des sols de 1940. Le niveau du sol paléolithique était probablement très proche de celui de la découverte (la présence d'artefacts à même le sol ou sous quelques centimètres seulement du sol de la découverte et l'absence d'indice de bouleversement géologique ou de circulations d'eau confortent cette hypothèse), il faut cependant rester prudent quant à cette affirmation dont nos

Partie 3 – Envisager l'humain dans son contexte, L'apport des simulations

simulations sont dépendantes car les témoins archéologiques et géologiques de ce secteur n'ont pas pu bénéficier d'une étude récente à cause de la destruction des sols dudit secteur (effondrement de la casquette d'argile du surplomb, rejets des déblais du Passage, fouilles).

Nous avons réalisé trois simulations d'éclairages et de sons. La première à l'extrémité distale de l'Abside, juste avant un rétrécissement qui mène au secteur d'accès au Puits (Figure 181a). L'émetteur (la source acoustique ou d'éclairage) a été situé à 1,60 m du sol et le récepteur (oreilles ou yeux virtuels) à 1,65 m. La seconde simulation a été réalisée à l'entrée du conduit qui mène au Puits (Figure 181, b) et la troisième au bord du décrochement (Figure 181, c). Ces secteurs sont très bas et il est nécessaire d'y ramper. Pour cela, nous avons placé l'émetteur à 20 cm et le récepteur à 40 cm du sol. Nous avons également pu placer la source de lumière au-dessus du vide, comme si elle était tenue à bout de bras.

Nous avons sélectionné pour les simulations d'éclairages les lampes à graisse 3A et 1B ainsi que la torche 2 (la moins puissante) et la torche 4 (la plus puissante) afin d'avoir un panel d'éclairages diversifiés. Un seul éclairage a été utilisé par simulation car ce secteur est assez réduit, en particulier en ce qui concerne le conduit d'accès au Puits.

Pour l'auralisation, nous avons utilisé un son ponctuel (comme un claquement de doigts) ainsi qu'un son long (ici un chant).

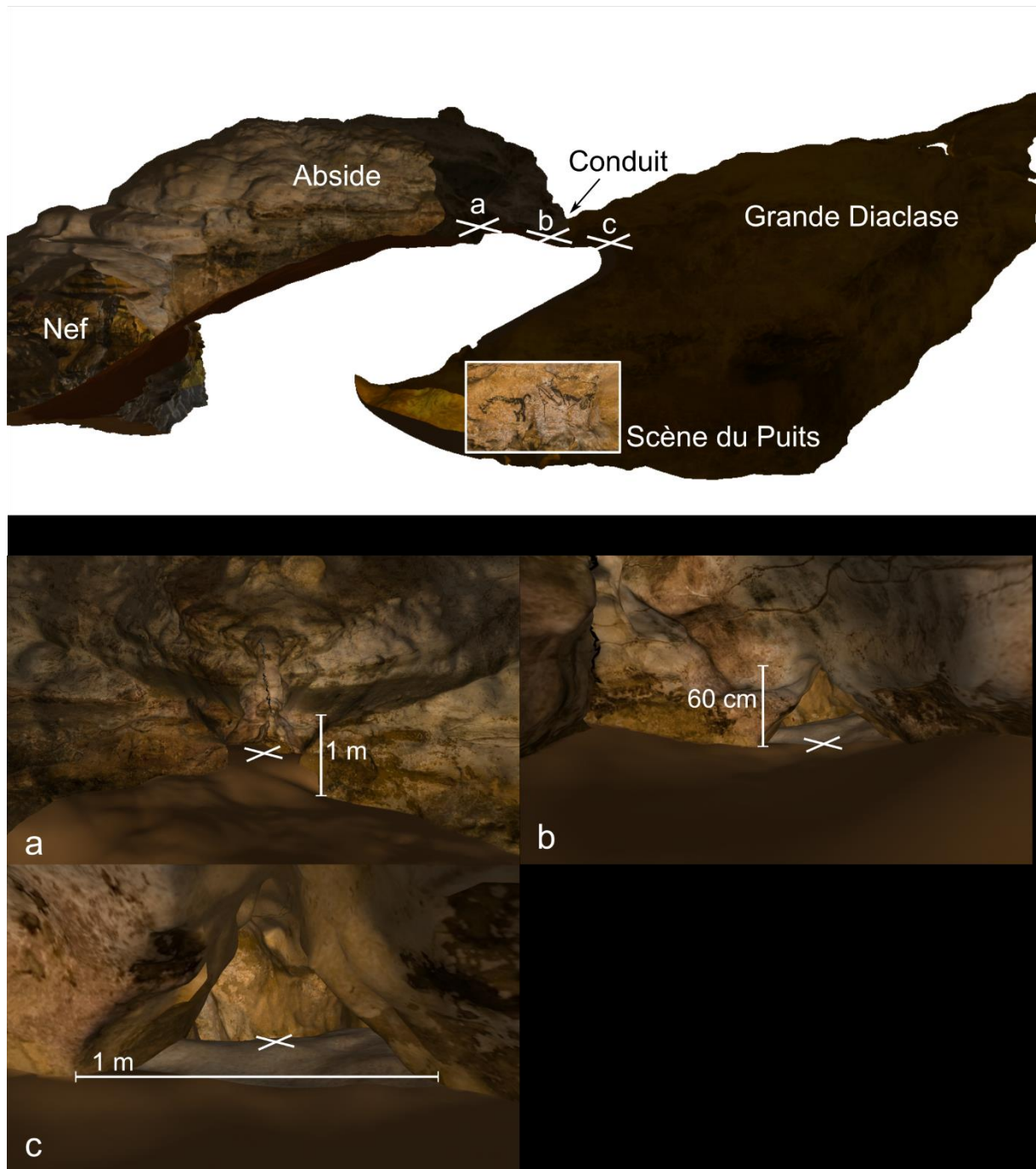


Figure 181 : Emplacement des simulations indiqué par une croix sur le sol de la découverte, en haut, vue de profil de l'Abside et de la Grande Diaclase, en bas, vue depuis l'intérieur du modèle 3D (projet MicroPaGO, Archéovision Production, d'après Perazio engineering, 2012). a) extrémité distale de l'Abside, b) entrée du passage bas qui mène au Puits, c) bord du décrochement qui mène au Puits.

Enfin, nos résultats sont à analyser en prenant en compte les mêmes biais que nos précédentes simulations : nos observations sont dépendantes de l'acuité visuelle de l'observateur (et de son habitude), de son audition dans le cadre des auralisations, mais aussi de son matériel d'écoute ou de son écran.

2. Simulations à l’extrémité distale de l’Abside

a) Simulations d’éclairages

L’éclairage, qu’il soit produit par une lampe à graisse ou une torche permet d’éclairer l’ensemble de la zone (Figure 182). En effet, la réflexion des parois, très blanches et proches de la source, permet y compris au sol d’être éclairé. L’éclairage à la torche produit même une surexposition (Figure 182 c, d). L’accès au secteur du Puits est cependant caché depuis ce point de vue par une avancée de la paroi. Il faut donc dépasser le rétrécissement et s’approcher à moins d’un ou deux mètres de cet accès pour le visualiser. Ainsi la visibilité de cet accès est réduite, mais pour des raisons topographiques et non pas pour des raisons d’éclairage.

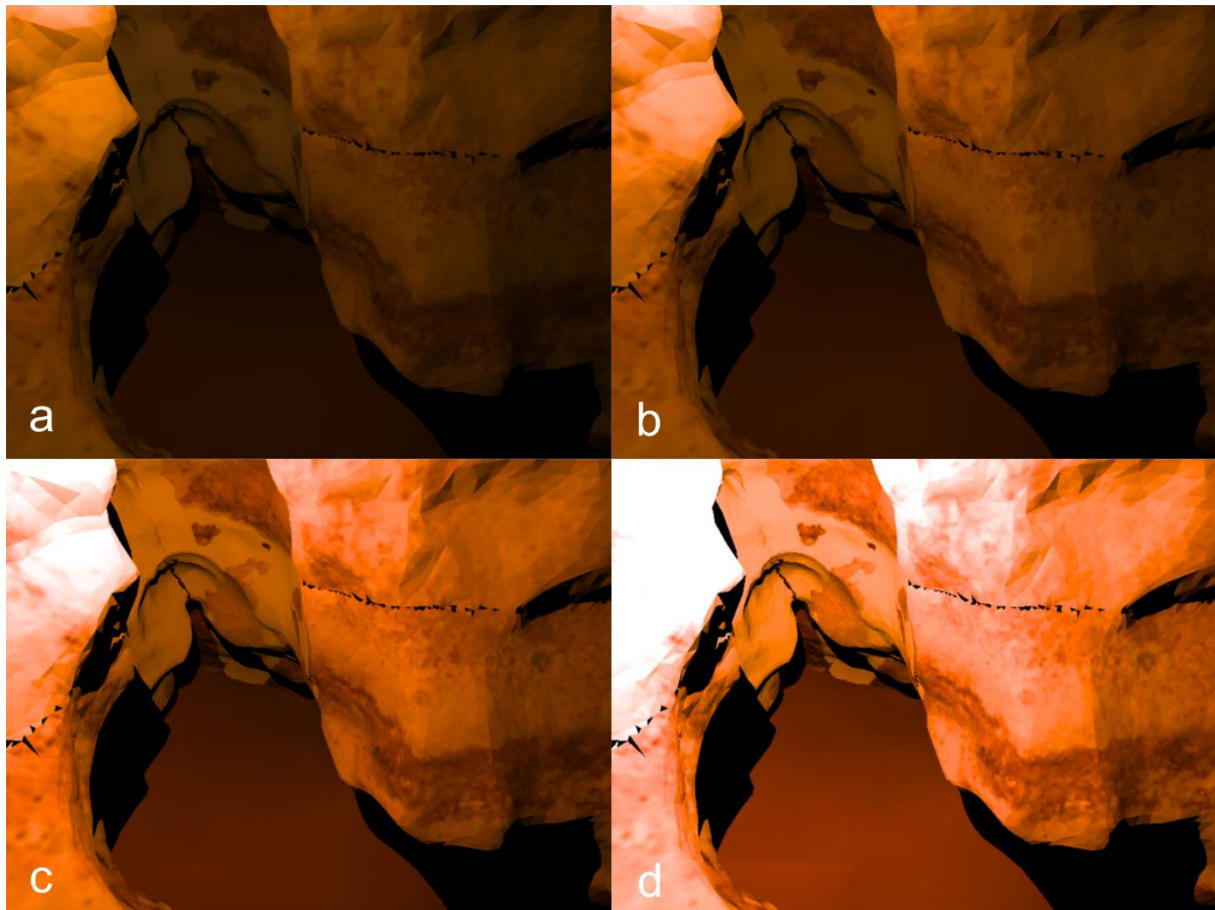


Figure 182 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d’illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique de l’Abside Perazio, modifié par l’équipe MicroPaGO, Archéovision Production (modification du niveau du sol, présenté ici par une surface unie marron). a) simulation d’éclairage avec une lampe de type 3A, saturation de 30 000, b) simulation d’éclairage avec une lampe de type 1B, saturation de 30 000, c) simulation d’éclairage avec une torche de type 2, saturation de 10 000, d) simulation d’éclairage avec une torche de type 4, saturation de 10 000, les images d’origine sont disponibles en Annexe 15.

b) Auralisations

Les auralisations (disponibles en Annexe 16) produisent dans cet espace un son fort et réverbérant, ce qui donne l'impression de se situer dans une salle assez ouverte (de plusieurs mètres de large).

3. Simulations à l'entrée du conduit

a) Simulations d'éclairages

Le secteur immédiat autour de l'observateur et de la source sont visibles en détail, l'utilisation de torches (en particulier du type 4) produisant même une surexposition (Figure 183 c, d). L'utilisation de lampes à graisse (Figure 183, a, b) permet d'observer que la Grande Diaclase se poursuit sur quelques mètres, l'obscurité indiquant une prolongation sur une grande distance, cependant impossible à déterminer. Les torches permettent d'observer la Grande Diaclase sur une plus grande distance, mais la longueur totale reste impossible à déterminer.

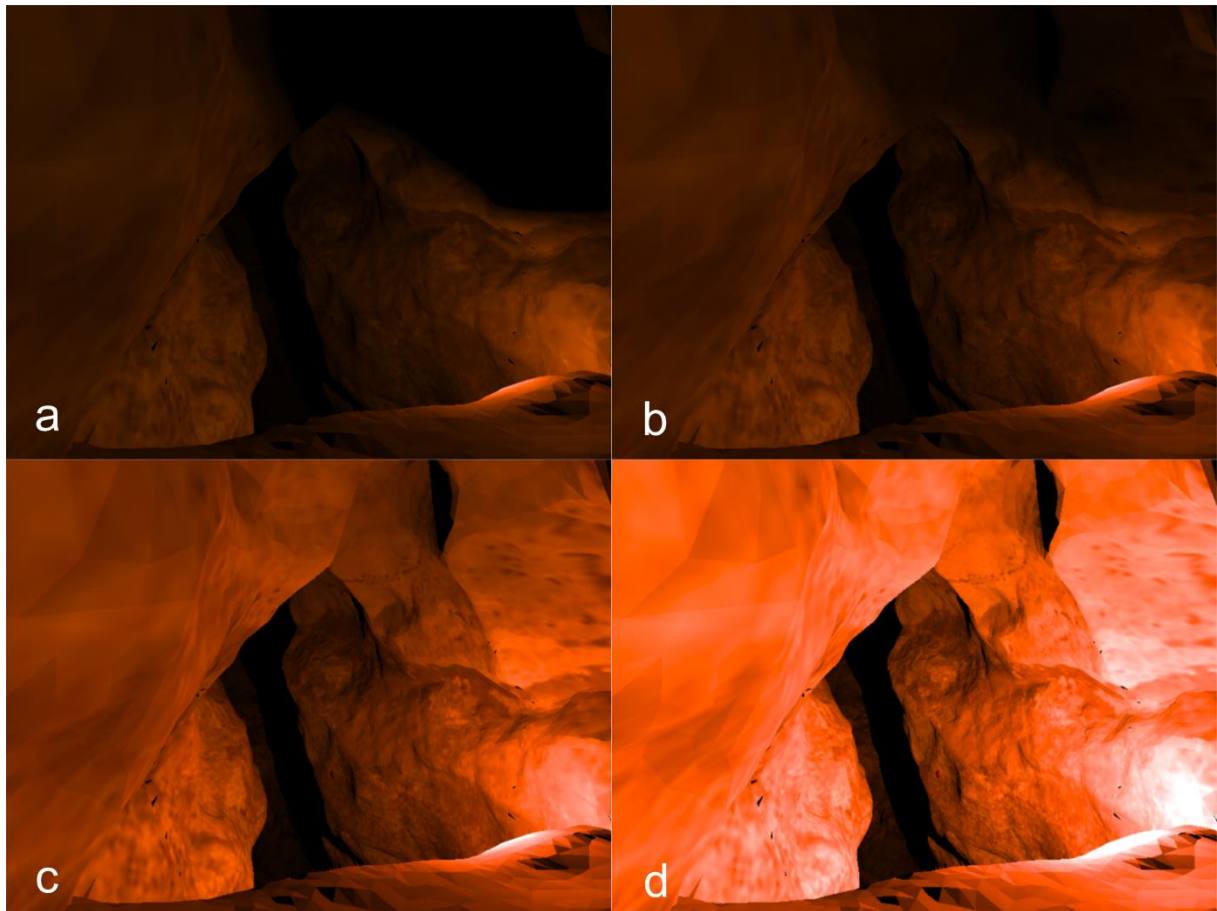


Figure 183 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d’illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique de l’Abside et du Puits d’après Perazio, modifié par l’équipe MicroPaGO, Archéovision Production, a) simulation d’éclairage avec une lampe de type 3A, saturation de 30 000, b) simulation d’éclairage avec une lampe de type 1B, saturation de 30 000, c) simulation d’éclairage avec une torche de type 2, saturation de 10 000, d) simulation d’éclairage avec une torche de type 4, saturation de 10 000, les images d’origine sont disponibles en Annexe 15.

b) Auralisations

Les sons produits par les auralisations produisent également un son fort, mais beaucoup moins réverbérant, plus plat que le précédent, donnant une impression de parois cette fois-ci proches de l’auditeur (Annexe 16).

4. Simulations au bord du décrochement

a) Simulations d’éclairages

Cette dernière série de simulations d’éclairages propose une vision de l’observateur vers le bas, en direction du Puits proprement dit. L’éclairage à la lampe à graisse (Figure 184, a, b) permet

de difficilement entrevoir le sol, mais les parois sont par contre visibles jusqu'au sol, ce qui permet de concevoir la configuration de la descente et d'estimer la profondeur du Puits. Cependant, les détails (profondeur exacte et morphologie précise des parois) ne sont pas visibles. À la torche, l'éclairage permet de concevoir intégralement l'espace puisque les parois sont entièrement visibles jusque dans leurs détails, ainsi que le sol (Figure 184 c, d).

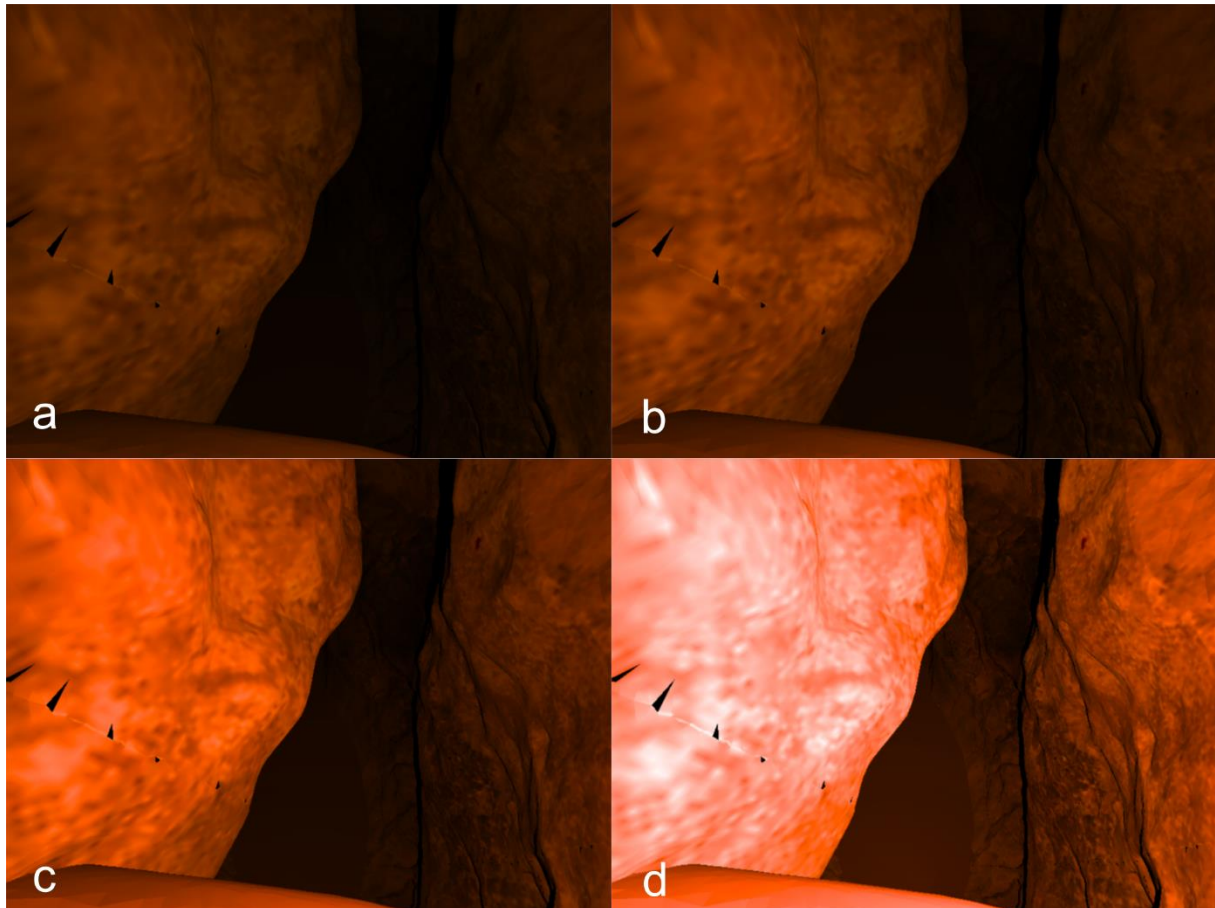


Figure 184 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Puits d'après Perazio, modifié par l'équipe MicroPaGO, Archéovision Production. a) simulation d'éclairage avec une lampe de type 3A, saturation de 30 000, b) simulation d'éclairage avec une lampe de type 1B, saturation de 30 000, c) simulation d'éclairage avec une torche de type 2, saturation de 10 000, d) simulation d'éclairage avec une torche de type 4, saturation de 10 000, les images d'origine sont disponibles en Annexe 15.

b) Auralisations

Les simulations de sons produisent un son faible, qui semble partir au loin, un écho est également audible (Annexe 16), ce qui ajoute une notion de profondeur. L'espace semble s'ouvrir sur une très longue distance.

5. Conclusions

Il ne semble pas y avoir de difficulté particulière à concevoir les espaces étudiés. L’accès au Puits est peu visible, mais pour des raisons de topographie (l’accès est situé à ras du sol, à l’extrémité distale de l’Abside, derrière un rétrécissement de parois) et non d’éclairage. En effet, quel que soit l’éclairage sélectionné, les parois et le sol sont entièrement visibles. Si les torches permettent de percevoir plus facilement les détails, ceux-ci ne sont pas nécessaires pour se déplacer dans l’espace, et la puissance de la torche peut même devenir un inconvénient dans le cas d’une surexposition. Notre expérience avec ce type de luminaire (voir Section 2.1.D.3. *Reproductions en milieu souterrain*) nous a même conduit à penser qu’il pourrait être dangereux (risque de brûlure) d’utiliser une torche dans un secteur si étroit et si bas. La profondeur du Puits n’est pas entièrement perceptible uniquement équipé d’une lampe à graisse, mais d’aucuns pourraient imaginer que les Préhistoriques pouvaient laisser tomber un luminaire (lampe ou brin de torche) pour éclairer la chute et ainsi estimer la profondeur. L’écholocalisation pourrait également aider à en déterminer la profondeur. Les nettes différences entre les sons produits dans ces secteurs pourtant peu éloignés ont pu être une aide pour le visiteur préhistorique, possiblement plus expérimenté que nous, qui ne pouvons aller au-delà d’une perception très générale de l’espace. En particulier, une personne entraînée pourrait peut-être percevoir la profondeur du Puits et la longueur de la Grande Diaclose, difficiles à estimer équipés d’une lampe à graisse.

Si nos simulations ne résolvent pas la problématique de l’accès au Puits, elles permettent d’avancer l’hypothèse que la configuration de ce secteur devait être aisément comprise et appréhendée par les Paléolithiques, et que sa perception n’était pas un frein à son exploration.

E. Étude acoustique de Lascaux

La présence de dômes à la voûte de plusieurs secteurs de la grotte, et notamment dans certains des plus ornés (Salle des Taureaux, Nef, Abside), a naturellement amené à penser la grotte comme propice à la musique, en témoignent les fréquents concerts qui sont organisés dans les fac-similés Lascaux II et IV. Les caractéristiques acoustiques de la cavité ont également été questionnées au travers de deux études (Waller, 1993 ; Commins *et al.*, 2020) peuvent porter le flanc aux critiques puisque les mesures de réponses impulsionnelles, qui sont à la base des résultats, ont été réalisées dans la grotte de Lascaux et dans le fac-similé Lascaux IV, or ni l'une ni l'autre ne présente une morphologie semblable à celle connue par les Préhistoriques : la grotte actuelle a subi de nombreux aménagements lors des différents travaux qui y ont été menés (décaissement des sols ou mise en place de barrières pour délimiter la circulation, par exemple) tandis que le fac-similé Lascaux IV est basé sur cette morphologie modifiée, réaménagée afin de faciliter la circulation du public et sa sécurité (p. ex. élargissement ou réorganisation de certaines galeries). Ces deux articles tendent à montrer une qualité acoustique exceptionnelle à Lascaux, avec des animaux placés aux endroits les plus réverbérants.

Dans l'étude qui va suivre, nous proposons dans un premier temps une analyse comparée du TR (Temps de Réverbération), de la clarté C80 et de la définition D50 simulés dans les modèles 3D reconstituant l'état de la grotte de Lascaux à différents moments de son histoire : la Salle des Taureaux actuelle, en 1940 (à sa découverte), et lors de l'incursion paléolithique, et le Passage et l'Abside selon leurs morphologies actuelles et de 1940 (les reconstitutions de l'état de la cavité en 1940 et au Paléolithique sont issues d'hypothèses proposées par l'équipe du projet MicroPaGO, dir. D. Lacanette). Nous avons sélectionné ces trois secteurs car ils ont été fortement modifiés depuis leur découverte, en particulier en ce qui concerne la morphologie et la hauteur des sols, mais aussi le secteur de l'Entrée, en continuité avec la Salle des Taureaux (p. ex. des murs ont été bâtis pour cloisonner l'entrée, les sas et la Salle des Taureaux, l'ensemble étant évidemment en continuité au moment de sa découverte et prolongé d'un porche au Paléolithique). Dans un second temps, nous proposons d'analyser les résultats issus des simulations sur les modèles les plus proches de la morphologie préhistorique à notre disposition, à savoir un modèle mixte présentant l'état paléolithique de l'entrée et de la Salle des Taureaux et l'état de 1940 dans le reste de la grotte. En effet, les reconstitutions de la morphologie paléolithique sont encore en cours, mais dans les secteurs que nous allons étudier

(le Passage, la Nef et l’Abside), seuls des dépôts de sédiments argileux et/ou de calcite sur quelques centimètres d’épaisseur ont été notés entre le Paléolithique et 1940.

1. Influence de l’évolution de la morphologie sur l’acoustique

a) Méthodologie

Pour réaliser ces simulations, nous avons virtuellement placé les émetteurs et les récepteurs aux mêmes coordonnées en abscisse et en ordonnée dans les modèles 3D représentant les différents états d’un même secteur, avec une hauteur au-dessus du sol d’1,65 m, avec pour seule exception la hauteur choisie dans le modèle du Passage lors de sa découverte (1,30 m), puisque ce secteur est plus bas de plafond que les autres. Trois localités ont été sélectionnées dans la Salle des Taureaux (n°1 face au Panneau de la Licorne, n°2 sous le dôme central, et n°3 à l’extrémité distale de la salle), une au centre du Passage (n°4, face au Cheval Ocre de la Conque C), une à la jonction entre la Nef et l’Abside (n°5), et la dernière (n°6) au centre de l’Abside (Figure 185). Elles ont été choisies car il s’agit d’espaces assez larges pour permettre la pose d’un émetteur et de plusieurs récepteurs, mais aussi car elles permettent de couvrir des espaces aux morphologies variées, qui ont été fortement modifiés depuis la découverte du site, l’objectif étant d’observer l’influence de ces modifications sur l’acoustique.

Nous avons posé une source virtuelle au centre de chacune de ces localités ainsi que deux ou trois micros posés à 2 m de la source. Cette distance a été choisie de façon à ce qu’il soit possible de couvrir le secteur avec deux ou trois emplacements de micros tout en restant à un mètre de distance des parois. En chacun de ces points, au moins six simulations ont été reproduites (afin d’en calculer la moyenne).

Pour calculer le TR, nous avons moyenné les résultats des simulations du « TR optimal » proposé par *Icare* aux bandes d’octaves 500 Hz et 1 kHz, et pour calculer les indices de C80 et de D50, nous avons moyenné les résultats des bandes d’octaves 500 Hz, 1 kHz, et 2 kHz (ISO 3382, 2009 ; Fazenda *et al.*, 2017).

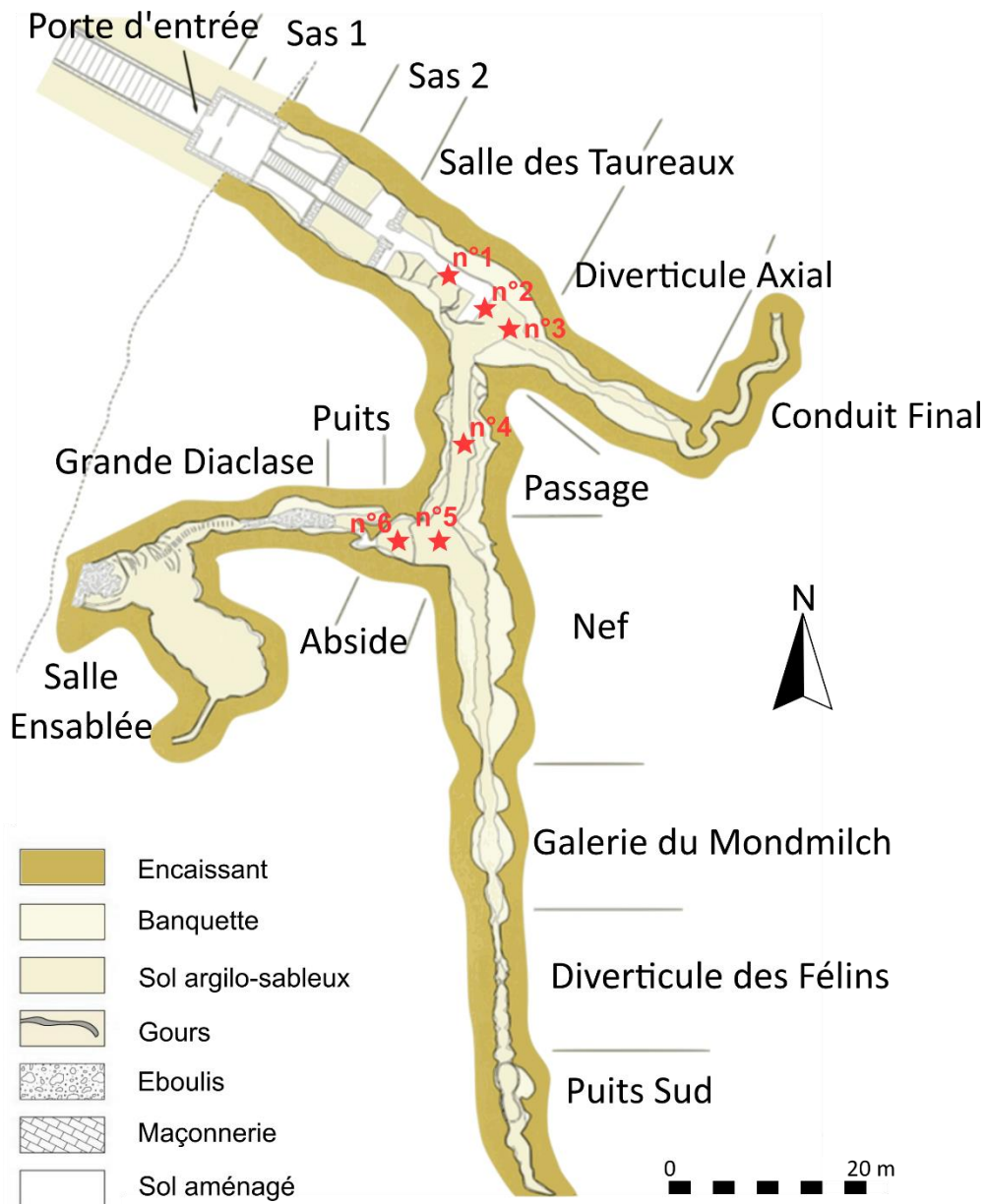
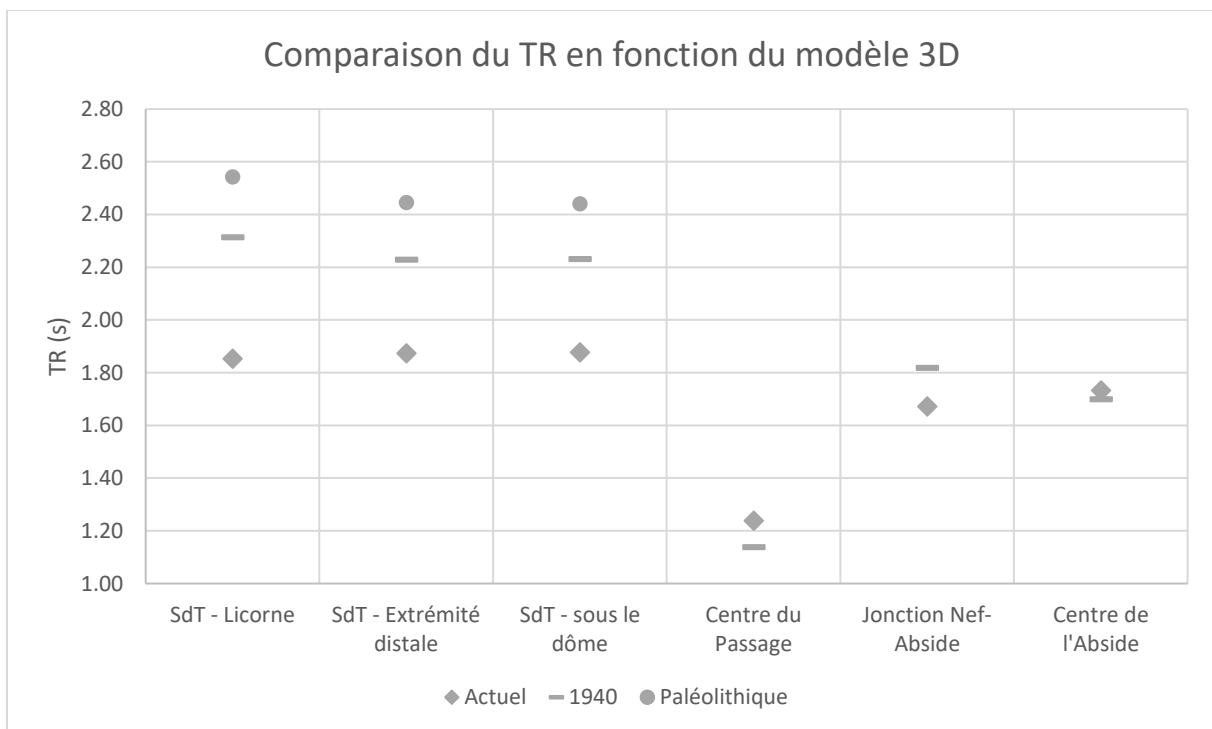


Figure 185 : Localisation des simulations numériques acoustiques dans Lascaux permettant de comparer les caractéristiques acoustiques de la grotte selon différentes morphologies (d'après doc. N. Aujoulat, fond topographique C. Bassier).

b) Temps de Réverbération (TR)

On peut observer (Graphique 39) que le TR varie, pour une même localisation, d'un modèle 3D à l'autre. Ces variations sont plus marquées dans la Salle des Taureaux que dans le Passage ou l'Abside. Cela peut être dû au fait que dans ces secteurs, seul le sol a été modifié alors que l'entrée de la Salle des Taureaux, en continuité avec l'entrée de la cavité, a été plus fortement transformée. Ainsi, les trois mesures réalisées dans la Salle des Taureaux montrent que les TR

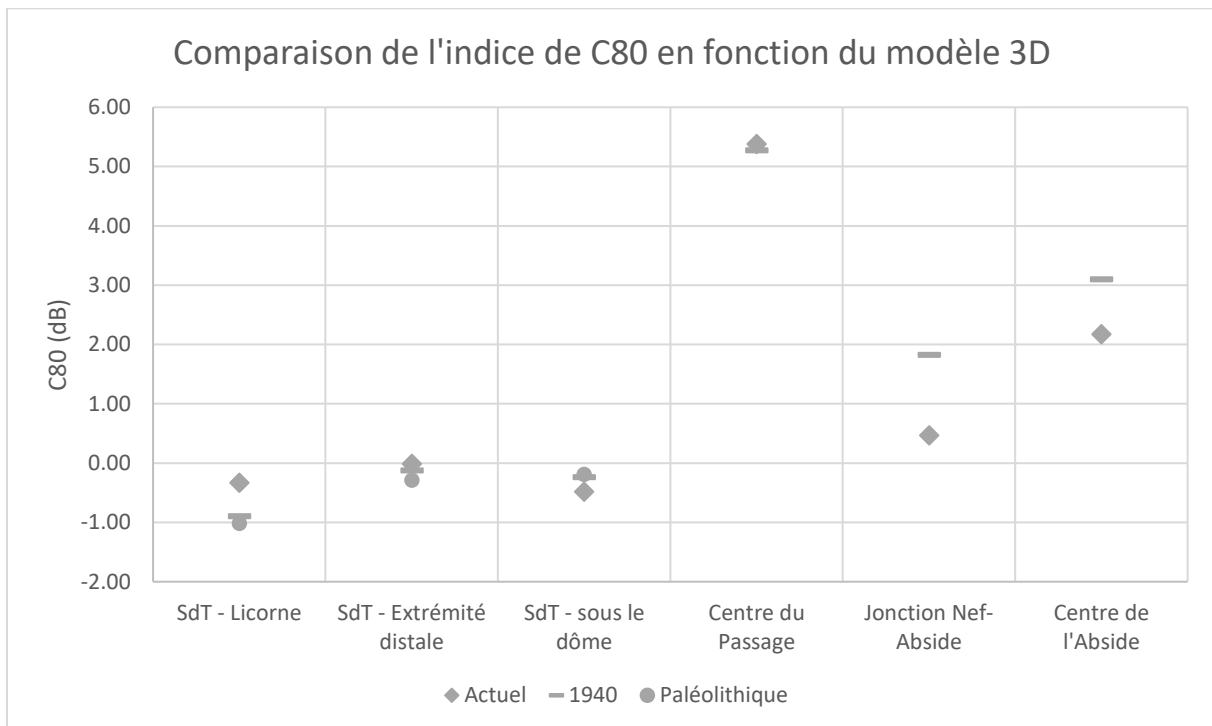
produits dans le modèle 3D reproduisant la morphologie présumée paléolithique (entre 2,40 et 2,60 s) sont plus proches des TR produits dans la reproduction de l’état de la découverte (entre 2,20 et 2,30 s) que ceux produits dans le modèle 3D actuel (entre 1,80 et 1,90 s). Dans les autres secteurs, nous avons uniquement pu comparer l’état actuel avec celui, reconstruit, de 1940. La différence entre ces deux états paraît moins importante que dans la Salle des Taureaux, en particulier au centre de l’Abside, où malgré un creusement des sols sur près d’un mètre, le TR est quasi-identique (Graphique 39). Cela peut être dû à l’influence de la grande coupole qui couvre l’ensemble de ce secteur. Au centre du Passage et à la jonction entre Nef et Abside, la différence du TR moyen est presque non-significative, entre 0,10 et 0,15 s d’écart (Graphique 39).



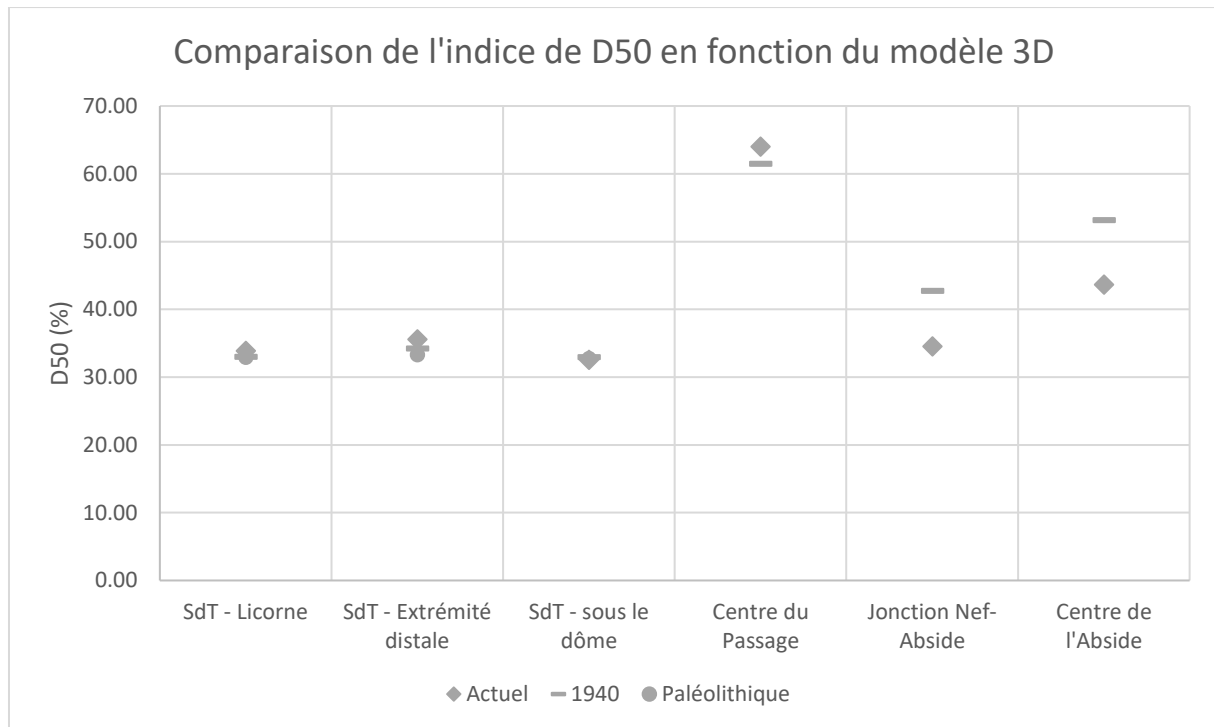
Graphique 39 : Comparaison du TR moyen simulé dans différents modèles 3D de la grotte de Lascaux : état actuel (modèle Perazio Engineering, 2012), de la découverte et lors de la fréquentation Paléolithique (modèle Perazio Engineering, Archeovision Production 2012, projet MicroPaGO).

c) Clarté (C80) et Définition (D50) du son

L'analyse des coefficients de clarté et de définition montre au contraire un rapprochement de ces critères dans la Salle des Taureaux et le secteur du Passage (Graphique 40 et Graphique 41), tandis qu'à la jonction entre Nef et Abside et au centre de l'Abside une nette différence s'installe entre les simulations (entre 0,95 et 1,35 dB d'écart pour la clarté et entre 8,20 et 9,50 % pour la définition). Dans la Salle des Taureaux, on peut en particulier remarquer que les résultats des simulations de C80 réalisées dans le modèle à la morphologie moderne sont davantage séparés de ceux réalisés dans les reconstitutions des morphologies de 1940 et de la fréquentation paléolithique (Graphique 40).



Graphique 40 : Comparaison du C80 moyen simulé dans différents modèles 3D de la grotte de Lascaux : état actuel (modèle Perazio Engineering, 2012), de la découverte et lors de la fréquentation Paléolithique (modèle Perazio Engineering, Archeovision Production 2012, projet MicroPaGO).



Graphique 41 : Comparaison du D50 moyen simulé dans différents modèles 3D de la grotte de Lascaux : état actuel (modèle Perazio Engineering, 2012), de la découverte et lors de la fréquentation Paléolithique (modèle Perazio Engineering, Archeovision Production 2012, projet MicroPaGO).

d) Conclusion

Ces différentes simulations ont permis de mettre en évidence l’impact de l’évolution naturelle puis des travaux récents dans la grotte sur l’acoustique de cette dernière. Il semblerait que dans la Salle des Taureaux, l’évolution de la morphologie des sols et de l’entrée toute proche de la grotte aient eu un impact important sur le TR produit, tandis que dans d’autres galeries l’impact des changements de la hauteur et de l’aspect des sols sur le TR est moindre, voire inexistant. Cela est probablement dû à des travaux moins importants, compensés par l’influence majeure de la forme des parois et des voûtes sur l’acoustique.

En ce qui concerne les indices de C80 et de D50, l’influence des modifications semble moins importante dans la Salle des Taureaux, où aucune différence nette ne peut être remarquée pour la définition D50 (Graphique 41) tandis que seuls quelques dixièmes de décibels marquent la différence entre les simulations de clarté (C80) issues du modèle 3D représentant la cavité actuelle et le modèle qui propose une reconstitution de l’état préhistorique de la grotte (Graphique 40). L’impact du creusement du sol dans le Passage semble faible en ce qui concerne le TR, et parait inexistant, ou au moins non-significatif pour la clarté et la définition.

Enfin, dans les secteurs à la jonction entre Nef et Abside et au centre de l'Abside, la différence est marquée concernant les indices de C80 et de D50.

Ces différences sont suffisamment marquées pour avoir une influence sur notre compréhension de la perception sonore dans la grotte et doivent être prises en compte lors des analyses acoustiques de Lascaux.

e) Perspectives

Afin de mieux comprendre l'influence des changements de la morphologie de la cavité sur son acoustique, il sera intéressant de reproduire ces simulations dans de plus nombreux secteurs du modèle 3D proposant une reconstitution de l'état paléolithique. Ce travail est en cours (projet MicroPaGO, dir. D. Lacanette) et permettra de compléter nos simulations numériques.

D'autre part, ces simulations se basent sur le coefficient d'absorption de calcaires de bancs similaires à ceux présents dans la grotte, et bien que cela soit totalement impossible pour le moment, mettre en place quelques mesures *in situ* permettrait de calibrer nos simulations avec plus de certitudes.

2. Analyse des qualités acoustiques de quelques secteurs de Lascaux

a) Méthodologie

Nous avons décidé de réaliser des simulations permettant de mieux connaître l'acoustique de la grotte de Lascaux à travers l'analyse de simulations réalisées dans quatre secteurs : la Salle des Taureaux (modélisée selon une hypothèse de son état lors de la fréquentation humaine Paléolithique), le Passage, la Nef et l'Abside (modélisés d'après l'état de la grotte en 1940).

Nous avons sélectionné les mêmes localités que dans la section précédente, à savoir trois mesures dans la Salle des Taureaux (n°1 face au Panneau de la Licorne, n°2 sous le dôme central, et n°3 à l'extrémité distale de la salle), au centre du Passage (n°4, face au Cheval Ocre de la Conque C), à la jonction entre la Nef et l'Abside (n°5), et au centre de l'Abside (n°6) et y avons ajouté trois mesures dans la Nef (Figure 186) : n°7 près du Panneau de l'Empreinte, du Panneau de la Vache Noire (n°8) et du Panneau des Bisons Adossés (n°9). Nous avons

sélectionné ces secteurs car ils correspondent à des espaces aux morphologies variées (couloir haut pour la Nef, bas pour le Passage, vaste salle pour la Salle des Taureaux et morphologie en cul-de-four pour l'Abside) et dont les parois ont été différemment investies par les Paléolithiques (peintures de grandes dimensions dans la Salle des Taureaux, gravures, peintures et techniques mixtes dans le Passage, palimpseste dans l'Abside et panneaux peints et/ou gravés dans la Nef).

Comme précédemment, l'émetteur a été placé au centre de l'espace à analyser et les récepteurs (deux ou trois selon les possibilités) ont été positionnés à 2 m de la source de sorte à couvrir l'essentiel du lieu à analyser. Émetteurs et récepteurs ont été placés à 1,65 m du sol reconstitué, excepté dans le Passage, où une hauteur de 1,30 m a été sélectionnée pour des raisons de hauteur sous plafond disponible. Chaque simulation a été reproduite au moins six fois afin de pouvoir moyenner la variabilité de ces mesures, et les graphiques qui suivent ont été réalisés en suivant les normes ISO 3382 (2009). Ainsi, les TR ont été calculés à partir des bandes d'octaves 500 Hz et 1 kHz et les C80 et D50 à partir des bandes d'octaves 500 Hz, 1 kHz, et 2 kHz.

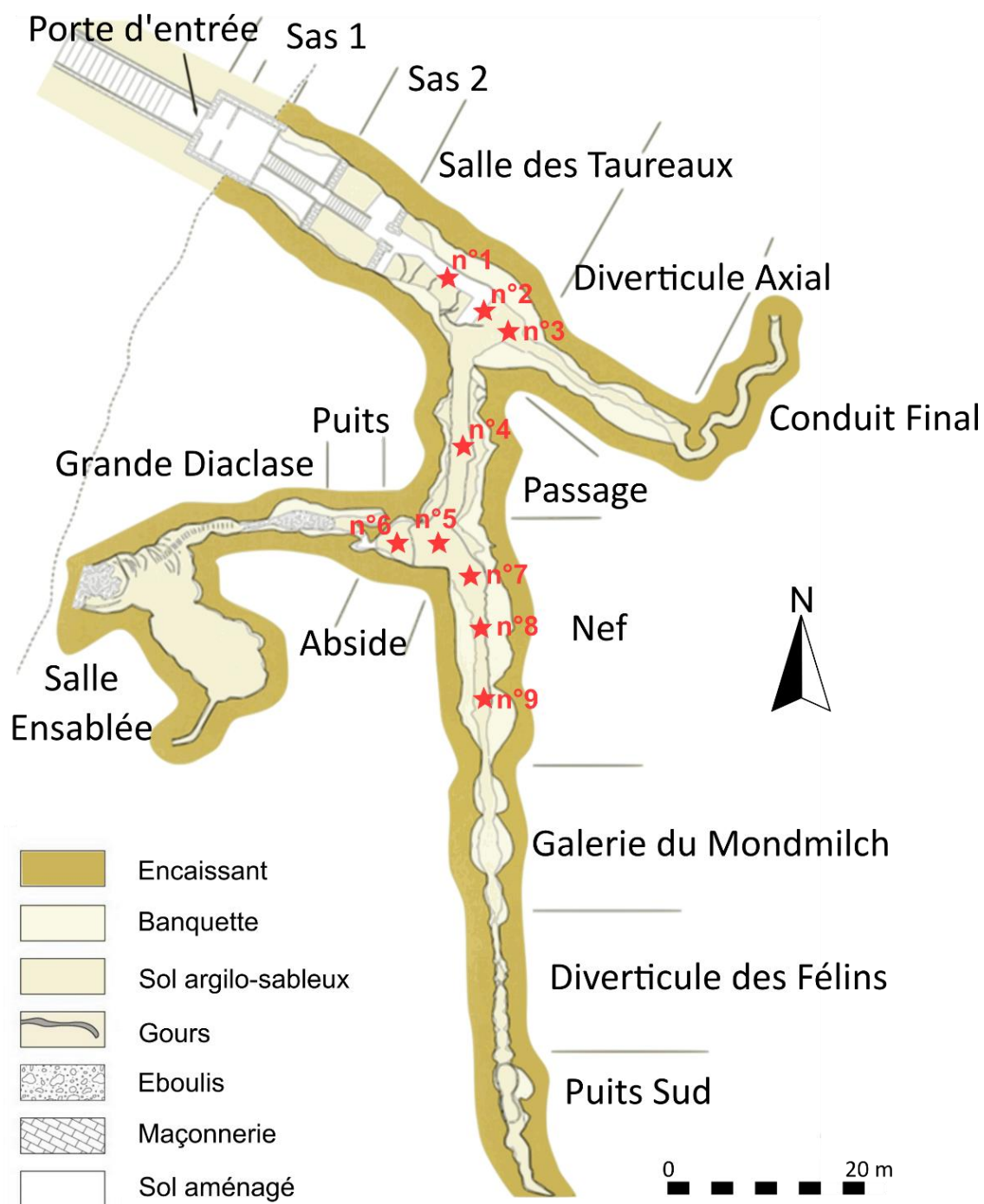


Figure 186 : Localisation des simulations numériques acoustiques dans Lascaux (d'après doc. N. Aujoulat, fond topographique C. Bassier).

a) Temps de réverbération (TR)

Résultats

Le TR étudié ici est un TR dit « optimal », calculé par le logiciel *Icare*. Ce TR correspond au TR permettant la meilleure corrélation entre la pente théorique et la pente simulée.

Les TR obtenus suite aux simulations numériques (Figure 187) permettent de regrouper trois secteurs : la Salle des Taureaux, où le TR est globalement compris entre 2 et 3 s, le Passage, où la seule mesure enregistrée propose un TR moyen de 1 s, et l’Abside et la Nef où les cinq TR enregistrés se situent en moyenne autour de 1,75 s (entre 1,50 et 2 s).

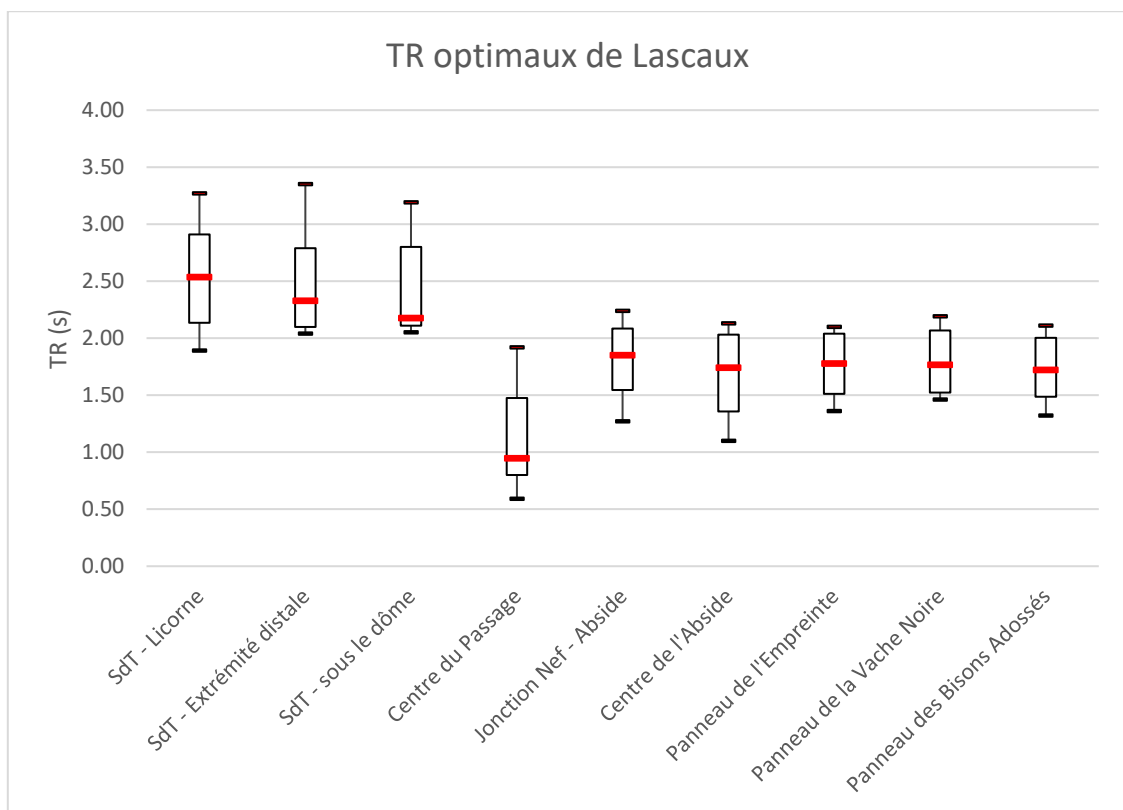


Figure 187 : Boîte à moustache des TR optimaux simulés dans neuf localités de la grotte de Lascaux (modèle Perazio Engineering, 2012, retravaillé par le projet MicroPaGO).

Interprétation

Les valeurs obtenues dans la Salle des Taureaux, la Nef et l’Abside peuvent toutes être considérées comme réverbérantes, mais les mesures de la Salle des Taureaux le sont particulièrement puisqu’elles dépassent ce qui a pu être enregistré dans d’autres grottes ornées (Fazenda *et al.*, 2017). Ces mesures correspondent à ce que l’on peut trouver actuellement dans des salles d’opéra, de concert, voire dans certaines églises. Le Passage semble être le secteur le moins réverbérant, sans être étouffé pour autant.

b) Clarté du son (C80)

Résultats

Les mesures issues de la Salle des Taureaux sont homogènes entre elles (entre -2 et 1 dB), le Passage dispose d’une clarté plus élevée, autour de 6 dB, tandis que les C80 de la Nef et de l’Abside sont un peu plus hétérogènes, entre 0,50 et 3,50 dB de moyenne (Figure 188).

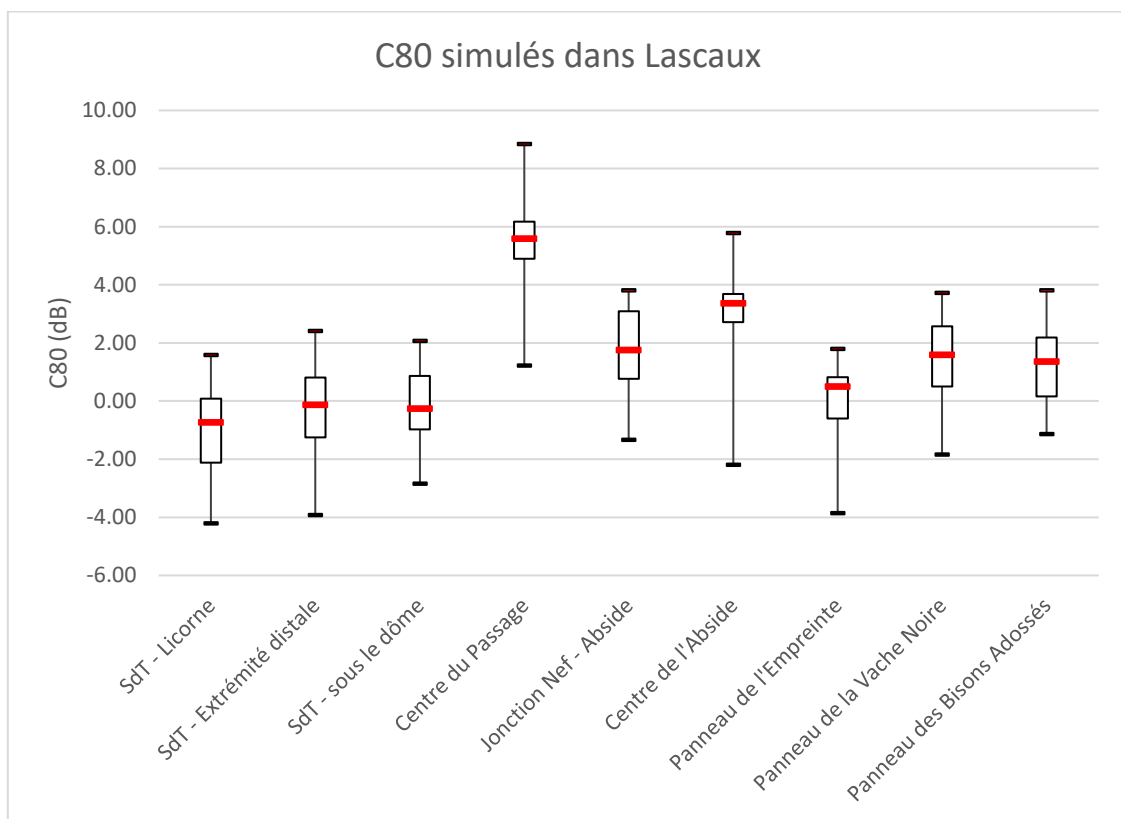


Figure 188 : Boite à moustache du C80 simulé dans neuf localités de la grotte de Lascaux (modèle Perazio Engineering, 2012, retravaillé par le projet MicroPaGO).

Interprétation

Les résultats des simulations numériques de l'indice C80, compris en moyenne entre -2 et 6 dB, correspondent à ce que l'on pourrait attendre d'un espace moderne dédié à la production et à l'écoute de musique. En particulier, selon des critères modernes, les mesures de la Salle des Taureaux et du Panneau de l'Empreinte, autour de 0 dB, correspondent à ce qui est préconisé pour la musique symphonique tandis que les secteurs aux valeurs plus élevées, entre 1 et 4 dB (jonction entre Nef et Abside, centre de l'Abside, panneaux de la Vache Noire et des Bisons Adossés), seraient plus adaptés pour de la musique d'opéra, c'est-à-dire favorisant l'audition des voix.

c) Définition du son (D50)

Résultats

Les valeurs de D50 se situent entre 30 et 65 %. Plus précisément, les mesures issues des simulations dans la Salle des Taureaux sont homogènes, autour de 30 % en moyenne, celles issues des simulations situées à la jonction Nef/Abside et dans la Nef sont également assez homogènes, entre 35 et 45 %. Les simulations réalisées au centre de l'Abside disposent d'une définition moyenne d'environ 55 % et celles au centre du Passage de 65 % en moyenne (Figure 189).

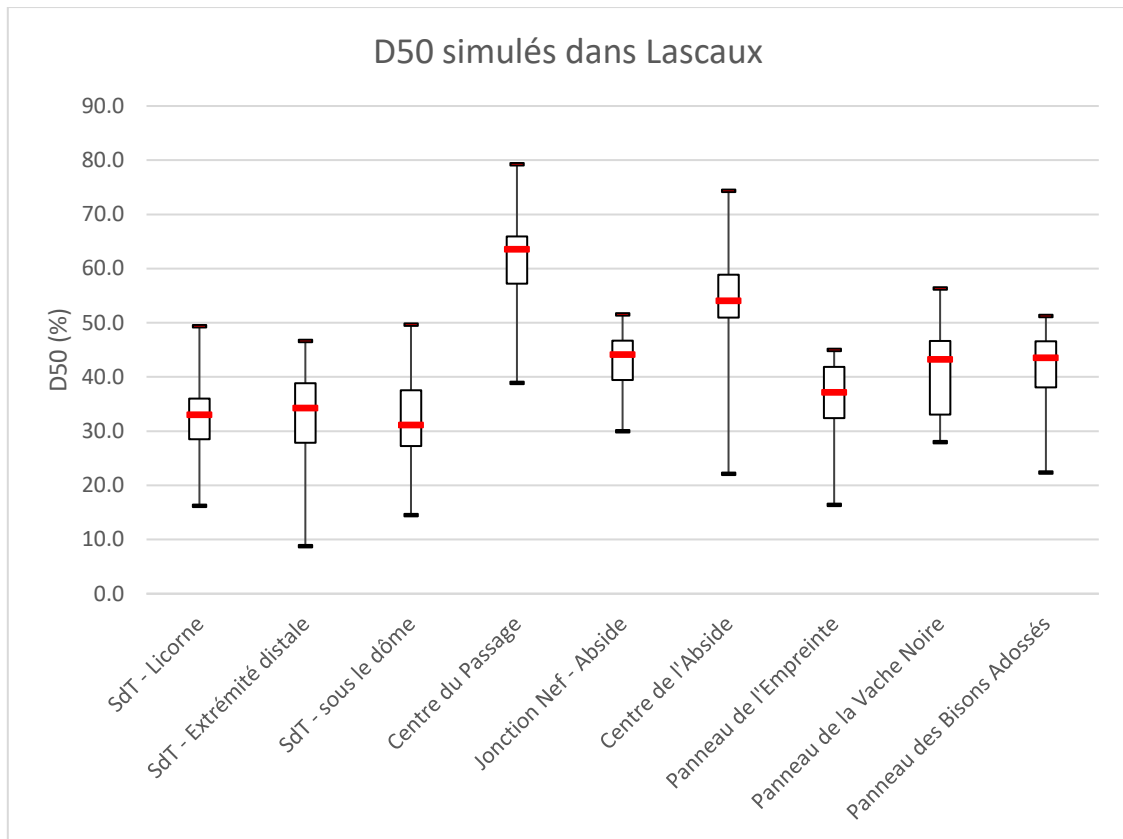


Figure 189 : Boite à moustache du D50 simulé dans neuf localités de la grotte de Lascaux (modèle Perazio Engineering, 2012, retravaillé par le projet MicroPaGO).

Interprétation

Les valeurs de l'indice de définition sont globalement assez basses, seules les valeurs du Passage et du centre de l'Abside permettent, selon des critères modernes, une intelligibilité moyenne de la parole. Dans les autres secteurs, la définition peut être considérée comme pauvre, la distinction de la parole peut alors être difficile. Dans les espaces modernes, une telle définition peut se retrouver dans des espaces avec un bruit de fond important, ou des lieux très réverbérant, comme les églises (p. ex. Desarnaulds, 2002).

d) *Conclusion*

Les neuf mesures que nous avons analysées montrent une grotte globalement réverbérante, bien adaptée à la production et à l’écoute de musique (selon des critères modernes), mais au détriment de la définition du son, et donc de l’intelligibilité. Cela est en accord avec l’utilisation ponctuelle des fac-similés de la grotte comme salles de concert. En particulier, la Salle des Taureaux est l’espace le plus réverbérant que nous ayons enregistré au sein de la grotte, et le plus réverbérant des mesures réalisées dans d’autres grottes ornées (Fazenda *et al.*, 2017). Cet espace, comme le montrent les C80, pourrait être adapté à la production d’effets musicaux qui bénéficient de longs temps de réverbération, comme la musique symphonique actuelle. Le Passage est le secteur le moins réverbérant, et s’il pouvait être adapté à la production de musique moderne, il est le secteur qui y est le moins adapté. Il s’agit cependant du secteur à la meilleure intelligibilité. Enfin, les mesures réalisées dans la Nef et l’Abside montrent une réverbération élevée par rapport à ce qui a pu être mesuré dans d’autres cavités ornées (Fazenda *et al.*, 2017), tout en proposant un C80 et un D50 plus proches de ce que l’on recherche dans les salles d’opéra moderne, avec un compromis entre compréhension de la parole et du chant, et réverbération assez longue pour que le son ne paraisse pas plat.

e) *Perspectives*

À première vue, au sein d’un même secteur, les mesures sont assez homogènes, mais il serait intéressant d’effectuer plus de mesures à l’intérieur d’un même espace afin de vérifier si des nuances existent, et si elles ont un lien avec l’organisation du dispositif pariétal ou la disposition des vestiges archéologiques. Il serait également intéressant de réaliser des mesures dans d’autres secteurs afin d’avoir une compréhension globale de l’acoustique de Lascaux. Cela sera particulièrement pertinent lorsque nous aurons accès au modèle 3D reconstituant la morphologie présumée paléolithique de la grotte (en cours, projet MicroPaGO, dir. D. Lacanette).

Afin de pallier l’inaccessibilité de la grotte, des auteurs (Commins *et al.*, 2020) ont proposé de réaliser des mesures dans le fac-similé Lascaux IV, mais nous avons pu montrer que les différences de morphologie entre la grotte actuelle et celle parcourue par les Paléolithiques sont suffisamment importante pour biaiser notre perception de l’espace. L’utilisation du fac-similé

Chapitre 2 - La grotte de Lascaux

semble alors d'autant plus problématique que de nouvelles transformations de la morphologie ont eu lieu pour s'adapter aux visites du public et que les matériaux employés ne sont pas ceux de la grotte naturelle. Il semble alors inévitable de passer par des simulations pour pouvoir analyser l'acoustique de la grotte de Lascaux telle que l'on connue les Préhistoriques. Il est cependant important de rappeler que la reconstitution de la morphologie préhistorique à notre disposition est une hypothèse portée par l'équipe du projet MicroPaGO (dir. D. Lacanette) à partir de l'étude d'archives (archéologiques et géologiques), sans retour possible sur le terrain. Il faut donc noter que malgré toutes les précautions prises, notre modèle correspond aux options les plus pertinentes pour une restitution la plus fidèle possible de la morphologie d'origine, mais n'en demeure pas moins une interprétation.

~ Synthèse et discussion ~

L'objectif que nous nous étions fixé pour ce travail était d'utiliser des outils de simulation numérique d'éclairage et d'acoustique afin d'améliorer notre connaissance des modalités d'investissement du milieu souterrain par les Paléolithiques, au-delà donc de la seule observation des paysages souterrains et de l'espace naturel qui leur étaient offerts. Ce choix de l'utilisation des simulations est issu de l'émergence récente d'un nouvel outil de travail : le modèle 3D (Aujoulat et Perazio, 2005). Ces derniers sont de plus en plus répandus, car ils permettent un accès virtuel à la cavité, l'accès réel étant, lui, de plus en plus limité pour des raisons conservatoires. De plus, le milieu souterrain, même lorsque l'accès en est possible, interdit de par sa nature l'utilisation de matériels trop encombrants ou qui nécessiteraient un branchement électrique. Les modèles 3D permettent également, suite à un travail sur le maillage, de proposer des reconstitutions de l'état de la cavité à plusieurs moments de son histoire. Nous nous sommes ainsi attachée à proposer une méthode scientifique, c'est-à-dire objective, répétable et quantifiable, permettant d'utiliser des simulations numériques d'acoustique et d'éclairage dans le modèle 3D de grottes ornées.

Nous nous sommes concentrée sur ces simulations car l'ouïe et la vue sont les deux principaux sens mis en jeu dans la communication, l'art étant un mode de communication, or ces notions, bien qu'investies par d'autres moyens (voir Reznikoff, 2008, 2010, 2012 et Fazenda *et al.*, 2017 pour l'acoustique, Delluc et Delluc, 1979a, de Beaune, 1987a, 1987b, 2000 et Medina-Alcaide *et al.*, 2012, 2019 pour des travaux sur l'éclairage, ou encore, par exemple Ortega Martínez, 2012 ; Groenen, 2013 ; Bourdier *et al.*, 2017 ; Boudier-Blet, 2018 ; Intxaurbe *et al.*, 2020 pour des travaux sur la visibilité des sites et des œuvres), ont bénéficié de peu de simulations numériques (voir Hoffmeister, 2017 pour une simulation de lampes à graisse ou Jiménez Gonzáles *et al.*, 2008 pour une simulation acoustique).

De telles simulations nécessitent des outils spécifiques qui permettent de prendre en compte un maximum de données physiques qui entrent en jeu. Nous avons donc décidé de travailler en partenariat avec le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) où sont développés les outils de simulation d'éclairages *Phanie* (Carré *et al.*, 2000) et de sons *Icare* (Noé *et al.*, 2009, 2012). Ces outils étant adaptés à des environnements contemporains, la première partie de notre travail a consisté à répondre à la question suivante « **Comment adapter des outils de simulations d'acoustique et d'éclairage à des sites naturels complexes, patrimoniaux, de type grottes ornées ?** ».

Synthèse et discussion

Dans un second temps, nous avons choisi d'appliquer ces outils aux modèles 3D de deux grottes ornées de Dordogne : Cussac et Lascaux, dont les contextes archéologiques, naturels, mais aussi de recherche sont très différents, différence qui était volontairement recherchée et assumée afin de nous permettre de tester nos outils dans des contextes variés. Par ailleurs, dans les deux cas, des recherches y sont réalisées, à Cussac, où un Projet Collectif de Recherche (PCR, dir. J. Jaubert) est mené depuis 2008, et à Lascaux, sous la forme d'une reprise récente (PCR LAsCO, dirs. M. Langlais et S. Ducasse, 2018-2021). Nombre d'éléments en cours d'investigation n'ont ainsi pas pu être validés pour ce travail, mais les discussions auprès des acteurs de ces deux projets nous ont permis d'enrichir notre réflexion. L'objectif de ces simulations a été d'apporter des éléments de réponse à la question « **Quelle est l'influence de la perception dans l'investissement du milieu souterrain ?** ».

APPORTS MÉTHODOLOGIQUES

A. Étapes nécessaires à la validation des modèles

Afin de reproduire au mieux les phénomènes physiques en jeu, nous avons dû passer par une phase de calibration de l'ensemble de la chaîne, depuis la production (de son ou de lumière) jusqu'à sa réception (sur casque ou écran). Dans notre travail, nous avons souhaité mettre en place un modèle méthodologique permettant d'apporter les informations nécessaires au bon déroulement des simulations numériques.

1. Sources d'éclairages et de sons

Le premier phénomène qui a nécessité une calibration est la source, qu'il s'agisse du son ou de l'éclairage.

Les sons intégrés au logiciel doivent avoir été enregistrés en chambre anéchoïque, et nous avons choisi de n'utiliser que des claquements ponctuels pré-enregistrés dans *Phanie* et des sons longs issus d'enregistrements anéchoïques disponibles en libre accès. Le premier est un son neutre tandis que le second correspond à des sonorités vocales.

En ce qui concerne l'éclairage, nous avons eu besoin du spectre et de l'éclairement de luminaires paléolithiques. En l'absence de telles mesures dans la littérature, nous avons dû reproduire des exemples et en mesurer les caractéristiques. Pour cela, nous nous sommes inspirée d'expérimentations déjà réalisées sur des lampes à graisse (Delluc et Delluc, 1979a ; Aubourg, 1983 ; de Beaune, 1983, 1987a, 1987b ; Rigaud, 2000) et des torches (Malvesin-Fabre et Parriaud, 1955 ; Aubourg, 1983 ; Galant *et al.*, 2007) et avons essayé de prolonger ces recherches en proposant un protocole expérimental permettant de comparer la production de lumière de lampes conçues avec différentes graisses et différentes mèches et de torches fabriquées à partir de plusieurs essences de bois (pin sylvestre et genévrier).

Pour les lampes à graisse, nos observations nous ont amenée à sélectionner l'amadou et le bois mort comme mèches permettant de produire les flammes les plus hautes et les plus stables, et

de les combiner avec les graisses de cheval, de bœuf et de cerf. En particulier, l'association amadou et graisse de cheval a semblé produire un éclaircissement plus puissant (jusqu'à 5,5 lux) que les autres (en moyenne 2,5 lux), tandis que les nuances du spectre de la lumière émise semblent trop ténues pour avoir une incidence sur l'observation des couleurs à l'œil nu.

Les torches ont été fabriquées à l'aide de plusieurs brins assemblés et fichés dans un manche. Nous avons remarqué que le diamètre idéal des brins composants la torche est d'un à deux centimètres, et que les torches composées uniquement de genévrier avaient tendance à s'essouffler, contrairement à celles composées au moins en partie de pin sylvestre. Aucune différence, ni dans le spectre, ni dans l'éclaircissement, n'a cependant été observée entre les mesures sur torches en pin et sur les torches mixtes en pin et genévrier.

2. Caractérisation des matériaux

L'étape suivante a été la caractérisation des matériaux « réflecteurs » présents dans les grottes. Or, caractériser un matériau naturel peut se révéler extrêmement complexe, ne serait-ce que parce que leur composition et leur aspect varient dans l'espace et en fonction des conditions d'exposition (à l'humidité, par exemple). Nous avons donc fait le choix d'insérer dans *Phanie* la caractérisation spectrale moyenne des calcaires présents dans chaque grotte, et dans *Icare*, d'intégrer l'absorption acoustique moyenne du site.

Devant l'impossibilité de pénétrer dans Lascaux pour des mesures *in situ*, nous avons procédé en deux temps et ajouté un troisième site à notre corpus : la grotte de Leye. Cette grotte laboratoire (Lacanette *et al.*, 2013 ; Ferrier *et al.*, 2016), dénuée de témoignages archéologiques, est accessible pour des recherches expérimentales en grotte et nous permettra de comparer les résultats d'échantillons prélevés sur ou proche du site d'étude avec ceux des mesures sur site, mesures impossibles à Lascaux et limitées à Cussac.

Dans un premier temps, des échantillons considérés comme caractéristiques de nos sites (principalement des calcaires, mais aussi de l'argile et de la calcite) ont été analysés au CSTB (caractérisation spectrale avec le spectrophotomètre *Konica Minolta CL-500A*, et de l'absorption acoustique au tube de Kundt), puis des mesures sur site ont été réalisées lorsque cela était possible (à Cussac et à Leye).

a) Mesures spectrales pour Phanie

L'ensemble des mesures nous a permis d'observer un facteur de réflectance à meilleure résolution que ce qui est habituellement proposé dans la littérature (Delluc et Delluc, 1979a ; Pastoors et Weniger, 2011), avec des variations tout au long du spectre visible. Il semble alors indispensable de **disposer de la réflectance du ou des matériaux sur l'ensemble de ce spectre** (env. 380-780 nm).

Nous avons également observé une différence entre les caractéristiques des matériaux secs et humides, ces derniers se rapprochant plus des mesures réalisées sur place. Il semblerait alors plus pertinent, dans le cas où seuls des échantillons peuvent être mesurés, de mesurer des échantillons humides. Cependant, l'idéal serait de connaître le taux d'humidité présent dans la grotte à l'époque qui nous intéresse (il est probable que le taux d'humidité sous climat périglaciaire devait être moins élevé que l'actuel) afin d'enregistrer le spectre (et l'absorption acoustique) au même taux d'humidité.

Enfin, nous avons pu observer que les facteurs de réflectance varient d'un site à l'autre et **il semble, dans ces conditions, indispensable de mettre en place des mesures pour chaque nouveau site d'étude**. Au sein d'un même site, les mesures varient également, en particulier d'un matériau à l'autre (calcaire, calcite, argile), mais même au sein d'un matériau. Il est impossible aujourd'hui d'intégrer une infinité de spectres dans *Phanie*, mais ces différences sont pondérées par les photographies qui constituent la texture du modèle, **il semble donc pertinent de moyenniser quelques mesures prises sur place ou sur des échantillons représentatifs des parois et sols du site**.

b) Mesures d'absorption acoustique

Les mesures d'absorption acoustique ont été réalisées au tube de Kundt, sur des échantillons. Compte tenu de leur trop grande fragilité, nous n'avons pas pu mesurer d'échantillons de calcite. Les mesures montrent des résultats très proches pour les matériaux analysés (calcaires issus de Cussac, Lascaux et Leye, et argile de Veyssoix humidifiée à 70 % et 90 %), en

particulier pour les calcaires, pourtant issus de sites différents. Dans l'ensemble, les matériaux ont un comportement réverbérant.

3. Nécessité de la validation du modèle

Les mesures sur échantillon ou sur site sont forcément issues d'une sélection, et dans le cas particulier des échantillons, nous avons sélectionné des blocs calcaires issus des mêmes bancs que ceux présents dans la grotte en question (il est évidemment impossible de prélever des échantillons directement sur les parois calcaires d'un site orné), mais ces échantillons n'ont donc pas la même histoire taphonomique que le calcaire des parois, ce qui peut engendrer un biais. Afin d'obtenir des simulations les plus robustes possible, une calibration des données a été réalisée.

Pour *Phanie*, la comparaison entre mesures sur échantillons et mesures sur site a permis de vérifier la cohérence du facteur de réflexion intégré dans le logiciel, mais aucune mesure *in situ* n'a pu être menée à Lascaux, où nous avons dû les extrapoler sur échantillons à partir de la correction réalisée pour les grottes de Cussac et de Leye.

Pour *Icare*, des mesures de réponses impulsionnelles (RI) menées sur le terrain à Cussac et à Leye ont permis de comparer la réponse réelle avec celle des simulations utilisant l'absorption acoustique mesurée au tube de Kundt. Une différence significative a été remarquée, et il a donc été nécessaire de recalibrer l'absorption acoustique de manière à obtenir la même RI. Cette calibration a alors permis, par comparaison, de corriger l'absorption acoustique de la grotte de Lascaux.

4. La réception des simulations

Enfin, la dernière étape consiste en la réception des données simulées. Les simulations acoustiques peuvent être reçues sous la forme d'indices (TR, C80, D50) analysables tels quels, ou sous la forme de sons à écouter au casque (dite l'auralisation). L'orientation de la tête et des oreilles étant une donnée d'entrée du logiciel, les biais d'interprétation sont assez ténus,

Chapitre 1 - Apports méthodologiques

principalement issus de la qualité du casque utilisé et des conditions de l'écoute (dans un environnement calme ou bruyant par ex.).

Les productions de *Phanie* sont des images à observer sous un écran calibré (mais même après calibration, tous les écrans ont une qualité d'affichage différente), dans des conditions d'éclairage ambiant identiques à celles de la simulation. Dans notre cas, les lampes à graisse et les torches produisent un éclairage faible, et il est donc nécessaire d'observer les images dans l'obscurité.

Enfin, le récepteur est aussi l'auditeur ou l'observateur qui va analyser les productions de *Phanie* et d'*Icare*. Or, notre « bagage » biologique et culturel influence naturellement notre perception, tant visuelle qu'auditive.

B. L'apport de l'expérimentation

À l'origine, nous avons organisé les expérimentations sur l'éclairage préhistorique dans le but d'apporter les données physiques indispensables aux simulations, mais leur intérêt s'est révélé beaucoup plus important puisqu'elles nous ont permis d'appréhender leur utilisation de l'intérieur. Ce que nous avons appris sur le fonctionnement et l'utilisation des luminaires testés peut ainsi être réinvesti pour nous aider à comprendre comment les Paléolithiques préparaient et organisaient leurs expéditions spéléologiques, quel volume ils devaient transporter lors des expéditions longues, et quelles collaborations étaient éventuellement nécessaires pour maintenir l'éclairage. **Cette phase de « terrain » nous semble indispensable pour pouvoir analyser les simulations réalisées ultérieurement.**

Parmi les conclusions auxquelles nous sommes parvenue lors de ces expérimentations et du test en milieu souterrain des reproductions de lampes à graisse et de torches, la plus évidente concerne leur complémentarité, depuis leur fabrication (les torches demandent plus d'anticipation pour récolter et préparer les matières premières, le travail est plus long, nécessite plus de ressources et des outils plus spécifiques que la fabrication des lampes à graisse) jusqu'à leur utilisation. Les torches sont plus puissantes (entre 38 et 56 lux de moyenne selon les torches), mais de durée limitée, ce qui fait qu'elles se retrouvent particulièrement utiles dans le cadre de l'exploration, des déplacements en groupe ou dans des espaces larges. À l'inverse, les lampes à graisse sont peu puissantes (entre 1,7 et 5,5 lux) mais de durée illimitée (tant que de la graisse est régulièrement apportée dans la cuvette). Elles sont de ce fait plus appropriées au stationnement de longue durée, lorsqu'il est nécessaire de poser l'éclairage, ou dans le cas d'une évolution dans un espace restreint, dans des galeries basses. Dans les deux cas, l'éclairage nécessite d'être entretenu régulièrement (de la graisse doit être régulièrement apportée dans les lampes, et il est nécessaire de faire attention à ce que la graisse ne touche pas la flamme, tandis qu'il est nécessaire de moucher la torche dans les conditions d'un stationnement, et de changer de torche régulièrement – toutes les demi-heures environ).

C. Potentiels et limites des outils de simulations numériques

1. Potentialités

Lors de ce travail, nous avons réussi à mettre en place des simulations immersives de sons et d'éclairages dans les modèles 3D de deux grottes, Cussac et Lascaux. La méthode que nous avons développée est une approche à distance non invasive qui permet de produire des données perceptuelles reproductibles et partageables dans des sites à l'accès limité, voire quasi-impossible (dans le cas de Lascaux). À l'aide de ces outils, nous pouvons personnaliser des phénomènes physiques en choisissant la nature, la localisation et le nombre des sons et les éclairages produits, ainsi que les caractéristiques des matériaux en jeu.

2. Moyens nécessaires

L'élaboration de cette méthode a nécessité de réunir de nombreux moyens et compétences, à savoir :

- **Des moyens humains** : nous avons eu besoin de faire se croiser des connaissances et des savoir-faire de disciplines très variées (préhistoire, informatique, acoustique, éclairage, biologie de la perception sonore et visuelle, géologie du milieu karstique, archéologie expérimentale). Cela a, d'une part, nécessité que nous développions nos propres compétences dans ces champs disciplinaires, et, d'autre part, que nous mettions en relation des professionnels ou opérateurs de ces différents domaines.
- **Des moyens financiers** : aucun logiciel libre ne permet, à l'heure actuelle, de réaliser des simulations aussi complètes, qui prennent en compte les caractéristiques physiques de la lumière ou du son, mais également le comportement optique ou acoustique des parois ainsi que des sources dans des environnements 3D complexes (les logiciels en *open access*, tel *Blender*, disposent en général d'un module d'éclairage, mais ce dernier n'est pas basé sur des calculs physiques, l'objectif étant l'obtention d'un rendu

esthétique et non métrologique, et donc scientifique). L'ensemble des mesures nécessaires, ainsi que l'accès aux logiciels a donc naturellement un coût³³.

- **Des moyens scientifiques** : une grande part des informations intégrées aux logiciels est issue de connaissances scientifiques, sur les caractéristiques physiques des sources et des matériaux. Par exemple en ce qui concerne les sources, nous avons utilisé les connaissances de la communauté sur les modalités de fabrication de d'utilisation des luminaires préhistoriques. Les vestiges et témoignages archéologiques présents dans les grottes ont également été exploités.
- **Des moyens techniques** : les simulations numériques sont plus ou moins longues à être calculées, et il est donc nécessaire d'avoir une configuration informatique adaptée.
- Enfin, il est nécessaire d'avoir à disposition un modèle 3D reproduisant le plus fidèlement possible la morphologie de la grotte, ou du secteur, du segment de galerie à étudier, et si possible telle que connu par les Paléolithiques. De ce fait, il est nécessaire qu'un travail sur l'acquisition et le maillage du modèle (si l'on veut reconstruire l'environnement paléolithique) ait lieu en amont.

3. Limites

Par principe, une simulation n'est jamais la réalité et est en soi une limite à nos observations (par ex., lors d'une simulation numérique, le nombre d'ondes ou de particules simulées est fini alors qu'il est infini en réalité). De plus, pour des raisons techniques, nous avons dû élaborer des choix qui ont amené à une simplification des phénomènes physiques (par ex. nous avons dû nous résoudre à n'intégrer qu'un seul spectre pour tous les matériaux d'une grotte).

D'autre part, les logiciels et modèles 3D à notre disposition ont leurs propres limites : il est impossible de faire vaciller la flamme des éclairages alors qu'il est quasi certain que cet effet a joué un rôle dans la perception des reliefs et des motifs au Paléolithique, et la qualité des modèles 3D disponibles ne permettait pas de visualiser toutes les gravures. L'autre limite des modèles 3D réside dans le fait qu'ils sont construits à partir de la morphologie actuelle de la grotte, or ce qui nous intéresse, c'est la perception paléolithique, donc dépendante de la

³³ Nous souhaitons renouveler nos remerciements envers le CSTB, et en particulier Alexandre Jolibois, pour nous avoir aidé dans la mise en place d'une convention.

morphologie d'époque. Celle-ci peut être reconstituée (p. ex. projet MicroPaGO, dir. D. Lacanette, en cours ; Lacanette *et al.*, 2018), mais il n'est pas aisé de retrouver la morphologie exacte, ni de la reproduire (par exemple, s'il est possible de déterminer quelles concrétions holocènes supprimer, nous pouvons manquer d'informations pour savoir par quoi les remplacer : concrétions plus petites, calcaire, argile, et sur quelle épaisseur ?).

Enfin, la réception des données sur casque, et en particulier sur écran, constitue une autre limite. En effet, outre la qualité de l'écran et sa calibration, ce mode de restitution limite l'immersion : pour observer et nous déplacer dans l'obscurité, nous utilisons une vision large, alors que l'écran limite notre champ d'observation. Nous avons prévu, au printemps 2020, de réaliser une expérience permettant de comparer la perception d'une palette de couleurs éclairée par une torche et observée dans une cavité, sur un écran (dans l'obscurité et sur un écran calibré), et via un casque de réalité virtuelle afin de vérifier si une différence existe dans la perception des couleurs en fonction du médium utilisé. Cependant, la crise sanitaire nous a amené à repousser cette expérience à une date ultérieure.

D. Perspectives

Afin de poursuivre nos travaux, et notamment pour réaliser des observations plus globales sur l'appréhension des cavités étudiées, nous pensons qu'il serait intéressant de disposer de modèles 3D plus complets, plus précis, et qui reconstituent l'état de la fréquentation paléolithique de la cavité, dès que cela est possible.

Nous pensons également qu'il serait intéressant de poursuivre les expériences sur les lampes et les torches, notamment à travers une confrontation avec l'étude des charbons produits, et des résidus de lampes à graisse et de leurs thermo-altérations afin de mieux comprendre leur fonctionnement et leur utilisation. L'enregistrement de sons anéchoïques plus pertinents (comme des claquements du type de ceux utilisés par les pratiquants de l'écholocalisation ou des sons produits par des reproductions d'instruments préhistoriques) nous aiderait à mieux comprendre comment l'espace sonore pouvait être utilisé par les Paléolithiques.

Enfin, améliorer la réception des signaux simulés (sons et éclairages) pourrait permettre une interprétation plus fine des simulations. Par exemple, pouvoir mener les auralisations dans une salle adaptée et dédiée, ou encore visualiser les résultats des simulations dans un casque de réalité virtuelle. Ces innovations techniques ne sont pas de notre ressort mais il est important de maintenir un dialogue avec les spécialistes des disciplines dédiées afin que ces outils puissent à l'avenir bénéficier aux archéologues.

PERCEPTION ET INVESTISSEMENT DU MILIEU SOUTERRAIN, L'APPORT DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES, L'EXEMPLE DE LASCAUX ET DE CUSSAC

Après avoir validé nos modèles théoriques, il a été possible d'utiliser les outils de simulations numériques dans les modèles 3D de Cussac et de Lascaux afin d'apporter de nouveaux éléments à notre compréhension de la perception et de l'investissement du milieu souterrain par les Paléolithiques.

A. Comment se déplacer sous terre ?

1. Utilisation de l'éclairage

Les résultats des simulations d'éclairages confortent les observations réalisées en milieu souterrain, dans la carrière de Lugasson, c'est-à-dire que les lampes à graisse et les torches semblent bien adaptées à des environnements et/ou à des utilisations différentes. Les lampes sont mieux adaptées au stationnement long, fonctionnent bien dans les espaces de petites dimensions et bénéficient grandement d'un facteur de réflectance important (ainsi les sols sont visibles à Lascaux, où les parois sont plus claires, mais pas à Cussac), il est tout de même difficile d'observer les obstacles en creux (ex. soutirage), et selon la réflectance des parois, les blocs et parois sont visibles à quelques mètres de distance.

Les torches, au contraire, sont mieux adaptées à l'exploration et au parcours de longues distances, aux vastes espaces (les parois sont visibles jusqu'à une dizaine de mètres, selon la réflectance), et comme l'éclairage produit est plus puissant et omnidirectionnel, les sols sont toujours visibles et cet éclairage est moins dépendant de la réflectance.

L'utilisation de luminaires placés au sol permet de mieux éclairer les parties basses, dont le sol, et on peut imaginer, dans certaines grottes, l'utilisation de petits foyers ou de lampes à graisse pour créer un balisage lumineux. Comme les luminaires nécessitent un entretien régulier, ce type de dispositif nécessiterait la présence d'une personne chargée de l'entretien de la lumière.

Cependant, nous écartons ce type de dispositif à Cussac, où aucun indice n'atteste d'une déambulation ample des visiteurs ni de séjours prolongés (Ledoux *et al.*, 2017 ; Ledoux, 2019 ; Fourment *et al.*, 2020). La question reste ouverte à Lascaux, notamment sur les modalités d'utilisation des très nombreuses lampes à graisse découverte sur le site (Delluc et Delluc, 1979a), puisque des installations longues ont nécessairement eu lieu pour réaliser les œuvres.

Les simulations nous ont également permis de remarquer l'influence de la proximité des parois et/ou des voûtes sur la performance de l'éclairage portatif. Par exemple, avec une lampe à graisse, il est aisé d'observer le Panneau du Pont d'Argile à une distance d'environ 7 m lorsque l'observateur est proche du sol, des voûtes et des parois (Figure 128), mais dès que l'observateur se tourne vers la gauche, en direction du pont d'argile, et que la lampe s'éloigne des parois, il devient difficile de visualiser la paroi opposée, pourtant située à seulement 3 m de distance de l'observateur (Figure 130, d).

Enfin, en ce qui concerne les déambulations dans nos sites d'étude, il semble qu'à Cussac ils aient davantage été induits par la topographie que par l'éclairage, et nous pouvons faire le même constat concernant l'accès au Puits de Lascaux. Nous supposons donc que les lampes à graisse et les torches sont des luminaires adaptés et la plupart du temps suffisants pour s'orienter dans l'espace, à condition de les adapter aux lieux et aux besoins (éclairages portés ou posés, lampes à graisse ou torches, nombre de luminaires, etc.).

2. Apport de l'écholocalisation

Afin de comprendre dans quelle mesure l'écholocalisation peut apporter des informations sur l'espace, nous avons mené une expérience auprès d'un panel d'adultes sans entraînement dédié à l'écholocalisation. Les résultats de l'expérience laissent apercevoir que l'entraînement auditif est décisif pour pouvoir s'orienter sous terre, même sans lien avec l'écholocalisation (entraînement musical par exemple), mais les performances restent très variables d'un individu à l'autre. Les résultats des participants ne paraissent pas être suffisants pour s'orienter sous terre ou pour y repérer le volume, la forme des espaces, ou les éventuels obstacles. Seule la morphologie très générale des espaces peut être reconnue. En particulier, il semble plus facile pour des personnes non-entraînées de discriminer les espaces de dimensions réduites (ex. couloir bas), les entrées et les centres d'espaces larges, alors que les espaces de dimensions

moyennes semblent majoritairement associés au hasard. Enfin, les détails (changement de hauteur du sol, obstacle, bloc effondré, etc.) passent complètement inaperçus. Cependant, ces observations doivent être prises avec précautions et **ne peuvent pas être directement transposées à d'autres sociétés** puisque notre perception de la profondeur, en particulier pour les personnes sans entraînement spécifique, est très probablement liée, aussi, à notre culture et au mode de vie de nos sociétés occidentales contemporaines. D'autre part, nous ne connaissons pas le degré d'entraînement à l'écholocalisation des Préhistoriques.

Dans le cadre de l'accès au Puits de Lascaux, alors que l'utilisation d'une lampe à graisse semble être le meilleur moyen pour s'orienter dans le conduit qui mène au Puits, cet éclairage permet difficilement d'estimer la profondeur du Puits et de la Grande Diaclase. Dans ce cadre, l'écholocalisation pourrait permettre d'apporter cette information, même sans expérience importante (on peut par exemple se rappeler que pour estimer la profondeur d'un puits, il est possible d'y jeter des pierres). L'utilisation de l'écholocalisation peut alors ponctuellement apporter des éléments de compréhension sur l'environnement que l'éclairage ne peut fournir, par exemple dans les cas d'obstacles profonds, ou pour estimer la longueur d'un conduit.

3. Perspectives

Pour poursuivre nos investigations sur les modalités du déplacement souterrain, nous envisageons de réaliser des simulations dans des situations plus variées, notamment des espaces plus grands pour étudier le comportement de l'éclairage à la torche lorsque les voûtes et les parois ne peuvent pas être majoritairement éclairées : est-il alors nécessaire, comme dans le cas de la lampe à graisse, de se positionner près d'une paroi ? Ou l'éclairage du sol peut-il lui-même servir de repère ? Nous souhaiterions également simuler un éclairage pour un groupe disposant de plusieurs luminaires (par exemple, l'utilisation d'une lampe à graisse par personne permet-elle de produire suffisamment d'éclairage pour s'orienter dans de grands espaces ?). Enfin, nous souhaiterions poursuivre notre expérience de l'écholocalisation en élargissant notre panel de participants à des personnes pratiquant l'écholocalisation et à des personnes habituées à évoluer en milieu souterrain.

B. Éclairage et choix graphiques

1. Le cas du Panneau de la Découverte

L'analyse des champs de visibilité est un moyen de visualiser les potentiels lieux adaptés à l'observation d'un ensemble graphique. À Cussac, les contraintes de circulation rendent ces cartes difficiles à effectuer sur place. Les simulations d'éclairages permettent de s'affranchir de ces limites et apportent un autre atout : l'utilisation de l'éclairage paléolithique.

Les simulations numériques nous montrent ainsi un continuum de champs de visibilité, depuis un champ très réduit lorsqu'on utilise une seule lampe à graisse portée par l'observateur à un champ très large dans le cas de l'utilisation d'une torche ou de plusieurs lampes positionnées près du panneau. En particulier, deux aires d'observation semblent se distinguer : depuis l'extrémité du méandre inférieur 5Av et juste en amont du panneau, sur la montée qui mène au bloc sous le panneau. En effet, ces deux emplacements, non seulement permettent une vue d'ensemble sur le panneau quel que soit l'éclairage, mais en plus permettent de l'observer depuis une perspective quasi orthogonale, qui devrait limiter les déformations des entités gravées (ce dernier point a pu être confirmé par la prise de photographies).

L'éclairage indirect (c'est-à-dire positionné à proximité du panneau alors que l'observateur peut être situé plus loin) semble plus approprié à l'observation du Panneau de la Découverte car la surface est ainsi exempte d'ombre projetée, et on peut imaginer qu'il est plus facile de faire jouer l'ombre des gravures dans ces conditions.

Enfin, nous avons simulé différents dispositifs permettant d'éclairer le(s) graveur(s), et la présence d'un petit foyer ou d'une torche posée à gauche du graveur semble être le plus adapté. Cette localisation avait été sélectionnée car un point de chauffe y a peut-être été décelé (Lévêque et Mathé, 2013 ; Lévêque, 2020), et les gravures étant interprétées comme le fait d'un droitier, l'éclairage à gauche lui éviterait l'ombre portée de son bras (voir vidéo sur : <https://vimeo.com/374172429> ; Figure 190).

Dans l'hypothèse où le panneau aurait été gravé en la présence d'un « public », la scène la plus cohérente nous semble être l'utilisation d'un petit foyer ou d'une torche posée ou portée à gauche du graveur (cela permet d'éclairer l'ensemble de la surface, et la puissance de cet éclairage permettrait à l'« assistance » de ne pas être complètement plongé dans l'obscurité), et

de positionner les observateurs à l'extrémité du méandre inférieur M5Av ou en face. En effet, c'est de ce point de vue que l'ombre portée du graveur est la moins gênante.



Figure 190 : QR-code permettant l'accès à la reconstitution de l'accès au Panneau de la Découverte depuis un smartphone (Réalisation Sarah Feruglio/CÉGO/Nouvelle-Aquitaine/MC).

2. Les couleurs de Lascaux

L'une des originalités du dispositif pariétal de Lascaux est la présence de peintures polychromes et d'une variété des teintes particulièrement importante en contexte paléolithique (Aujoulat, 2002, 2004). Nous avons donc souhaité investiguer sur l'influence de l'éclairage sur la perception des couleurs.

Notre première observation est que la nature du spectre de l'éclairage semble avoir assez peu d'influence sur le rendu des couleurs, la puissance ayant l'impact le plus déterminant. Les couleurs sont globalement assombries mais peuvent tout de même se distinguer les unes des autres. En particulier, alors que le jaune et le rouge semblent former un continuum de nuances, parfois difficile à discriminer, le noir ressort toujours très nettement.

Dans le secteur testé (le Diverticule Axial), l'utilisation de lampes à graisse, que ce soit pour la création ou l'observation, semble plus appropriée que la torche : l'espace étant étroit, la torche provoque une surexposition du porteur, tandis que la présence d'une haute flamme et de fumée pourraient gêner (bien que la gêne de la fumée soit perçue différemment selon les cultures). De plus, l'apport de l'intensité lumineuse des torches n'est pas nécessaire puisque l'ensemble des traits sont toujours visibles avec la lampe la plus puissante.

Enfin, nous avons été frappée par le fait que sur deux des quatre panneaux analysés, la limite de dépôt de la couleur correspond à la limite atteinte par l'éclairage à la lampe à graisse (en

particulier avec la lampe la plus puissante). De plus nombreuses simulations seraient nécessaires pour valider ou non cette observation qui pourrait apporter de nouvelles informations sur l'influence de l'éclairage dans la création du dispositif pariétal.

3. Perspectives

Pour poursuivre notre investigation sur la visibilité du Panneau de la Découverte, nous allons reproduire des simulations avec un modèle 3D plus précis, permettant de visualiser les gravures (ce modèle existe et doit être incorporé au modèle général auquel nous avons accès). Cela nous permettra notamment de vérifier notre hypothèse sur l'observation du Panneau de la Découverte depuis l'extrémité du méandre inférieur M5Av. Il serait également intéressant de pouvoir intégrer la présence d'un graveur afin de simuler l'impact de son ombre.

À Lascaux, nous aimerions poursuivre le travail commencé ici en l'étendant à d'autres secteurs, notamment ceux où prédomine la gravure, ou des zones plus larges et où l'on peut avoir plus de recul sur les figures peintes. Nous avons également remarqué une différence de visibilité entre les deux lampes à graisse testées, dont la seule différence dans la fabrication réside dans la nature de la graisse utilisée. Il semblerait donc intéressant de réaliser de nouvelles mesures sur des lampes où seraient incorporées des graisses issues d'animaux plus proches de ceux présents au Paléolithique supérieur, que ce soit en termes de phylogénie ou de mode de vie (bison, ovibos, cheval sauvage, renne, etc.).

C. Acoustique des sites

1. Considérations méthodologiques

À Cussac, nous avons pu confronter trois méthodes d'analyses acoustiques : à la voix et à l'oreille par I. Reznikoff (Reznikoff, 2019), à l'aide d'instruments de mesures et via les simulations. L'ensemble des méthodes présente des avantages et des inconvénients, et chacune est complémentaire : la perception à la voix et à l'oreille permet une grande mobilité et une adaptation aux différents espaces, mais elle n'est pas reproductible et son interprétation reste subjective et propre à l'individu testeur. Les mesures et simulations contrebalancent ces inconvénients et offrent la possibilité d'obtenir des critères comparatifs, mais les mesures sont limitées aux accès autorisés. **Les simulations semblent permettre le meilleur compromis** : mobiles, détachées des contraintes du terrain, reproductibles et objectives. Cependant, elles nécessitent une phase de mesures en amont permettant de calibrer l'outil de simulation. La confrontation des résultats entre ces trois méthodes en un même lieu a permis de mettre en évidence quelques différences, qui peuvent être révélatrices de problèmes, peut-être liés à l'enregistrement des sons (parfois nous avons dû nous poser près d'une paroi, par exemple). Cependant cela ne modifie pas la conclusion : la grotte de Cussac est une cavité peu réverbérante (avec un TR compris entre 0,3 et 1,3 s), bien plus adaptée à la parole qu'à des effets musicaux.

À l'aide des modélisations et simulations numériques, nous avons pu reconstituer l'acoustique paléolithique de Lascaux (en particulier dans la Salle des Taureaux), ce qui nous a permis d'apporter des éléments de compréhension sur l'utilisation du site par les préhistoriques. La morphologie du site étant à jamais disparue, ce travail constitue un apport méthodologique majeur à l'étude de l'acoustique des sites.

2. Deux cavités à l'effet sonore différent

D'après nos travaux, les deux cavités (Cussac et Lascaux) disposent d'un comportement acoustique très différent. Les quelques simulations réalisées à Lascaux dans quatre secteurs montrent toutes une bonne résonance, et une grotte plus adaptée à la production et à l'écoute de musique que de la parole. En particulier, et sans surprise, **la Salle des Taureaux est l'espace le plus réverbérant que nous ayons enregistré pour la grotte, et le plus réverbérant en comparaison des mesures réalisées dans d'autres grottes ornées** (Fazenda *et al.*, 2017). Tandis que la grotte de Cussac est assez peu réverbérante, le son y est assez sec, donc peu propice à de la musique mais, partout dans la grotte, on bénéficie par contre d'une excellente distinction des voix et de la parole. Quelques secteurs se démarquent cependant, soit par un TR particulièrement faible (inférieur à 0,5 s), tous localisés en Branche Aval, à savoir, sous le Panneau de la Découverte, en aval du Locus 2, dans le *By-pass* et près du Panneau de l'Animal Acéphale, tandis que d'autres se démarquent au contraire par un TR moyen plus long, supérieur à 1 s : le Locus 3 (seul secteur de ce type en Branche Aval, et associé à des dépôts de restes humains), le secteur de la Salle des Gours (dont la morphologie a cependant beaucoup changé depuis le Gravettien), la zone graphique des Griffades, le Panneau du Cavicorne, autour du Panneau du Rhinocéros, et au niveau du Panneau des Figures Féminines. Il a déjà été supposé que les branches Aval et Amont fonctionnent différemment (Jouteau *et al.*, 2019 ; Ledoux, 2019), et le fait que la réverbération soit en général plus longue en amont, et plus faible en aval (excepté dans l'un des trois locus à restes humains), peut nous conduire à interroger la place de la perception sonore dans la mise en place du dispositif pariétal.

Si la différence de qualité acoustique entre Lascaux et Cussac ne peut prouver que les activités qui s'y déroulaient étaient plus portées par la musique dans la première, et par la parole dans la seconde, il s'agit tout de même d'un facteur nécessaire à intégrer à l'étude des activités réalisées sur place.

3. Perspectives

Pour poursuivre notre étude de l'acoustique de la grotte de Cussac, plusieurs améliorations doivent être envisagées : disposer d'un modèle 3D plus étendu afin d'investiguer d'autres secteurs parmi ceux qui sont inaccessibles sur place et pour analyser l'influence du chenal de voûte sur l'acoustique, et disposer d'un modèle 3D reconstituant l'aspect paléolithique de Cussac, en particulier dans les secteurs où la formation de spéléothèmes a pu modifier l'ambiance acoustique.

À Lascaux, bénéficier d'un modèle 3D paléolithique plus étendu est également une nécessité pour avancer nos recherches et pouvoir réaliser des simulations dans plus de secteurs, de sorte à obtenir une vue d'ensemble de l'acoustique de la grotte, depuis les secteurs les plus accessibles et graphiquement investis jusqu'aux secteurs les plus retirés (Puits et Cabinet des Félin, par exemple).

D. Deux grottes, deux mondes

Les grottes « ornées » ne sont pas que des lieux d'investissement graphique, les manifestations artistiques s'intégrant probablement dans une dynamique d'« appropriation » ou d'utilisation plus globale du site, selon des modalités différentes selon les époques, les régions, et les cavités. À ce titre, la découverte de Cussac est venue rebattre les cartes (Aujoulat *et al.*, 2001a ; Jaubert, Feruglio, Fourment dir., 2020). Pour comprendre l'utilisation d'une grotte par un groupe et sa place dans la société paléolithique, il est indispensable de faire en sorte de capturer une vision globale des activités qui s'y sont déroulées. Or, ces activités sont évidemment dépendantes de l'appréhension du site par les groupes qui les ont investis. À travers ces simulations acoustiques et d'éclairages, nous avons souhaité nous rapprocher de la perception des Préhistoriques afin d'en tirer des informations sur les modalités de l'investissement du milieu souterrain.

Pour cette étude, nous avons sélectionné les grottes de Cussac et de Lascaux, d'une part car elles disposent toutes deux d'un modèle 3D texturé (total ou partiel) de bonne précision, accessible par convention, mais aussi car elles sont complémentaires à bien des égards. Nous n'y reviendrons pas à nouveau, mais hormis le fait qu'elles soient le fait de deux traditions culturelles, ces deux cavités, d'aspect naturel très différent, ont également été investies différemment : Lascaux est connue pour la présence de couleurs, de manifestations artistiques en continuité graphique, et par la présence de nombreux vestiges matériels (Leroi-Gourhan et Allain dir., 1979 ; Aujoulat, 2002, 2004 ; Glory, 2008), tandis que la grotte de Cussac est caractérisée par la dominance de la gravure, par un dispositif pariétal organisé en entités graphiques isolées et panneaux, tandis que les vestiges y sont peu nombreux mais atypiques, notamment par la présence de restes humains (Aujoulat *et al.*, 2001a, 2001b, 2013 ; Jaubert *et al.*, 2012 ; Feruglio *et al.*, 2020a ; Kacki *et al.*, 2020 ; Jaubert, Feruglio et Fourment dir., 2020).

Les simulations numériques que nous avons menées lors de ce projet ont également permis de montrer des propriétés acoustiques et visuelles différentes, ce qui a nécessairement engendré des modalités d'« appropriation » et d'organisation du milieu souterrain différentes.

1. Un usage différent des lampes à graisse et des torches

Le modèle 3D de la grotte de Cussac étudié dispose d’espaces larges et hauts et dont les parois sont assez absorbantes. Nos simulations montrent que dans ces conditions, il est malaisé d’éclairer l’espace et, plus difficile encore, le sol, avec des lampes à graisse. Or, le sol de cette partie de la grotte est irrégulier, ponctué de profonds soutirages ou de regards sur le réseau inférieur (bien que nous n’en connaissions pas encore la chronologie, nombre d’entre eux ont dû exister au Paléolithique), ce qui peut rendre l’utilisation de lampes pour le déplacement ou l’observation de l’espace difficile, voire dangereux. À l’inverse, l’espace n’y est jamais trop étroit pour que la torche puisse être dangereuse ou peu pratique, bien qu’elle mobilise une main. L’existence de torches est de plus attestée par la présence de mouchages, quoique ces derniers soient peu nombreux (et ne sont peut-être pas tous issus de dispositifs éclairants). Plusieurs hypothèses peuvent l’expliquer :

- La dynamique de fréquentation dans Cussac a pu être essentiellement marquée par de l’exploration et du déplacement. Ainsi, peu de stationnements ont pu être nécessaires, et donc peu de mouchages liés à l’éclairage ont été créés ;
- Il y a eu peu d’incursions au cours du temps, et ces dernières étaient de courtes durées (Ledoux, 2019) ;
- Une seule torche était utilisée pour éclairer le groupe d’individus qui investissait la grotte, la torche étant remplacée par une nouvelle lorsqu’elle s’essoufflait ;
- Les torches ont pu être réservées à une déambulation de prospection.

L’utilisation de lampes à graisse dans la Branche Aval semble, d’après nos connaissances actuelles sur le fonctionnement et les capacités éclairantes de ce luminaire, peu probable car cet éclairage est plutôt associé à du stationnement long, or les études portant sur les traces d’activités dans la grotte tendent à montrer que peu de stationnements ont eu lieu dans cette partie de la cavité, y compris sous les panneaux (Ledoux, 2019), ou aux parcours d’espaces bas et/ou étroits, ce qui ne correspond pas à la topographie de la grotte entre l’Entrée et le Grand Panneau à 310 m (c’est-à-dire la partie de la Branche Aval à laquelle nous avons eu accès).

La présence de deux potentielles lampes en amont (Ledoux *et al.*, 2017 ; Fourment, 2020) montre qu’un autre type d’éclairage a été utilisé au sein de la cavité. En particulier, ces deux lampes sont de nature différente : la première est fixe, posée dans un espace très restreint, à la

fois bas et étroit, encombré de spéléothèmes en assez grande partie déjà présents au Paléolithique (Figure 51, a), tandis que la seconde à 845 m de l'entrée (Figure 51, b) ne semble pas être une lampe mobile au vu de ses dimensions, mais elle a pourtant été déplacée et est aujourd'hui située dans un espace qui ne justifie pas son utilisation en stationnement long : pas de vestiges particuliers, ni de panneau orné. Différentes raisons peuvent être invoquées quant à leur présence et utilisation : mise en place d'un balisage lumineux au sol, longue présence dans certains secteurs de la cavité, stationnements dans des espaces de faibles dimensions, indisponibilité des matières premières nécessaires à la fabrication de torches, utilisation différente de la Branche Amont, ou encore pour des raisons culturelles.

À Lascaux, nous avons simulé différents éclairages dans la zone de l'Abside qui mène au Puits, et quel que soit l'éclairage sélectionné, les parois et le sol sont entièrement visibles. Si les torches permettent de percevoir plus de détails, ceux-ci ne sont pas nécessaires au déplacement ou à l'orientation dans l'espace, et la puissance de la torche peut même devenir un inconvénient lorsque l'espace se rétrécit, et même dangereux dans le conduit qui mène au Puits et qui est très restreint (bien qu'il ne soit pas impensable que des torches de petites dimensions aient été utilisées par les préhistoriques).

2. La grotte « sanctuaire » de Cussac

Nous reprenons ici volontairement un terme qui peut être discuté, « sanctuaire », car cette grotte, ornée mais également sépulcrale, a ainsi été décrite par plusieurs auteurs (Aujoulat et al., 2001a, 2002, 2013 ; Jaubert et al., 2017, 2018 ; Ledoux, 2019). Les indices de fréquentation tendent à montrer la présence d'un nombre restreint d'individus, et surtout sur un temps court. Que ce soit les traces d'activités (aucune superposition de trace ou d'empreinte anthropique n'est ainsi connue dans la grotte ; Ledoux, 2019 ; Fourment *et al.*, 2020) ou les modalités de création des principaux panneaux (ex. des palimpsestes probablement plutôt lisibles avec le mouvement au moment de leur création, et de l'homogénéité du dispositif pariétal qui indiquerait un dispositif mis en place en un temps court, Feruglio *et al.*, 2019, 2020a), tout indique jusqu'à présent des incursions ponctuelles par un petit groupe d'individus consacré à la réalisation des gravures et aux dépôts humains (probablement en plusieurs temps, Kacki *et al.*,

2020 ; Villotte *et al.*, 2020). Ce mode de fréquentation nous semble cohérent avec l'utilisation préférentielle des torches dans la Branche Aval de la grotte : adaptées à la circulation en groupe, et permettant le meilleur compromis de visibilité des panneaux pour les observateurs et le graveur, leur principal inconvénient reste leur durée de vie, or dans l'optique d'incursions courtes et par quelques individus, il semble alors possible – et nécessaire – de préparer un nombre de torches suffisant pour l'incursion souterraine.

La grotte de Cussac est une cavité de très grande dimension (1,6 km de long d'une extrémité à l'autre sans compter les méandres recoupés, et nous savons par les TrAcs que l'ensemble du réseau a été visité par les Paléolithiques), ponctuée de nombreux accidents sur son parcours, et il est alors nécessaire d'être particulièrement préparé lors des incursions. La présence d'au moins un corps en connexion anatomique, probablement un dépôt primaire (Kacki *et al.*, 2020) transporté au minimum 150 m sous terre jusqu'à une bauge, peut-être préalablement choisie, est également un argument qui montre que chaque incursion dans Cussac devait être préalablement préméditée et très préparée.

D'autre part, il est possible que les grands panneaux (p. ex. Panneau de la Découverte et Grand Panneau, Feruglio *et al.*, 2019) soient issus d'une performance collective narrative avec un ou plusieurs graveurs et une « audience » limitée. Au vu des caractéristiques acoustiques de Cussac, nous posons ici l'hypothèse que cette performance était probablement plutôt accompagnée par la parole, ou éventuellement du chant, que par de la musique.

3. Le cas Lascaux

Lascaux semble être l'exact opposé de Cussac, avec des incursions de probablement longue durée, que ce soit pour la création du dispositif pariétal, possiblement en plusieurs étapes, de façon plurielle (en particulier dans le cadre de la zone ornée de l'Abside, couverte d'un inextricable palimpseste), ou pour les incursions ultérieures, comme en témoignent les très nombreux vestiges découverts dans la cavité. Ces incursions semblent toutefois avoir eu lieu dans un temps relativement court, ne couvrant que le Magdalénien initial (Ducasse et Langlais, 2019).

Synthèse et discussion

Les espaces y sont moins larges, les parois plus claires, et les installations probablement plus longues qu'à Cussac (Aujoulat, 2002, 2004), tous ses arguments vont en faveur de l'utilisation de lampes à graisse au détriment des torches. De plus, l'absence de mouchages en parois et les nombreux (entre 36 et plus de 130) exemplaires de lampes à graisse découverts dans la grotte vont également dans ce sens. La présence de charbons au sol permet également de proposer l'hypothèse de l'utilisation de foyers fixes. L'utilisation de lampes à graisse a d'ailleurs peut-être eu une influence sur la construction du dispositif pariétal, et on peut légitimement se poser la question de l'éclairage des ensembles ornés. Étaient-ils destinés à être mis en scène et observés par un « public », comme les grands panneaux de Cussac, ou constituaient-ils le décor global d'un site où se déroulaient des activités (rituelles et/ou profanes) ?

Nous pouvons tous remarquer et admirer l'utilisation des parois couvertes de calcite de la Salle des Taureaux comme support pour les plus grandes peintures de la Préhistoire, et notre étude de l'acoustique amène un nouvel argument en faveur de l'exceptionnalité du site : sa réverbération est longue, en particulier dans la Salle des Taureaux, et l'ensemble des secteurs investigués jusqu'à présent semblent mieux adaptés à la musique qu'à la parole. Cela soulève donc une nouvelle question : les Paléolithiques ont-ils également adapté leurs productions sonores dans la grotte à cette caractéristique ? Pourrait-on imaginer des activités accompagnées de musique dans Lascaux ?

Perspectives

Outre les nombreuses améliorations proposées au fil du texte, nous pensons que plusieurs perspectives plus larges mériteraient d'être développées :

- Coupler nos expérimentations et nos simulations avec un travail sur les mouchages et charbons connus à Cussac afin de mieux comprendre la dynamique des déplacements et stationnements dans la grotte, laquelle est immense et diversifiée quant à sa fréquentation sur un si long itinéraire ;
- Étendre nos simulations à d'autres secteurs de Cussac et les coupler avec les observations réalisées sur les panneaux (Feruglio *et al.*, 2019, 2020a), sur l'organisation du dispositif pariétal (Jouteau *et al.*, 2019) sur la géologie du site (Ferrier *et al.*, 2017a) et sur les traces d'activités (Ledoux *et al.*, 2017 ; Fourment *et al.*, 2020) afin de mieux comprendre comment perception, investissement du milieu souterrain et organisation du dispositif pariétal dialoguent, interagissent. Le développement en cours d'un SIG devrait aider à multiplier les observations globales et interdisciplinaires ;
- Continuer à travailler sur la reconstitution 3D de Lascaux au Paléolithique, notamment à travers une simulation de l'éclairage extérieur depuis l'entrée, la poursuite des simulations acoustiques afin d'obtenir une vision globale des caractéristiques sonores de la cavité, ou encore, par exemple, en proposant des simulations faisant intervenir plusieurs dispositifs éclairants afin de comprendre les modalités d'éclairage des grands panneaux ;
- Élargir notre panel de sites afin d'aborder de nouveaux contextes (p. ex. grotte de Bruniquel, Salle de la Structure : J. Jaubert, comm. pers.), ce qui devrait d'une part nous aider à fortifier notre développement méthodologique, et d'autre part nous permettre de mieux comprendre l'appréhension globale du milieu souterrain par les Préhistoriques.

Conclusion

Notre double objectif, adapter des outils de simulation d'acoustique et d'éclairage à deux grottes ornées que tout oppose et apporter des éléments de compréhension sur la perception de leur milieu souterrain respectif par les Préhistoriques est, nous l'espérons, atteint.

Nous avons choisi de développer des études de cas ponctuelles plutôt que d'investir de manière exhaustive un site car il nous semblait plus important de montrer l'adaptabilité de nos outils à des contextes différents et de montrer comment surmonter certains obstacles (comme l'impossible accès au site) afin d'**offrir une base méthodologique scientifique et rigoureuse sur laquelle poursuivre**. L'orientation de ce travail a été volontairement plus méthodologique qu'archéologique car c'est un nouveau champ de la recherche que nous ouvrons. Les conclusions plus formelles sur le lien entre perception et dispositif pariétal de chacune de ces grottes est dépendant de recherches en cours (projet MicroPaGO, dir. D. Lacanette, 2014-2021 ; PCR LAsCO, dirs. M. Langlais et S. Ducasse, 2018-2021 ; PCR Cussac, dir. J. Jaubert, 2008-2020), mais maintenant que les avantages concernant les simulations numériques ont été identifiés et les limites balisées, il est certain qu'il sera possible de poursuivre conjointement nos efforts pour améliorer notre connaissance de l'appréhension et de l'organisation des cavités ornées par les Préhistoriques.

Les simulations réalisées ont ainsi pu témoigner d'une perception de l'espace souterrain différente à Lascaux et à Cussac, perception à laquelle se sont adaptés les groupes qui les ont fréquentées, et nous avons pu proposer quelques hypothèses de la conséquence de cette différence de perception.

À travers ce travail, nous confirmons qu'il est indispensable, pour mieux appréhender l'occupation de l'espace souterrain au Paléolithique, de faire se croiser un maximum de données et de champs disciplinaires : traces d'activités, manifestations artistiques, vestiges matériels, géologie, taphonomie, et perception. Enfin, nous souhaitons ouvrir cette conclusion sur la réflexion suivante : peut-on continuer à parler d'interdisciplinarité quand autant de disciplines s'entremêlent si « intimement » ? Ou **doit-on commencer à parler de transdisciplinarité ?**

~ Bibliographie ~

A

- ASIAIN R. et SAURA P. (2018)** – The light of the Paleolithic artists, *actes du XVIII^e congrès mondial UISPP* (Paris, 4-9 juin 2018).
- ALLAIN J. (1965)** – Les lampes magdaléniennes de Saint-Marcel (Indre), *Congrès préhistorique de France*, 16^e session (Monaco, 1959), p. 178-183.
- ALONSO L. (2018)** – *Hétérogénéité spatio-temporelle du microbiote de la grotte de Lascaux*, thèse de doctorat, Université de Lyon, 200 p.
- ARIAS P. (2009)** – Rites in the dark? An evaluation of the current evidence for ritual areas at Magdalenian cave sites, *World Archaeology*, 41, 2, p. 262-294.
- ARNOLD J.R. et LIBBY W.F. (1951)** – Radiocarbon Dates, *Science*, 113, 2927, p. 111-120.
- AUBOURG A. (1983)** – La lampe préhistorique, *Bulletin trimestriel des travaux de la Société d'Émulation de l'Arrondissement de Montargis*, 60, p. 58-74.
- AUDIGIER V., HUSSON F. et JOSSE J. (2016)** – A principal components method to impute missing values for mixed data, *Advances in Data Analysis and Classification*, 10, 1, p. 5-26.
- AUJOULAT N. (2002)** – *Lascaux. Le rôle du déterminisme naturel : des modalités d'élection du site aux protocoles de construction des édifices graphiques pariétaux*, thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, Bordeaux, 3 vol., 594 p.
- AUJOULAT N. (2004)** – *Lascaux. Le geste, l'espace et le temps*, Paris, Ed. du Seuil, 274 p.
- AUJOULAT N., GENESTE J.-M., ARCHAMBEAU C., DELLUC M., DUDAY H. et HENRY-GAMBIER D. (2001a)** – La grotte ornée de Cussac (Dordogne). Observations liminaires, *PALEO*, 13, p. 9-18.
- AUJOULAT N., GENESTE J.-M., ARCHAMBEAU C., BARRAUD D., DELLUC M., DUDAY H. et HENRY-GAMBIER D. (2001b)** – La grotte ornée de Cussac [The Decorated Cave of Cussac], *International Newsletter of Rock Art Research INORA*, 30, p. 3-9.
- AUJOULAT N., GENESTE J.-M., ARCHAMBEAU C., DELLUC M., DUDAY H. et HENRY-GAMBIER D. (2002)** – La grotte ornée de Cussac – Le Buisson-de-Cadouin (Dordogne) ; premières observations, *Bulletin de la Société préhistorique française*, 99, 1, p. 129-137.
- AUJOULAT N. et PERAZIO G. (2005)** – Contribution de la saisie tridimensionnelle à l'étude de l'art pariétal et de son contexte physique, avec la collaboration de D. Faverge et F. Peral, *Bulletin de la Société préhistorique française*, 102, 1, p. 189-197.
- AUJOULAT N. et FERUGLIO V. (2009)** – L'art pariétal, in J. Jaubert (dir.), *Grotte de Cussac (Le Buisson-de-Cadouin, Dordogne). Projet Collectif de Recherche, Rapport 2009*, Service Régional de Archéologie d'Aquitaine, février 2010, p. 116-155.

Bibliographie

AUJOULAT N., FERUGLIO V., FOURMENT N., HENRY-GAMBIER D. et JAUBERT J. (2013) – Le sanctuaire gravettien de Cussac (Le Buisson-de-Cadouin, Dordogne, France) : premiers résultats d'un projet collectif de recherche, *INORA*, 65, p. 7-19.

B

BAHN P. (2003) – Location, location: what can the positioning of cave and rock art reveal about Ice Age motivations? in A. Pastoors, G. C. Weniger, (eds.), *Höhlenkunst and Raum: Archäologische und architektonische Perspektiven*, Jan van der Most, Düsseldorf, p. 11-20.

BALACEY J.-F. (2016) – Évaluation de l'éclairage des éclairages à leds pour la spéléologie, *Spelunca*, 143, p. 38-45.

BARTH F.E. (1980) – Das Prähistorische Hallstatt. Bergbau und Gräberfeld, *Die Hallstattkultur. Frühform europäischer Einheit*, Internationale Ausstellung des Landes Oberösterreich, Steyr, p. 67-69.

BASSIER C. (1979) – Représentation en plan et en volume de la grotte de Lascaux. Système de repérage et de localisation, in Arl. Leroi-Gourhan et J. Allain (dir.), *Lascaux Inconnu*, Paris, Ed. du Centre National de la Recherche Scientifique (XIIe supplément à Gallia Préhistoire), p. 41-44.

BEAUNE S. A. de (1983) – *Les lampes du Paléolithique supérieur français : définition, typologie et fonctionnement*, thèse de doctorat, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Paris, 2 vol., 450p.

_____. (1987a) – *Lampes et godets au Paléolithique*, Paris, Ed. du Centre National de la Recherche Scientifique (XXIIIe supplément à Gallia Préhistoire), 280 p.

_____. (1987b) – Palaeolithic lamps and their specialization: A hypothesis, *Current Anthropology*, 28, 4, p. 569-577.

_____. (2000) – Les techniques d'éclairage paléolithiques : un bilan, *PALEO*, 12, p. 19-27.

_____. (2018) – Le proche et le lointain. La perception sensorielle en préhistoire, *L'Homme*, 227-228, p. 69-100.

BEGOUËN H. (1939) – Les bases magiques de l'art préhistorique, *Scientia*, 33, 65, p. 202-216.

BEGOUËN R., Clottes J., Feruglio V. et Pastoors A. (2014) – *La Caverne des Trois-Frères. Anthologie d'un exceptionnel sanctuaire préhistorique*, Paris, Somogy éditions d'Art et Association Louis Bégouën, 247 p.

BERROUET F. (2009) – *Les altérations d'origine biologique dans l'art pariétal : exemple des relations structurales et conceptuelles entre le mondmilch et les représentations paléolithiques. Cas particulier de la grotte de Lascaux et enjeux conservatoires*, thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, Bordeaux, 284 p.

Bibliographie

- BLANC S. (1948-1950)** – Grotte de Lascaux, commune de Montignac-sur-Vézère (Dordogne), *Gallia*, 6, p. 395-398.
- BLAS CORTINA M. A. (de) (2005)** – Un témoignage probant de l'exploitation du cuivre dans le nord de la Péninsule Ibérique : le complexe minier d'El Aramo (Asturies), *Mémoires de la Société préhistorique française*, 37, p. 195-205.
- BOUDIER-BLET P. (2018)** – *La question de la visibilité de l'art pariétal paléolithique européen : apports méthodologiques interdisciplinaires appliqués au registre animalier du Roc-aux-Sorciers (Angles-sur-l'Anglin, France)*, Mémoire de master 2, Université Toulouse Jean Jaurès, Toulouse, 56 p.
- BOURDIER C. (2013)** – Rock art and social geography in the Upper Paleolithic. Contribution to the socio-cultural function of the Roc-aux-Sorciers rock-shelter (Angles-sur-l'Anglin, France) from the viewpoint of its sculpted frieze, *Journal of Anthropological Archaeology*, 32, 4, p. 368-382.
- BOURDIER C., Fuentes O. et Pinçon G. (2017)** – Methodological contribution to the integrated study of European Palaeolithic rock art: the issue of the audience and the perceptibility of Roc-aux-Sorciers rock art (Angles-sur-l'Anglin, France), *Quaternary International*, 430, p. 114-129.
- BREUIL H. (1950)** – Lascaux, *Bulletin de la Société préhistorique française*, 47, p. 355-363.
- _____. (1952) – *Quatre cents siècles d'art pariétal : les cavernes ornées de l'âge du renne*, Montignac, Centre d'études et de documentation préhistoriques, 416 p.
- _____. (1960) – Ma vie en Périgord (1897-1959), *Bulletin de la Société historique et archéologique du Périgord*, 87, p. 114-131.
- BREUIL H. et BÉGOUËN H. (1958)** – *Les Cavernes du Volp : Trois Frères, Tuc d'Audoubert : à Montesquieu-Avantès (Ariège)*, Paris, Arts et métiers graphiques, 124 p.
- BROT J. (2005)** – *L'utilisation des reliefs naturels dans l'art gravé et sculpté pariétal du Paléolithique supérieur français*, Mémoire de l'École Pratique des Hautes Études, Université de Bourgogne, Dijon, 187 p.
- BUISSON D. (1990)** – Les flûtes paléolithiques d'Isturitz (Pyrénées-Atlantiques), *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 10-12, p. 420-433.

C

- CALVET O. (2019)** – *Bases et concepts des techniques du son : modélisation du son, psychoacoustique, acoustique musicale, acoustique des salles, sonorisation cours et exercices résolus*, Paris, Ellipses, 293 p.
- CAMUS H. (2016)** – Suivi karstologique du site de la grotte de Cussac, in J. Jaubert (dir.), *Grotte de Cussac (Le Buisson-de-Cadouin, Dordogne). Projet collectif de recherche 2015*,

Bibliographie

- Prospection thématique avec relevé d'art rupestre triennale 2013-15, Rapport 2015, Bilan triennal 2013-15*, service régional d'Archéologie d'Aquitaine-Limou-Poitou-Charents, mai 2016, p. 109-155.
- CAMUS H. (2017)** – Suivi karstologique du site de la grotte de Cussac. Éléments de topographie, in J. Jaubert (dir.), *Grotte de Cussac (Le Buisson-de-Cadouin, Dordogne). Projet collectif de recherche 2016, Prospection thématique avec relevé d'art rupestre 2016, Rapport 2016, Demande 2017*, service régional d'Archéologie de la région Nouvelle Aquitaine, mai 2017, p. 43-70.
- CAMUS (2020)** – Karst, sédimentation et concrétion, in J. Jaubert, V. Feruglio et N. Fourment (dir.), *Grotte de Cussac. -30 000*, Bordeaux, éditions confluences, p. 47-49.
- CAPITAN L., BREUIL H. et PEYRONY D. (1910)** – *La caverne de Font-de-Gaume aux Eyzies, Dordogne*, Monaco, Imprimerie Chêne, 271 p.
- CARRÉ S., DENIEL J.-M., GUILLOU E. et BOUATOUCH K. (2000)** – Handling Dynamic Changes in Hierarchical Radiosity Through Interaction Meshes, *Proceedings the Eighth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications* (Hong-Kong, China, October 2000), 18 p.
- CARTAILHAC É. (1902)** – Les cavernes ornées de dessins. La grotte d'Altamira (Espagne), Mea culpa d'un sceptique, *L'Anthropologie*, 13, p. 348-354.
- CARTAILHAC É. et BREUIL H. (1906)** – *La Caverne d'Altamira*, Monaco, Imprimerie de Monaco, 287 p.
- CAUSSE R. (1996)** – Au sujet d'une flûte paléolithique : En souvenir de Dominique Buisson, *Antiquités Nationales*, 28, p. 149-152.
- CLOTTE J. (1993)** – Contexte archéologique interne, in G.R.A.P.P., *L'art pariétal paléolithique. Techniques et méthodes d'étude*, Paris, Comité Des Travaux Historiques Et Scientifiques, p. 49-58.
- _____. (1998) – *Voyage en Préhistoire. L'art des cavernes et des abris, de la découverte à l'interprétation*, Paris, La maison des roches, 479 p.
- _____. (2003) – De « l'art pour l'art » au chamanisme : l'interprétation de l'art préhistorique, *La Revue pour l'histoire du CNRS* [en ligne], 8, consulté le 17 juillet 2018, <http://journals.openedition.org/histoire-cnrs/553>.
- _____. (2010) – *Les cavernes de Niaux : art préhistorique en Ariège-Pyrénées*, Paris, Errance, 229 p.
- CLOTTE J. et SIMONNET R. (1972)** – Le réseau René Clastres de la Caverne de Niaux (Ariège), *Bulletin de la Société préhistorique française*, 69,1, p. 293-323.
- CLOTTE J. et LEWIS-WILLIAMS D. (2001)** – *Les chamanes de la préhistoire. Texte intégral, polémique et réponses*, Paris, la Maison des roches, 231 p.

CLOTES J., COURTIN J. et VANRELL L. (2005) – *Cosquer redécouvert*, Paris, Seuil, 255 p.

COMMINS D., COPPENS Y. et HIDAHA T. (2020) – Acoustics of the Lascaux cave and its facsimile Lascaux IV, *Journal of the Acoustical Society of America*, 148, 2, p. 918-924.

D

DAUVOIS M. et BOUTILLON X. (1994) – Caractérisation acoustique des grottes ornées paléolithiques et de leurs lithophones naturels, in C. Homo-Lechner et A. Béliis (eds.), *La pluridisciplinarité en archéologie musicale*, IVe Rencontres internationales d'archéologie musicale de l'ICTM (Saint-Germain-en-Laye, 1990), Paris, Maison des Sciences de l'Homme, p. 209-251.

DAUVOIS M. (2005) – Homo musicus palaeolithicus et Palaeoacustica, *Munibe Antropologia-Arkeologia*, 57, p. 225-241.

DAVIS W. (1986) – The origins of image making, *Current Anthropology*, 27, 3, p. 193–215.

DELLUC B. et DELLUC G. (1979a) – L'éclairage, in Arl. Leroi-Gourhan et J. Allain (dir.), *Lascaux Inconnu*, Paris, Ed. du Centre National de la Recherche Scientifique (XIIe supplément à Gallia Préhistoire), p. 121-142.

_____. (1979b) – Lascaux, les dix premières années sous la plume des témoins, in Arl. Leroi-Gourhan et J. Allain (dir.), *Lascaux Inconnu*, Paris, Ed. du Centre National de la Recherche Scientifique (XIIe supplément à Gallia Préhistoire), p. 21-34.

_____. (2003) – *Lascaux retrouvé*, Périgueux, édition PILOTE, 24, 364 p.

_____. (2008) – *Dictionnaire de Lascaux*, Bordeaux, éditions Sud Ouest, 349 p.

DELLUC M. (2000) – La grotte de Cussac. Commune du Buisson-de-Cadouin (24), *Spéleo-Dordogne*, 156, p. 19-24.

DELLUC M., FOURMENT N., JAUBERT J., LEDOUX L., MAKSUD F., PEYROUX M. et AUJOULAT N. (2013) – Les Traces d'Activités animales et humaines (TrAcs) dans la grotte de Cussac, in J. Jaubert (dir.), *Grotte de Cussac (Le Buisson-de-Cadouin, Dordogne). Projet collectif de recherche 2012, Prospection thématique avec relevé d'art rupestre triennale 2010-12, Rapport 2012 – Bilan 2010-12*, service régional d'Archéologie d'Aquitaine, avril 2013, p. 573-664.

DESARNAULDS V. (2002) – *De l'acoustique des églises en Suisse – Une approche pluridisciplinaire*, thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne.

DEVLIN K., CHALMERS A. et BROWN D. (2002) – Predictive lighting and perception in archaeological representations, *UNESCO "World Heritage in the Digital Age" 30th Anniversary Digital Congress*, UNESCO World Heritage Centre.

Bibliographie

DÍAZ-ANDREU M. et GARCÍA BENITO C. (2012) – Acoustics and Levantine rock art: auditory perceptions in La Valltorta Gorge (Spain), *Journal of Archaeological Sciences*, 39, p. 3591-3599.

DIAZ-ANDREU M., HAMEAU P. et MATTIOLI T. (2019) - Des sites à voir et à entendre : les abris à motifs schématiques de la falaise de Baume Brune (Vaucluse), *L'Anthropologie*, 123, 1, p. 66-99.

DUCASSE S. et LANGLAIS M. (2019) – Twenty years on, a new date with Lascaux. Reassessing the chronology of the cave's Paleolithic occupations through new 14C AMS dating, *PALEO*, 30, 1, p. 130-147.

DUGAS P. (2017) – Sédimentologie des dépôts de comblement de l'entrée Paléolithique de la grotte de Cussac, Dordogne, Mémoire de master 2, Université de Bordeaux, Bordeaux, 69 p.

E

ELIAS M. et LAFAIT J. (2006) – *La couleur : lumière, vision et matériaux*, Paris, Belin, 351 p.

F

FAZENDA B., SCARRE C., TILL R., JIMÉNEZ PASALODOS R., ROJO GUERRA M., TEJEDOR C., ONTAÑÓN PEREDO R., WATSON A., WYATT S., GARCÍA BENITO C., DRINKALL H. et FOULDS F. (2017) – Cave acoustics in prehistory: Exploring the association of Palaeolithic visual motifs and acoustic response, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142, p. 1332-1349.

FERCHAL C., (2003) – *Modélisation des écoulements et des transferts de masse et de chaleur dans la grotte de Lascaux*, thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, Bordeaux.

FERNALD R. D. (2000) – Evolution of eyes, *Current Opinion in Neurobiology*, 10, 4, p. 444–450.

FERRIER C., FERUGLIO V., KERVAZO B., KONIK S., LACANETTE D. et MALAURENT P. (2016) – La grotte laboratoire de Leye (Marquay, Dordogne, France) : naissance d'un projet et actualité de la recherche, Hommage à Norbert Aujoulat, *PALEO*, numéro hors-série, p. 157-169.

FERRIER C., KONIK S., BALLADE M., BOURDIER C., CHAPOULIE R., FERUGLIO V., QUEFFELEC A. et Jaubert J. (2017a) – Cussac Cave (Dordogne, France): The role of the rock support in the parietal art distribution, technical choices, and intentional and unintentional marks on the cave walls, *Quaternary International*, 430, p. 30-41.

FERRIER C., AUGUIN G., AUJOUX A., BELLIVIER A., BOURDIER C., BRODARD A., DEBARD E., DECOSTER L., DELDICQUE D., DRÉAN V., FERUGLIO V., GUIBERT P., KERVAZO

- B., LACANETTE D., LEBLANC J. C., MINDEGUIA J.-C., FOURRIER N., QUEFFELEC A., ROUZAUD J.-N., SALMON F., SUZANNE M., THÉRY-PARISOT I., TRAORÉ A. et TRUONG T. (2017b)** – Les feux de la grotte Chauvet-Pont d’Arc. Approches expérimentales, *Ardèche Archéologie*, 34, p. 3-12.
- FERRIER C., BELLIVIER A., LACANETTE D., LEBLANC J. C., MINDEGUIA J.-C. et SALMON F. (2017c)** – L’utilisation du feu dans l’endokarst au Paléolithique : approche interdisciplinaire et expérimentale (programme CarMoThaP), *Karstologia*, 70, p. 23-32.
- FERRIER C. et KONIK S. (2017)** – Étude et relevé taphonomique du Panneau de la Découverte, in J. Jaubert (dir.), *Grotte de Cussac (Le Buisson-de-Cadouin, Dordogne). Projet collectif de recherche 2016, Prospection thématique avec relevé d’art rupestre 2016, Rapport 2016, Demande 2017*, service régional d’Archéologie de la région Nouvelle Aquitaine, mai 2017, p. 135-138.
- FERRIER C., KONIK S., KERVAZO B., DUGAS P., GENTY D., JAUBERT J. et REGNIER É. (2020)** – Lecture d’un éboulis, in J. Jaubert, V. Feruglio et N. Fourment (dir.), *Grotte de Cussac. -30 000*, Bordeaux, éditions confluences, p. 61.
- FERUGLIO V. (2006)** De la faune au bestiaire – La grotte Chauvet-Pont d’arc, aux origines de l’art pariétal paléolithique, in H. de Lumley et B. Midant-Reynes (eds.), *Climats-Cultures-Sociétés aux temps préhistoriques, de l’apparition des Hominidés jusqu’au Néolithique*, Comptes-rendus Palévol, 5, 1-2, p. 213-222.
- FERUGLIO V., JAUBERT J. et AUJOULAT N. (2011)** – L’art pariétal gravettien, ce qu’il révèle de la société en complément de la culture matérielle, in N. Goutas, L. Klaric, C. Pesesse et P. Guillermin (dir.), *À la recherche des identités gravettiennes : actualités, questionnements et perspectives*, actes de la table ronde sur le gravettien en France (Aix-en-Provence, 6-8 octobre 2008), Paris, Société Préhistorique Française, 53, p. 243-255.
- FERUGLIO V., DUTAILLY B., BALLADE M., BOURDIER C., FERRIER C., KONIK S., LACANETTE-PUYO D., MORA P., VERGNIEUX R. et JAUBERT J. (2015)** – Un outil de relevés 3D partagés en ligne : premières applications pour l’art et la taphonomie des parois ornées de la grotte de Cussac (ArTaPoC / programme LaScArBx), *Virtual retrospect 2013*, Actes du colloque Virtual Retrospect 2013 (Pessac, 27-29 novembre 2013), Pessac, Ausonius (collection Archéovision, 6), p. 49-54.
- FERUGLIO V., BOURDIER C., DELLUC M., MORA P., AUJOULAT N. et JAUBERT J. (2019)** – Rock art, performance and Palaeolithic cognitive systems. The example of the Grand Panel palimpsest of Cussac cave, Dordogne, France, *Journal of Anthropological Archaeology*, 56, 13 p.
- FERUGLIO V., BOURDIER C., AUJOULAT N., DELLUC M. et JAUBERT J. (2020a)** – Cussac cave Gravettian parietal art (Dordogne, France): Updated inventories and new insights into Noaillian rock art, *Journal of Archaeological Science: Reports*, 32, 12 p.

Bibliographie

- FERUGLIO V., BOURDIER C., JAUBERT J., MORA P. et DUTAILLY B. (2020b)** – Rapport 2019 de l'équipe art pariétal (janvier 2020), in J. Jaubert (dir.), *Grotte de Cussac (Le Buisson-de-Cadouin, Dordogne). Projet collectif de recherche 2018-20 et Prospection thématique avec relevé d'art rupestre 2019, Rapport 2019 (PCR, PT)*, service régional d'Archéologie de la région Nouvelle Aquitaine, mai 2020, p. 145-182.
- FERUGLIO V. et BOURDIER C. (2020)** – Une galerie d'art gravé, in J. Jaubert, V. Feruglio et N. Fourment (dir.), *Grotte de Cussac. -30 000*, Bordeaux, éditions confluences, p. 143-163.
- FORMICOLA V. et GIANNECCHINI M. (1999)** – Evolutionary trends of stature in Upper Paleolithic and Mesolithic Europe, *Journal of Human Evolution*, 36, p. 319-333.
- FORTEA PEREZ F. J. (1994)** – Los « santuarios » exteriores en el Paleolítico cantabrio, *Complutum*, 5, p. 203-220.
- FOSTER D. H. (2011)** – Color constancy, *Vision Research*, 51, p. 674-700.
- FOURMENT N. (2020)** – S'éclairer dans Cussac : lampes et roches ?, in J. Jaubert, V. Feruglio et N. Fourment (dir.), *Grotte de Cussac. -30 000*, Bordeaux, éditions confluences, p. 122.
- FOURMENT N., BARAUD D., KAZMIERCZAK M. et RIEU A. (2012)** – La Grotte de Cussac (Le Buisson-de-Cadouin, Dordogne, France) : applications des principes de conservation préventive au cas d'une découverte récente, in J. Clottes (dir.), *L'art pléistocène dans le monde / Pleistocene art of the world / Arte pleistoceno en el mundo*, actes du Congrès IFRAO (Tarascon-sur-Ariège, septembre 2010), Symposium « Art pléistocène en Europe », Tarascon-sur-Ariège, Société Préhistorique Ariège-Pyrénées (n° spécial de Préhistoire, Art et Sociétés), 65-66, p. 343-354.
- FOURMENT N., LEDOUX L., MAKSUD F. et DELLUC M. (2020)** – Sur la piste des ours et des Hommes : les TrAcs dans Cussac, in J. Jaubert, V. Feruglio et N. Fourment (dir.), *Grotte de Cussac. -30 000*, Bordeaux, éditions confluences, p. 165-186.
- FRAZER J. G. (1906-1915)** – *Le Rameau d'or (The Golden Bough)*, Paris, Robert Laffont (Bouquins), 1080 p.
- FRITZ C. (1999)** – Towards the Reconstruction of Magdalenian Artistic Techniques: the Contribution of Microscopic Analysis of Mobiliary Art, *Cambridge Archaeological Journal*, 9, 2, p. 189-208.
- FRITZ C. (2020)** – Pour une anthropologie de l'art paléolithique : gestes, techniques, images, mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université Toulouse Jean-Jaurès, Toulouse, 2 vol. 174 p.

G

- GALANT P., AMBERT P., COLOMER A. et GUENDON J.-L. (2007)** – Les vestiges d'éclairages préhistoriques de la galerie des pas de la grotte d'Aldène (Cesseras, Hérault), *Bulletin du Musée d'anthropologie préhistorique de Monaco*, 47, p. 37-80.
- GAMBLE C. (1998)** – Palaeolithic Society and the Release from Proximity: A Network Approach to Intimate Relations, *World Archaeology*, 29, 3, p. 426-449.
- GENESTE J.-M. (2006)** – Lascaux, de la découverte à la première crise bioclimatique de 1963, *Monumental*, 2, p. 62-67.
- _____. (2007) – Heurs et malheurs de Lascaux, *L'Aquitaine archéologique*, hors-série Le Festin, p. 80-85.
- _____. (2008) – Lascaux, conservation d'une grotte ornée, *Les Dossiers d'Archéologie*, hors-série, 15, p. 68-79.
- GENTY D., KONIK S., VALLADAS H., BLAMART D., HELLSTROM J., TOUMA M., MOREAU C., DUMOULIN J.-P., NOUET J., DAUPHIN Y., et WEIL R. (2011)** – Dating the Lascaux cave gour formation, *Radiocarbon*, 53, 3, p. 479-500.
- GENTY D., CHENG H., REGNIER É., FERRIER C., KONIK S. et JAUBERT J. (2020)** – Dater les spéléothèmes, in J. Jaubert, V. Feruglio et N. Fourment (dir.), *Grotte de Cussac. - 30 000*, Bordeaux, éditions confluences, p.63.
- GENUITE K., (2019)** – *Paléogéographies et reconstitution géomorphologique 3D : application aux environnements de sites ornés*, thèse de doctorat, Université Communauté Grenoble Alpes, Grenoble, 282 p.
- GENUITE K., DELANNOY J.-J. et JAILLET S. (2016)** – Reconstitution des paléogéographies karstiques par l'approche cartographique 3D : Application au Pont d'Arc et à la Combe d'Arc (Ardèche, France), *Karstologia*, 67, 8 p.
- GLORY A. (1965)** – L'énigme de Lascaux, *actes du XVI^e Congrès préhistorique de France* (Monaco, 1959), p. 586-595.
- _____. (2008) – *Les recherches à Lascaux (1952-1963). Documents recueillis et présentés par Brigitte et Gilles Delluc*, XXXIX^e supplément à Gallia Préhistoire, Paris, Ed. du Centre National de la Recherche Scientifique, 364 p.
- GONZÁLES GARCÍA R. (1987)** – Organisation, distribution and typology of the cave art of Monte des Castillo, Spain, *Rock Art Research*, 4, p. 127-136.
- _____. (1996) – *Arte rupestre paleolítico: organización espacial y programa decorativo en las cavidades de la región cantábrica. (Cueva de La Meaza, Cueva de La Clotilde, Cueva de Santián, Cueva de Las Monedas, Cueva de la Pasiega, Cueva de Las Chimeneas, Cueva del Castillo, Cueva del Salitre, Cueva de Cobrantes, Cueva de*

Bibliographie

Cullalvera, Cueva de Sotarriza y Cova Negra, Cueva de Venta de Laperra y Cueva de Ekain, thèse de doctorat, Université de Barcelone, Barcelone, 866 p.

_____. (2001) – *Art et espace dans les grottes paléolithiques cantabriques*, Grenoble, Jérôme Million, 461 p.

GORGUE A., Rebay-Salisbury K. et Salisbury R. B. (2017) – Material Chains in Late Prehistoric Europe and the Mediterranean: Time, Space and Technologies of Production. An Introduction, in A. Gorgue, K. Rebay-Salisbury et R. B. Salisbury, (eds.), *Material Chains in Late Prehistoric Europe and the Mediterranean: Time, Space and Technologies of Production*, Bordeaux, Ausonius Mémoires, 48, p. 9-13.

GOUTAS N. (2020) – Une pointe en bois de renne à 610 m de l'entrée, in J. Jaubert, V. Feruglio et N. Fourment (dir.), *Grotte de Cussac. -30 000*, Bordeaux, éditions confluentes, p. 122.

G.R.A.P.P. (1993) – *L'art pariétal paléolithique : techniques et méthodes d'étude*, Paris, Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques (CTHS), 427 p.

GROENEN M. (1994) – *Pour une histoire de la préhistoire. Le paléolithique*, Grenoble, Jérôme Million, 603 p.

_____. (2013) – De l'espace spéléologique à l'espace vécu : l'exemple des grottes du Mont Castillo (Cantabrie, Espagne), *Bulletin de la Société Préhistorique Ariège-Pyrénées*, 68, p. 73-95.

_____. (2016) – Le rôle de la lumière dans l'art des grottes au Paléolithique supérieur, in C. Beaufort et M. Lebrère (eds), *Ambivalences de la lumière*, Paris, Presses de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, p. 231-249.

GROENEN M. et GROENEN M.-C. (2019) – Modes of space appropriation in the decorated caves of El Castillo and La Pasiega (Puente Viesgo, Cantabria, Spain), *Journal of Archaeological Science: Reports*, 28, 13 p.

GUILLOU Y. Le (2005) – Circulations humaines et occupation de l'espace souterrain à la grotte Chauvet-Pont-d'Arc, *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 102, 1, p. 117-134.

GUINCHARD A.-C., ESTOPPEY P. et MAIRE R. (2017) – Presbyacousie : baisse de l'ouïe chez la personne âgée, *Forum Medical Suisse*, 17, 10, p. 230-235.

H

HAPPA J., MUDGE M., DEBATTISTA K., ARTUSI A., GONALVES A. et CHALMERS A. (2010) – Illuminating the past: state of the art, *Virtual Reality*, 14, p. 155-182.

HASANTASH M., LAFER-SOUSA R., AFRAZ A. et CONWAY B. R. (2019) – Paradoxical impact of memory on color appearance of faces, *Nature Communications*, 10, 10 p.

Bibliographie

- HENRY-GAMBIER D., COURTAUD P., DUDAY H., DUTAILLY B., VILLOTTE S., DEGUILLOUX M.-F., PÉMONGE M.-H., AUJOLAT N., DELLUC M., FOURMENT N. et JAUBERT J. (2013)** – Grotte de Cussac (Le Buisson-de-Cadouin, Dordogne) : un exemple de comportement original pour le Gravettien, in J. Jaubert, N. Fourment, P. Depaepe (dir.), *Les comportements funéraires dans la Préhistoire : transition, rupture ou continuité ?* Actes du XXVIIe congrès préhistorique de France (Bordeaux-Les Eyzies, 31 mai-5 juin 2010), Paris, Société Préhistorique Française, p. 160-182.
- HOFFMEISTER D., ZELLMANN S., PASTOORS A., KEHL M., CANTALEJO P., RAMOS J., WENIGER G.C. et BARETH G. (2016)** – The investigation of the Ardales Cave, Spain – 3D documentation, topographic analysis, and lighting simulations based on terrestrial laser scanning, *Archaeological Prospection*, 23, p. 75-86.
- HOFFMEISTER D. (2017)** – Simulation of tallow lamp light within the 3D model of the Ardales Cave, Spain, *Quaternary International*, 430, p. 22-29.
- HOLLOWAY R. L. (1999)** – Evolution of the human brain, in A. Lock et C. R. Peters, *Handbook of Human Symbolic Evolution*, Oxford, Wiley-Blackwell, p. 74–125.
- HOUGH W. (1896)** – The lamp of the Eskimo, *Report of the United States National museum for 1896*, pp. 1025-1057.
- _____. (1898) – The Origin and Range of the Eskimo Lamp, *American Anthropologist*, 11, 4, pp. 116-122.
- HOUILLO N., LASTENNET R., DENIS A., MALAURENT P., MINVIELLE S. et PEYRAUBE N. (2017)** - Assessing cave internal aerology in understanding carbon dioxide (CO₂) dynamics: implications on calcite mass variation on the wall of Lascaux Cave (France), *Environmental Earth Sciences*, 76, 4, p. 70.
- HURLBERT A. et LING Y. (2017)** – Understanding colour perception and preference, in J. Best (ed.), *Colour Design: Theories and Applications*, Duxford UK, Woodhead Publishing, p. 169-192.
- HURLBERT A. (2019)** – Challenges to color constancy in a contemporary light, *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 30, p. 186-193.

I

- INTXAURBE I., RIVERO O., MEDINA-ALCAIDE M. À., ARRIOLABENGOA M., RÍOS-GARAIZAR J., SALAZAR S., RUIZ-LÓPEZ J. F., ORTEGA-MARTÍNEZ P. et GARATE D. (2020)** – Hidden images in Atxurra Cave (Northern Spain): A new proposal for visibility analyses of Palaeolithic rock art in subterranean environments, *Quaternary International*, 566-567, p. 163-170.
- ISO 3382 (2009)** – Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces, *International Organization for Standardization*, Genève, Suisse.

J

- JAUBERT J., AUJOLAT N., COURTAUD P., DEGUILLOUX M.-F., DELLUC M., DENIS A., DUDAY H., DUTAILLY B., FERRIER C., FERUGLIO V., FOURMENT N., GENESTE J.-M., GENTY D., GOUTAS N., HENRY-GAMBIER D., KERVAZO B., KLARIC L., LASTENNET R., LÉVÊQUE F., MALAURENT P., MALLYE J.-B., MORA P., PEMONGE M.-H., PEYRAUBE N., PEYROUX M., PLISSON H., PORTAIS J.-C., VALLADAS H., VERGNIEUX R. et S. VILLOTES (2012)** – Le projet collectif de recherche « Grotte de Cussac » (Dordogne, France) : étude d'une cavité ornée à vestiges humains du Gravettien, in J. Clottes (dir.), *L'art pléistocène dans le monde / Pleistocene art of the world / Arte pleistoceno en el mundo*, actes du Congrès IFRAO (Tarascon-sur-Ariège, septembre 2010), Symposium « Art pléistocène en Europe », Tarascon-sur-Ariège, Société Préhistorique Ariège-Pyrénées (n° spécial de Préhistoire, Art et Sociétés), 65-66, 325-342.
- JAUBERT J., GENTY D., VALLADAS H., CAMUS H., COURTAUD P., FERRIER C., FERUGLIO V., FOURMENT N., KONIK S., VILLOTTE S., BOURDIER C., COSTAMAGNO S., DELLUC M., GOUTAS N., KATNECKER É., KLARIC L., LANGLAIS M., LEDOUX L., MAKSUD F., O'FARRELL M., MALLYE J.-B., PIERRE M., PONS-BRANCHU E., RÉGNIER É., et THÉRY-PARISOT I. (2017)** – The chronology of human and animal presence in the decorated and sepulchral cave of Cussac (France), *Quaternary International*, 432, Part B, p. 5-24.
- JAUBERT J., FERRIER C., FERUGLIO V., FOURMENT N., BOURDIER C., KONIK S. et VILLOTTE S. (2018)** – La grotte de Cussac (Dordogne). Étude pluri et interdisciplinaire d'un sanctuaire ornée et sépulcral d'âge gravettien, *Les Nouvelles de l'Archéologie*, 154, p. 16-24.
- JAUBERT J., FOURMENT N. et FERUGLIO V. (2020)** – La Branche Amont, in J. Jaubert, V. Feruglio et N. Fourment (dir.), *Grotte de Cussac. -30 000*, Bordeaux, éditions confluences, p. 109-125.
- JAUBERT J., FERUGLIO V. et FOURMENT N., dir. (2020)** – *Grotte de Cussac -30 000*, Bordeaux, éditions confluences, 213 p.
- JIMÉNEZ GONZÁLES N., PICÓ R. et REDONDO J. (2008)** – The Parpalló cave: A singular archaerological acoustic site, *The Journal of Acoustical Society of America*, 123, 5, p. 7787-7791 3608-36113.
- JOSSE J. et HUSSON F. (2016)** – missMDA: A Package for Handling Missing Values in Multivariate Data Analysis, *Journal of Statistical Software*, 70, 1, p. 1-31.
- JOUTEAU A. (2016)** – *Grotte de Cussac. Élection des supports des panneaux ornés : déterminisme géologique, déterminisme culturel ?* Mémoire de master 2, Université de Bordeaux, Bordeaux, 75 p.

Bibliographie

JOUTEAU A., FERUGLIO V., BOURDIER C., CAMUS H., FERRIER C., SANTOS F. et JAUBERT J. (2019) – Choosing rock art locations: Geological parameters and social behaviours. The example of Cussac Cave (Dordogne, France), *Journal of Archaeological sciences*, 105, p. 81-96.

JOUTEAU A., FERUGLIO V., LACANETTE D., CARRÉ S., NOÉ N. et JAUBERT J. (2020) – Understanding the perception and appropriation of space in Palaeolithic decorated caves: New methods and tools, with the examples of Cussac and Lascaux caves, *Rock Art Research*, 37, 2, p. 137-154.

K

KACKI S., TRINKAUS E., SCHOTSMANS E., COURTAUD P., DORI I., DUTAILLY B., GUYOMARC'H P., MORA P., SPARACELLO V. et VILLOTTE S. (2020) – Complex mortuary dynamics in the Upper Paleolithic of the decorated Grotte de Cussac, France, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117, 26, p. 14851-15856.

KARNAY G., AUJOULAT N., KONIK S., MAUROUX B., PLUCHERY E. et TURQ A. (1999) – *Notice de la carte géologique du BUGUE*, BRGM, carte n°807, 91 p.

KERVAZO B., FERUGLIO V., BAFFIER D., DEBARD É., FERRIER C., PERROUX A.-S., AUJOULAT N., DELANNOY J.-J. et PERRETTE Y. (2010) – Paroi et art pariétal : approche taphonomique. L'exemple de la grotte Chauvet-Pont d'Arc (Ardèche), *PALEO*, Supplément N°3, p. 43-52.

KOLARIK A.J., CIRSTEIA S., PARDHAN S. et MOORE B.C.J. (2014) – A summary of research investigating echolocation abilities of blind and sighted humans, *Hearing Research*, 310, p. 60-68.

KONIK S., FERRIER C., KERVAZO B., DUGAS P., DUTAILLY B. MORA P. et QUEFFELEC A. (2020) – Inondation et décantation à Cussac, in J. Jaubert, V. Feruglio et N. Fourment (dir.), *Grotte de Cussac. -30 000*, Bordeaux, éditions confluences, p. 132.

L

LACANETTE D. et MALAURENT P. (2010) – La 3D au service de la conservation des grottes ornées, l'exemple de Lascaux et du simulateur Lascaux, *In Situ* [en ligne], 13, consulté le 27 juin 2018, <http://journals.openedition.org/insitu/6793>.

LACANETTE D. et MALAURENT P. (2015) – Simulation of the microclimate in an archaeological cave (Lascaux, France), *Proceedings of the CHT-15. ICHMT 6th International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer* (Rutgers University, United States, 25-29 May 2015), p. 1418-1421).

Bibliographie

- LACANETTE D., MALAURENT P., CALTAGIRONE J.-P. et BRUNET J. (2007)** – Étude des transferts de masse et de chaleur dans la grotte de Lascaux : le suivi climatique et le simulateur, *Karstologia*, 50, p. 19-30.
- LACANETTE D., VINCENT S., SARTHOU A., MALAURENT P. et CALTAGIRONE J.-P. (2009)** – An Eulerian/Lagrangian method for the numerical simulation of incompressible convection flows interacting with complex obstacles: Application to the natural convection in the Lascaux cave, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, p. 2528-2542.
- LACANETTE D., LARGE D., FERRIER C., AUJOLAT N., BASTIAN F., DENIS A., JURADO V., KERVAZO B., KONIK S., LASTENNET R., MALAURENT P. et SAIZ-JIMENEZ C. (2013)** – A laboratory cave for the study of wall degradation in rock art caves: an implementation in the Vézère area, *Journal of Archaeological Science*, 40, p. 894-903.
- LACANETTE D., MINDEGUIA J.-Ch., BRODARD A., FERRIER C., GUIBERT P., LEBLANC J. C., MALAURENT P. et SIRIEIX C. (2017)** – Simulation of an experimental fire in an underground limestone quarry for the study of Paleolithic fires, *International Journal of Thermal Sciences*, 120, p. 1-18.
- LACANETTE D., FERRIER C., FERUGLIO V., KONIK S., MALAURENT P., MORA P. et PORTAIS J.-P. (2018)** – Restoration of the Lascaux cave morphology to that found at the time of its discovery – a 3D model for preservation and research, *20th International Rock Art Congress IFRAO* (Valcamonica Darfo Boario Terme, Italy, 29th August – 2nd September 2018), p. 369.
- LAMING-EMPERAIRE A. (1962)** – *La signification de l'art rupestre paléolithique, méthodes et applications*, Paris, A. & J. Picard, 424 p.
- LAND M. F. et FERNALD R. D. (1992)** – The evolution of eyes, *Annual Review of Neuroscience*, 15, p. 1–29.
- LAROUSSE (s.d.)** – « Œuvre », Dictionnaire Larousse en ligne, [en ligne], <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/%C5%93uvre/55708> (consulté le 02/01/2021).
- LASHERAS CORRUCHAGA J. A. et DE LAS HERAS C. (2010)** – Un fac-similé, le choix pour Altamira, *In Situ* [En ligne], 13, consulté le 23 juillet 2018, <http://journals.openedition.org/insitu/6711>.
- LEDOUX L. (2019)** – *L'ichnologie préhistorique et les traces d'activités au sein des cavités ornées*, thèse de doctorat, Université de Bordeaux, Bordeaux, 432 p.
- _____. (2020) – Ichnologie : empreintes d'ours, empreintes d'Hommes, in J. Jaubert, V. Feruglio et N. Fourment (dir.), *Grotte de Cussac. -30 000*, Bordeaux, éditions confluences, p. 176-179.
- LEDOUX L., FOURMENT N., MAKSUD F., DELLUC M., COSTAMAGNO S., GOUTAS N., KLARIC L., LAROULANDIE V., SALOMON H. et JAUBERT J. (2017)** – Traces of human and

Bibliographie

- animal activity (TrAcs) in Cussac Cave (Le Buisson-de-Cadouin, Dordogne, France): Preliminary results and perspectives, *Quaternary International*, 430, Part A, p. 141-154.
- LEJEUNE M. (1985)** – Le mur dans l’art et l’archéologie, *Art & Fact, Revue des historiens d’art, des archéologues, des musicologues et des orientalistes de l’Université de l’état à Liège*, 4, 24 p.
- LEMOZI A. (1929)** – *La grotte-temple du Pech-Merle, un nouveau sanctuaire préhistorique*, Paris, Auguste Picard, 184 p.
- LEROI-GOURHAN A. (1964)** – *Les religions de la Préhistoire*, Paris, PUF, 156 p.
- _____. (1965) – *Préhistoire de l’art occidental*, Paris, Éditions d’art Lucien Mazenod, 482 p.
- _____. (1979a) – Les animaux et les signes, in Arl. Leroi-Gourhan et J. Allain, *Lascaux Inconnu*, Paris, Ed. du Centre National de la Recherche Scientifique (XII^e supplément à Gallia Préhistoire), p. 343-366.
- _____. (1988) – *Dictionnaire de la Préhistoire*, Paris, PUF, 1277 p.
- LEROI-GOURHAN Arl. (1979b)** La stratigraphie et les fouilles de la grotte de Lascaux, in Arl. Leroi-Gourhan et J. Allain, *Lascaux Inconnu*, Paris, Ed. du Centre National de la Recherche Scientifique (XII^e supplément à Gallia Préhistoire), p. 45-74.
- LEROI-GOURHAN Arl. et ALLAIN J. dir., (1979)** – *Lascaux Inconnu*, XII^e supplément à Gallia Préhistoire, Paris, Ed. du Centre National de la Recherche Scientifique, 381 p.
- LEROI-GOURHAN Arl., SCHWEINGRUBER H. et GIRARD M. (1979)** – Les bois de Lascaux, in Arl. Leroi-Gourhan et J. Allain, *Lascaux Inconnu*, Paris, Ed. du Centre National de la Recherche Scientifique (XII^e supplément à Gallia Préhistoire), p. 185-188.
- LÉVÊQUE F. et MATHE V. (2013)** – Prospection magnétique dans la grotte de Cussac, in J. Jaubert (dir.), *Grotte de Cussac (Le Buisson-de-Cadouin, Dordogne). Projet collectif de recherche 2012, Prospection thématique avec relevé d’art rupestre triennale 2010-12, Rapport 2012 – Bilan 2010-12*, service régional d’Archéologie d’Aquitaine, avril 2013, p. 665-682.
- LÉVÊQUE F. (2020)** – Des prospections géomagnétiques, in J. Jaubert, V. Feruglio et N. Fourment (dir.), *Grotte de Cussac. -30 000*, Bordeaux, éditions confluentes, p. 36.
- LOPEZ B., (2009)** – *Les processus de transfert d’eau et de dioxyde de carbone dans l’épikarst. Aide à la conservation des grottes ornées par le développement de nouvelles méthodologies pour l’étude de l’environnement des cavités*, thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, Bordeaux, 399 p.
- LORBLANCHET M. (1980)** – Peindre sur les parois des grottes, *Les Dossiers de l’Archéologie*, 46, p. 33-39.

Bibliographie

- _____. (1990) – L'art pariétal. De nouvelles méthodes de datation de l'art préhistorique, *Pour la science*, 156, p. 10-12.
- _____. (1993) – Le support, in G.R.A.P.P., *L'art pariétal paléolithique. Techniques et méthodes d'étude*, Paris, Comité Des Travaux Historiques Et Scientifiques, p. 69-80.
- _____. (1995) – *Les grottes ornées de la préhistoire : nouveaux regards*, Paris, Errance, 287 p.
- _____. (1999) – *La naissance de l'art. Genèse de l'art préhistorique*, Paris, Errance, 304 p.
- _____. (2001) – *La grotte ornée de Pergouset Saint-Géry, Lot : un sanctuaire secret paléolithique*, Paris, Maison des Sciences de l'Homme, 188 p.
- _____. (2010) – *Art pariétal. Grottes ornées du Quercy*, Rodez, Rouergue, 445 p.

M

- MALAURENT P., LASTENNET R. et BRUNET J. (2006)** – Une grotte sous influence : l'environnement hydrogéologique et climatique de la grotte de Lascaux, in *Les grottes ornées, Monumental*, Paris, Monum Éditions du Patrimoine, 2, p. 88-93.
- MALGAT C., DUVAL M. et GAUCHON C. (2015)** – Fac-similés et transfert de patrimonialité. La grotte ornée Chauvet-Pont-d'Arc, *Culture & Musées* [En ligne], 25, consulté le 23 juillet 2018, <http://journals.openedition.org/culturemusees/522>.
- MALVESIN-FABRE G. et PARRIAUD H. (1955)** – *Une hypothèse sur l'éclairage des grottes au paléolithique*, actes du XIV^e Congrès Préhistorique de France (Strasbourg-Metz, 1953), p. 426-430.
- MARTELLOTTA F., CIRILLO E., CARBONARI A. et RICCIARDI P. (2009)** – Guidelines for acoustical measurements in churches, *Applied Acoustics*, 70, p. 378-388.
- MARTIN-SANCHEZ P.M., JURADO V., PORCA E., BASTIAN F., LACANETTE D., ALABOUVETTE C. et SAIN-JIMENEZ C. (2014)** – Airborne microorganisms in Lascaux Cave (France), *International Journal of Speleology*, 43, 3, p. 295-303.
- MARTÍNEZ ROJAS J.A., ALPUENTE HERMOSILLA J., SÁNCHEZ MONTERO R. et LÓPEZ ESPÍ P.L. (2009)** – Physical Analysis of Several Organic Signals for Human Echolocation: Oral Vacuum Pulses, *Acta Acustica united with Acustica*, 95, 2, p. 325-330.
- MARTÍNEZ ROJAS J.A., ALPUENTE HERMOSILLA J., SÁNCHEZ MONTERO R. et LÓPEZ ESPÍ P.L. (2010)** – Physical Analysis of Several Organic Signals for Human Echolocation: Hand and Finger Produced Pulses, *Acta Acustica united with Acustica*, 96, 6, p. 1069-1077.

- MASUDA T., YAMADA Y., KUCHITSU N. et IKEUCHI K. (2008)** – Illumination simulation for archaeological investigation, *in* K. Ikeuchi, D. Miyazaki (eds.), *Digitally Archiving Cultural Objects*, New York, Springer, p. 419-439.
- MATTIOLI T., FARINA A., HAMEAU P. et DÍAZ-ANDREU M. (2017)** – Echoing landscapes: Echolocation and the placement of rock art in the Central Mediterranean, *Journal of Archaeological Science*, 83, p. 12-25.
- MEDINA-ALCAIDE M. À., CRISTO A., ROMERO A. et SANCHIDRIÁN J. L. (2012)** – Otro punto de luz. Iluminación estática en los “santuarios” paleolíticos: el ejemplo de la Cueva de Nerja (Málaga, España), *in* J. Clottes (dir.), *L’art pléistocène dans le monde / Pleistocene art of the world / Arte pleistoceno en el mundo*, actes du Congrès IFRAO (Tarascon-sur-Ariège, septembre 2010), Symposium « Art pléistocène en Europe », Tarascon-sur-Ariège, Société Préhistorique Ariège-Pyrénées (n° spécial de Préhistoire, Art et Sociétés), 65-66, p. 105-121.
- MEDINA-ALCAIDE M. À., SANCHIDRIÁN-TORTI J. L. et ZAPATA-PEÑA L. (2015)** – Lighting the dark: Wood charcoal analysis from Cueva de Nerja (Málaga, Spain) as a tool to explore the context of Palaeolithic rock art, *Comptes Rendus Palevol*, 14, p. 411-422.
- MEDINA-ALCAIDE M. À., GARATE-MAIDAGAN D., RUIZ-REDONDO A. et SANCHIDRIÁN-TORTI J. (2018)** – Beyond art: The internal archaeological context in Paleolithic decorated caves, *Journal of Anthropological Archaeology*, 49, p. 114-128.
- MEDINA-ALCAIDE M. À., CABALÍN L. M., LASERNA J., SANCHIDRIÁN J. L., TORRES A. J., INTXAURBE I., COSANO S. et ROMERO A. (2019)** – Multianalytical and multiproxy approach to the characterization of a Paleolithic lamp. An example in Nerja cave (Southern Iberian Peninsula), *Journal of Archaeological Science: Reports*, 28, 8 p.
- MORTILLET G. (de) et MORTILLET A. (de) (1900)** – *Le Préhistorique, origine et antiquité de l’homme (3^e édition)*, Paris, Schleicher Frères, 709 p.
- MURPHY D. T. (2006)** – Archaeological acoustic space measurement for convolution reverberation and auralization applications, *Proceedings of the 9th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-06)* (McGill University, Montreal, Canada, September 18-20 2006), p. 221-226.

N

- NOÉ N., GAUDAIRE F., JEAN P. et VERMET M. (2009)** – A general ray-tracing solution to reflection on curved surfaces and diffraction by their bounding edges, *in* S. Marburg (ed.), *Theoretical and computational acoustics 2009*, Proceedings of the 9th International Conference on Theoretical and Computational Acoustics ICTCA (Dresden, Germany, September 7-11 2009). Université de la Bundeswehr, Neubiberg, p. 225-234.

Bibliographie

NOÉ N., ROUGIER C., ROUCH J. et SCHMICH I. (2012) – An hybrid beam and particle tracing with time dependant radiosity for accurate impulse response of rooms prediction, *Proceedings of the Acoustics 2012* (Nantes, avril 2012), Société Française d'Acoustique, p. 1417-1422.

O

OCHOA B. et GARCÍA-DIEZ M. (2018) – The use of cave art through graphic space, visibility and cave transit: A new methodology, *Journal of Anthropological Archaeology*, 49, p. 129-145.

OMIDVAR M., CARRE S., RIBARDIERE M., MENEVEAUX D. et BOUATOUCH K. (2014) – Optimisation de cache de luminance en éclairage global (Radiance cache optimization for global illumination), *IRISA Rennes Bretagne Atlantique, équipe FRV Sense*, 37 p.

ORIAL G. et MERTZ J.-D. (2006) – Lascaux : une grotte vivante, Étude et suivi des phénomènes microbiologiques, in Les grottes ornées, *Monumental*, Paris, Monum Éditions du Patrimoine, 2, p. 76-78.

ORTEGA MARTÍNEZ P. (2012) – Visibility: a new outlook to the study of Palaeolithic Art. Preliminary research, in A. García Moreno, J. García Sánchez, A. Maximiano Castillejo et J. Rios-Garaizar (eds.), *Debating spatial archaeology*, Proceedings of the International Workshop on Landscape and Spatial Analysis in Archaeology (Santander, June 8th – 9th 2012), Instituto Internacional de Investigaciones Prehistóricas de Cantabria, p. 259-266.

P

PAGES J. (2004) – Analyse factorielle de données mixtes, *Revue de Statistique Appliquée*, 52, 4, p. 93-111.

PAILLET P. (dir.) (2014) – Les arts de la Préhistoire : micro-analyses et datations de l'art préhistorique dans son contexte archéologique, *Actes du colloque ANR-MADAPCA* (Paris, 16-18 novembre 2011), PALEO (numéro spécial), 366 p.

_____. (2018) – *Qu'est-ce que l'art préhistorique ? : l'homme et l'image au Paléolithique*, Paris, Ed. du Centre National de la Recherche Scientifique, 350 p.

PASTOORS A. et WENIGER G. C. (2011) – Cave art in its context: methods for the analysis of the spatial organization of cave sites, *Journal of Archaeological Research*, 19, 4, p. 377-400.

PEIGNAUX C., KACKI S., GUYOMARC'H P., SCHOTSMANS E. et VILLOTTE S. (2019) - New anthropological data from Cussac Cave (Gravettian, Dordogne, France): In situ and virtual analyses of Locus 3, *Comptes Rendus Palevol*, 18, 4, p. 455-464

Bibliographie

- PEYRAUBE N. (2011)** – *Apport des équilibres calco-carboniques et du carbone 13 pour l'étude de l'air et des écoulements d'eau dans la zone non saturée du karst. Application au système karstique perché de la grotte de Cussac (Dordogne, France)*, thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, Bordeaux, 350 p.
- PEYNONY D. (1918)** – Gravures sur pierre et godet du gisement préhistorique du Soucy, *Bulletin de la Société historique et archéologique du Périgord*, 45, p. 143-148.
- PEYRONY D. (1950)** – Notes sur quelques petits gisements préhistoriques, *Bulletin de la Société historique et archéologique du Périgord*, 77, 2, p. 55-57.
- PINÇON G., FUENTES O., BARRE R., AUBER O. et HAMON G. (2010a)** – De la frise magdalénienne in situ... au centre d'interprétation du Roc-aux-Sorciers : l'usage de la 3D, *In Situ* [en ligne], 13, consulté le 27 juin 2018, <http://journals.openedition.org/insitu/6672>.
- PINÇON G., BOURDIER C., FUENTES O. et ABGRALL A. (2010b)** – De la manipulation des images 3D, *In Situ* [en ligne], 13, 2010, consulté le 23 juillet 2018, <http://insitu.revues.org/6814>.
- PLATEL J.-P., FERRIER C. et KONIK S. (2020a)** – Le calcaire de la grotte, in J. Jaubert, V. Feruglio et N. Fourment (dir.), *Grotte de Cussac. -30 000*, Bordeaux, éditions confluences, p. 46.
- PLATEL J.-P., FERRIER C., KONIK S., MUTH X., BOURDIER C. et FERUGLIO V. (2020b)** – Lithostratigraphie et sédimentologie des calcaires crétacés de la grotte de Cussac. Description finale détaillée des dix coupes verticales de parois et caractérisations des microfaciès calcaires à partir de l'échantillonnage de cinq affleurements proches de la grotte, in J. Jaubert (dir.), *Grotte de Cussac (Le Buisson-de-Cadouin, Dordogne). Projet collectif de recherche 2018-20 et Prospection thématique avec relevé d'art rupestre 2019, Rapport 2019 (PCR, PT)*, service régional d'Archéologie de la région Nouvelle Aquitaine, mai 2020, p. 83-124.

R

- RAPHAËL M. (1945)** – *Prehistoric cave paintings*, New York, Pantheon Books (Bollinger Series, IV), 100 p.
- _____. (1986) – *Trois essais sur la signification de l'art pariétal paléolithique*, Paris, Le Couteau dans la plaie/Kronos, 228 p.
- REINACH S. (1899)** – Paul Girod et Elie Massénat, les stations de l'âge du Renne dans les vallées de la Vézère et de la Corrèze, *Revue Archéologique*, 3, 35, p. 476-478.
- _____. (1903) – L'art et la magie à propos des peintures et des gravures de l'âge du renne, *L'Anthropologie*, 14, p. 257-266.

Bibliographie

- REZNIKOFF I. et DAUVOIS M. (1988)** – La dimension sonore des grottes ornées, *Bulletin de la Société préhistorique française*, 85, 8, p. 238-246.
- REZNIKOFF I. (2006)** – The evidence of the Use of Sound Resonance from Palaeolithic to Medieval Times, in C. Scarre et G. Lawson (eds.), *Archaeoacoustics*, Université de Cambridge, Cambridge, p. 77-84.
- _____. (2008) – Sound resonance in prehistoric times: A study of Paleolithic painted caves and rocks, *Proceedings accoustics'08* (Paris, 29 juin-04 juillet 2008), p. 4137-4141.
- _____. (2010) – La dimension sonore des Grottes Préhistoriques à Peintures, *actes du X^e Congrès Français d'Acoustique* (Lyon, 12-16 avril 2010), 4 p.
- _____. (2012) – L'existence de signes sonores et leurs significations dans les grottes paléolithiques, in J. Clottes (dir.), *L'art pléistocène dans le monde / Pleistocene art of the world / Arte pleistoceno en el mundo*, actes du Congrès IFRAO (Tarascon-sur-Ariège, septembre 2010), Symposium « Art pléistocène en Europe », Tarascon-sur-Ariège, Société Préhistorique Ariège-Pyrénées (n° spécial de Préhistoire, Art et Sociétés), 65-66, p. 1741-1747.
- _____. (2014) – On the Sound Related to Painted Caves and Rocks, in J. Ikäheimo, A.-K. Salmi et T. Äikäs (eds.), *Sounds Like Theory. XII Nordic Theoretical Archaeology Group Meeting*, Oulu, Monographs of the Archaeological Society of Finland, 2, p. 101-109.
- _____. (2019) – Première étude sonore de la grotte de Cussac, in J. Jaubert (dir.), *Grotte de Cussac (Le Buisson-de-Cadouin, Dordogne). Projet collectif de recherche 2018-20 et Prospection thématique avec relevé d'art rupestre 2018, Rapport 2018*, service régional d'Archéologie de la région Nouvelle Aquitaine, mai 2019, p. 221-226.
- _____. (à paraître) – La dimension sonore de la Grande Grotte d'Arcy-sur-Cure, in D. Baffier et M. Girard (à paraître).
- RIBARDIÈRE M., Carré S. et Bouatouch K. (2011)** – Adaptive Records for Irradiance Caching, *Computer Graphics forum*, 30, 6, p. 1603-1616.
- RIGAUD A. (2000)** – Étude expérimentale des lampes de La Garenne (Indre), *Revue archéologique du Centre de la France*, 39, p. 215-221.
- RIVERO O. (2016)** – Master and apprentice: Evidence for learning in Palaeolithic portable art, *Journal of Archaeological Science*, 75, p. 89-100.
- RIVIÈRE É. (1899)** – La lampe en grès de la grotte de La Mouthe (Dordogne), *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 10, p. 554-563.
- ROBERT E. (2006)** – *Les signes et leurs supports pariétaux. : Analyse comparée des rapports entre les représentations abstraites et les reliefs naturels dans les grottes ornées du Paléolithique supérieur au sein de l'espace franco-cantabrique*, thèse de doctorat, Université Paris 1 – Panthéon Sorbonne, Paris, 504 p.

Bibliographie

- _____. (2007) – L'utilisation des reliefs pariétaux dans la réalisation des signes au Paléolithique supérieur, *L'anthropologie*, 111, p. 467-500.
- _____. (2011) – Signes, parois, espaces. Modalités d'expression dans le Paléolithique supérieur ouest-européen, in J. Clottes (dir.), *L'art pléistocène dans le monde / Pleistocene art of the world / Arte pleistoceno en el mundo*, actes du Congrès IFRAO (Tarascon-sur-Ariège, septembre 2010), Symposium « Art pléistocène en Europe », Tarascon-sur-Ariège, Société Préhistorique Ariège-Pyrénées (n° spécial de Préhistoire, Art et Sociétés), 65-66, p. 1941-1958.
- ROUZAUD F. (1978)** – *La Paléospéléologie : l'homme et le milieu souterrain pyrénéen au Paléolithique supérieur*, Toulouse, France, École des hautes études en sciences sociales, 168 p.
- _____. (1993) – Topographie interne : relevé topographique, in G.R.A.P.P., *L'art pariétal paléolithique. Techniques et méthodes d'étude*, Paris, Comité Des Travaux Historiques Et Scientifiques, p. 39-48.
- _____. (1997) – La paléospéléologie ou : l'approche globale des documents anthropiques et paléontologiques conservés dans le karst profond, *Quaternaire*, 8, 2-3, p. 257-265.
- RUIZ-REDONDO A. (2014)** – *Entre el Cantábrico y los Pirineos: El conjunto de Altxerri en el contexto de la actividad gráfica magdaleniense*, Santander, Nadir, 315 p.

S

- SADIER B. (2013)** – *3D et géomorphologie karstique : la grotte Chauvet et les cavités des Gorges de l'Ardèche*, thèse de doctorat, Université de Grenoble, Grenoble, 482 p.
- SALMON F. (2019)** – *Simulation aéro-thermo-mécanique des effets du feu sur les parois d'un milieu confiné. Application à l'étude des thermo-altérations de la grotte Chauvet-Pont d'Arc*, thèse de doctorat, Université de Bordeaux, Bordeaux, 304 p.
- SALMON F., LACANETTE D., MINDEGUIA J.-C., SIRIEX C., BELLIVIER A., FERRIER C. et LEBLANC J. C. (2019)** – Localized fire in a gallery: model development and validation, *International Journal of Thermal Science*, 139, p.144- 159.
- SANZ DE SAUTUOLA M. (don) (1880)** – *Breves apuntes sobre algunos objetos prehistóricos de la provincia de Santander*, Santander, Imp. y lit. de Telesforo Marinez, p. 17.
- SARRADET M. (1979)** – Conservation de la grotte de Lascaux, in Arl. Leroi-Gourhan et J. Allain (dir.), *Lascaux Inconnu*, Paris, Ed. du Centre National de la Recherche Scientifique (XIIe supplément à Gallia Préhistoire), p. 15-19.
- SAUVET G. (1993)** – La composition et l'espace orné, in G.R.A.P.P., *L'art pariétal paléolithique. Techniques et méthodes d'étude*, Paris, Comité Des Travaux Historiques Et Scientifiques, p. 297-309.

Bibliographie

- SCHENKMAN B.N. et NILSSON M.E. (2010)** – Human echolocation: Blind and sighted persons' ability to detect sounds recorded in the presence of a reflecting object, *Perception*, 39, p. 483-501.
- SÈVE R. (2009)** – *Science de la couleur : aspects physiques et perceptifs*, Marseille, Chalagam, 374 p.
- SIMONOT L., BOULENGUEZ P. et VIÉNOT F. (2019)** – *Quand la matière diffuse la lumière*, Paris, Mines ParisTech PSL, 455 p.
- SIRE M.-A. (2006)** – Des restaurateurs au chevet des peintures de Lascaux. De l'élimination des champignons au constat d'état, in Les grottes ornées, *Monumental*, Paris, Monum Éditions du Patrimoine, 2, p. 68-75.
- SMITHSON H. E. (2005)** – Sensory, computational and cognitive components of human colour constancy, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 360, p. 1329-1346.

T

- TENG S. et WHITNEY D. (2011)** – The acuity of echolocation: Spatial resolution in the sighted compared to expert performance, *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 105, 1, p. 20-32.
- TESTART A. (2016)** – *Art et religion, de Chauvet à Lascaux*, Paris, Gallimard, 373 p.
- THÉRY-PARISOT I. et THIÉBAULT S. (2005)** – Le pin (*Pinus sylvestris*) : préférence d'un taxon ou contrainte de l'environnement ? Étude des charbons de bois de la grotte Chauvet, *Bulletin de la Société préhistorique française*, 102, 1, p. 69-75.
- THÉRY-PARISOT I., THIÉBAULT S., DELANNOY J.-J., FERRIER C., FERUGLIO V., FRITZ C., GÉLY B., GUIBERT P. MONNEY J., TOSELLO G., CLOTTES J. et GENESTE J.-M. (2018)** – Illuminating the cave, drawing in black: wood charcoal analysis at Chauvet-Pont d'Arc, *Antiquity*, 92, 362, p. 320–333.
- THIBAUT G. (2001)** – Modélisation 3D de la grotte Cosquer par relevé laser, *International Newsletter On Rock Art*, 28, p. 25-29.
- TURRIER C. (2015)** – *Le son : théorie et technologie cours et exercices corrigés*, Paris, Ellipses, 282 p.

V

- VAN GELDER L. et NOWELL A. (2018)** – Illumination, embodiment, and cooperation among Upper Palaeolithic Cave Artists, *20th International Rock Art Congress IFRAO* (Valcamonica Darfo Boario Terme, Italy, 29th August – 2nd September 2018), p. 539.

Bibliographie

- VERDET C. (2019)** – *Caractérisation multi-échelle du milieu karstique non saturé*, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, Bordeaux, 267 p.
- VERDET C., SIRIEX C., MARACHE A., RISS J. et PORTAIS J.-C. (2020)** – Detection of undercover karst features by geophysics (ERT) Lascaux cave hill, *Geomorphology*, 360, 1, 13 p.
- VIALOU D. (1986)** – *L'art des grottes en Ariège magdalénienne*, Paris, Ed. du Centre National de la Recherche Scientifique (XXII^e Supplément à Gallia Préhistoire), 432 p.
- _____. (1987) – *L'Art des cavernes : les sanctuaires de la préhistoire*, Paris, Rocher (Science et découvertes, 19), 128 p.
- VIDAL P. (2008)** – La conservation de Lascaux : d'une crise (1957-1963) à l'autre (2000-2007), *Les Dossiers d'Archéologie*, hors-série, 15, p. 30-45.
- VILLENEUVE S. N. et HAYDEN B. (2007)** – Nouvelle approche de l'analyse du contexte des figurations pariétales, in S. A. de Beaune, *Chasseurs-cueilleurs*, Paris, Ed. du Centre National de la Recherche Scientifique, p. 151-159.
- VILLENEUVE S. N. (2008)** – *Looking at caves from the bottom-up: a visual and contextual analysis of four Paleolithic painted caves in Southwest France (Dordogne)*, mémoire de maîtrise, Université de Victoria, Victoria, 208 p.
- VILLOTTE S., SANTOS F. et COURTAUD P. (2015)** – Brief Communication: *In Situ* Study of the Gravettian Individual from Cussac Cave, Locus 2 (Dordogne, France), *American Journal of Physical Anthropology*, 158, p. 759-768.
- VILLOTTE S., SAMSEL M. et SPARACELLO V. (2017)** – The paleobiology of two adult skeletons from Baouso da Torre (Bausu da Ture) (Liguria, Italy): Implications for Gravettian lifestyle, *Comptes Rendus Palevol*, 16, p. 462-473.
- VILLOTTE S., KACKI S., GUYOMARC'H P. et SCHOTSMANS E. (2020)** – Des vestiges humains, in J. Jaubert, V. Feruglio et N. Fourment (dir.), *Grotte de Cussac. -30 000*, Bordeaux, éditions confluentes, p. 129-140.
- VIRÉ A. (1934)** – Les lampes du quaternaire moyen et leur bibliographie, *Bulletin de la Société préhistorique française*, 31, 11, p. 517-520.

W

- WALLER S. J. (1993)** – Sound and rock art, *Nature*, 363, p. 501.
- WINDELS F. et LAMING A. (1948)** – *Lascaux "chapelle sixtine" de la préhistoire*, Montignac, Centre d'études et de documentation préhistoriques, 138 p.
- WYATT S. (2009)** – Soul Music: Instruments in an Animistic Age, in S. Banfield (ed.), *The Sounds of Stonehenge*, Oxford, Archaeopress, p. 11-20.

X

XU S., SIRIEX C., FERRIER C., LACANETTE-PUYO D., RISS J. et MAULAURENT P. (2015) – A Geophysical Tool for the Conservation of a Decorated Cave. A Case study for the Lascaux Cave, *Archaeological Prospection*, 22, 4, p. 283-292.

Z

ZANIER S. et DELAHAYE J. (2019) – La lumière “bleue” sous l’œil du spectroscope, *Bulletin de l’Union des Physiciens*, 1010, p. 61-76.

ZEGHERS E., CARRÉ S. et BOUATOUCH K. (1997) – Error-bound wavelength selection for spectral rendering, *The Visual Computer*, 13, p. 424-434.

~ Annexes ~

ANNEXE 1 – CALIBRATION DES DIMENSIONS DES BRINS DES TORCHES

Pour calibrer les dimensions des brins incorporés aux torches, nous avons mesuré la hauteur de flamme, l'éclairement et la durée de la combustion en fonction de la nature, du nombre et de la dimension des brins utilisés (Tableau 30, Tableau 31, Tableau 32, Tableau 33).

Pin sylvestre – 1 brin				
N° Torche	Diamètre moyen brin (cm)	Hauteur flamme (cm)	Éclairement (lux)	Durée combustion (s)
1 P	< 0,5 cm	3		100
2 P	< 0,5 cm	5		82
3 P	< 0,5 cm	6	1	81
Moyenne Pin 1	< 0,5 cm	5	1	88
4 P	0,5 à 1 cm	6	1.5	132
5 P	0,5 à 1 cm	2		108
6 P	0,5 à 1 cm	5	1.5	108
7 P	0,5 à 1 cm	6	2	94
8 P	0,5 à 1 cm	7		105
Moyenne Pin 2	0,5 à 1 cm	5.2	1.7	109.4
9 P	1 à 1,5 cm	7		150
10 P	1 à 1,5 cm	3		90
11 P	1 à 1,5 cm	2		25
12 P	1 à 1,5 cm	1		15
13 P	1 à 1,5 cm	2	0.5	180
Moyenne Pin 3	1 à 1,5 cm	3	0.5	92
14 P	1,5 à 2 cm	2		195
15 P	1,5 à 2 cm	1		13
16 P	1,5 à 2 cm	1		30
17 P	1,5 à 2 cm	1		59
18 P	2-2,5 cm	3		240
Moyenne Pin 4	2-2,5 cm	1.6		107.4

Tableau 30 : Production de lumière et durée de l'éclairage d'une torche composée d'un brin de pin sylvestre en fonction du diamètre de ce dernier.

Genévrier – 1 brin				
N° Torche	Diamètre moyen brin (cm)	Hauteur flamme (cm)	Éclairage (lux)	Durée combustion (s)
1 G	< 0,5 cm	4		54
2 G	< 0,5 cm	1	0.2	23
3 G	< 0,5 cm	3	0.8	45
Moyenne Genévrier 1	< 0,5 cm	3	0.5	41
4 G	0,5 à 1 cm	1		60
5 G	0,5 à 1 cm	1		39
6 G	0,5 à 1 cm	5		56
7 G	0,5 à 1 cm	5	1.5	51
8 G	0,5 à 1 cm	7		97
Moyenne Genévrier 2	0,5 à 1 cm	3.8	1.5	60.6
9 G	1 à 1,5 cm	5		75
10 G	1 à 1,5 cm	1		40
11 G	1 à 1,5 cm	2		20
12 G	1 à 1,5 cm	1		12
13 G	1 à 1,5 cm	2		14
Moyenne Genévrier 3	1 à 1,5 cm	2.2		32.2
14 G	2-2,5 cm	1		58
15 G	2-2,5 cm	0.5		10
16 G	2-2,5 cm	0.5		10
17 G	2-2,5 cm	0.5		15
Moyenne Genévrier 4	2-2,5 cm	0.625		23.25

Tableau 31 : Production de lumière et durée de l'éclairage d'une torche composée d'un brin de genévrier en fonction du diamètre de ce dernier.

Torches à 4 brins					
N° Torche	Essence	Diamètre moyen brins (cm)	Circonférence torche (cm)	Hauteur flamme (cm)	Durée combustion (s)
19 P	Pin sylvestre	< 0,5 cm		5	2.7
20 P	Pin sylvestre	0,5 - 1 cm		10	2.5
21 P	Pin sylvestre	1-1,5 cm	10	7	3.4
22 P	Pin sylvestre	1,5-2 cm	12.5	8	3.3
18 G	Genévrier	< 0,5 cm		2	0.75
19 G	Genévrier	0,5 - 1 cm		4	1
20 G	Genévrier	1-1,5 cm	10	2	0.43
1 Mx	Mixte 50/50	1-1,5 cm	10	2	1.28
2 Mx	Mixte 50/50	2	8	30	15
3 Mx	Mixte 50/50	3	10	30	20

Tableau 32 : Hauteur de flamme et durée de l'éclairage de torches constituées de 4 brins en fonction de la nature et de la dimension des brins.

Torches à 8 brins					
N° Torche	Essence	Circonférence torche (cm)	Hauteur flamme (cm)	Éclairage (lux)	Durée combustion (s)
23 P	Pin sylvestre	16	25	5.5	3.32
4 Mx	Mixte 75% pin	17.5	25	6	4.68
5 Mx	Mixte 50% pin	20	25	5	4.8
6 Mx	Mixte 25% pin	17	25	6	3.55
21 G	Genévrier	19.5	25	3	3.38

Tableau 33 : Hauteur de flamme, éclairage et durée de l'éclairage de torches constituées de 8 brins en fonction de la nature et de la dimension des brins et de la circonférence de la torche.

ANNEXE 2 : PRÉSENTATION DES TORCHES UTILISÉES DANS LA CARRIÈRE DE LUGASSON

A. Organisation des torches

Une quinzaine de brins de 0,5 à 1,5 cm de diamètre ont été fichés dans une branche fendue en quatre. Le brin le plus long a été enquillé le plus profondément possible au milieu de la branche pour servir d'appui aux autres brins. Ces derniers ont ensuite été coincés dans la torche, et maintenus par les fentes du manche et le brin central. Lorsqu'ils ne pouvaient être fichés, ils ont été placés sur les bords et maintenus à l'aide d'un lien végétal en osier. Le manche est la partie la plus difficile à produire, nous l'avons donc conservé après l'extinction de la torche.

B. Description et dimensions des torches

1. T9

Pin sylvestre

17 brins

Longueur du brin le plus long : 73 cm

Longueur du brin le plus court : 40 cm

Longueur totale (manche compris) : 95 cm

Poids des brins : 805 g

Poids du manche : 165 g

Diamètre total : 9 cm

Durée de combustion : 29 min 23



Figure 191 : Torche numéro T9, cl. C. Ferrier et A. Jouteau



Figure 192 : Torche numéro T10, cl. C. Ferrier et A. Jouteau

2. T10

Pin sylvestre

17 brins

Longueur du brin le plus long : 53 cm

Longueur du brin le plus court : 40 cm

Longueur totale : 84 cm

Poids des brins : 815 g

Poids du manche : 250 g

Diamètre total : 9 cm

Durée de combustion : 31 min 34

3. T11

6 brins de pin sylvestre et 8 brins de genévrier
Longueur du brin en pin le plus long : 70 cm
Longueur du brin en pin le plus court : 45 cm
Longueur du brin en genévrier le plus long : 55 cm
Longueur du brin en genévrier le plus court : 40 cm
Longueur totale : 90 cm
Poids des brins de pin : 430 g
Poids des brins de genévrier : 370 g
Poids du manche : 195 g
Diamètre total : 8,5 cm
Durée de combustion : 33 min 57



Figure 193 : Torche numéro T11, cl. C. Ferrier et A. Jouteau

ANNEXE 3 : INFLUENCE DU SPECTRE DES LAMPES A GRAISSE SUR LA PERCEPTION VISUELLE

Reproduction sans saturation des images présentes dans la Figure 87 et permettant de comparer l'influence du spectre de l'éclairage sur la perception des motifs et des couleurs.

Pour observer ces images, il est nécessaire de disposer d'un écran calibré, et que les images soient affichées en plein écran. L'observateur doit être plongé dans un environnement non éclairé depuis au moins 20 min avant de réaliser des observations, afin que ses yeux soient habitués à l'obscurité.

Les fichiers sont disponibles dans l'archive associée au manuscrit.

ANNEXE 4 : PHOTOGRAPHIES DES ÉCHANTILLONS ENVOYÉS POUR CAROTTAGE PUIS MESURES AU TUBE DE KUNDT

A. Échantillons de Lascaux

Les échantillons sont issus de blocs calcaires de la colline de Lascaux, dégagés lors de l'installation de la réserve incendie sur la colline – cote altimétrique située entre 175 et 177 mètres NGF (Figures 196, 197, 198, 199, 200, 201).



Figure 194 : Blocs de la colline de Lascaux dont sont issus les échantillons mesurés (cl. J.-C. Portais).

Annexes

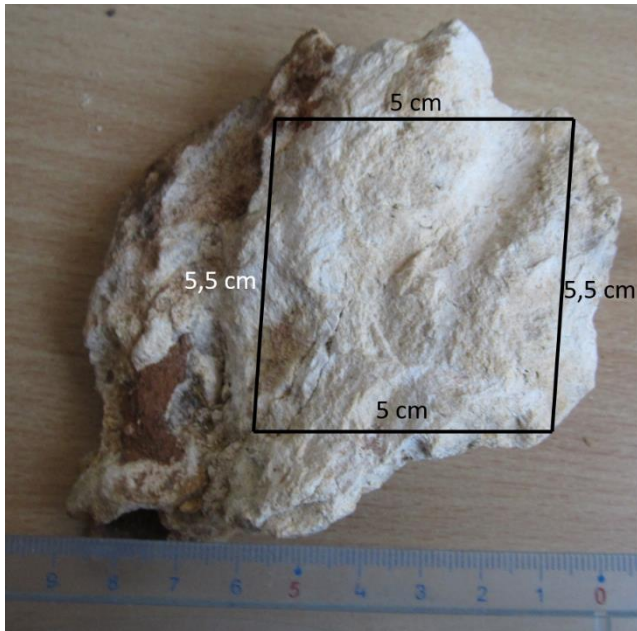


Figure 195 : Lascaux, échantillon n°1, cl. A. Jouteau.



Figure 196 : Lascaux, échantillon n°2, cl. A. Jouteau.

Annexes

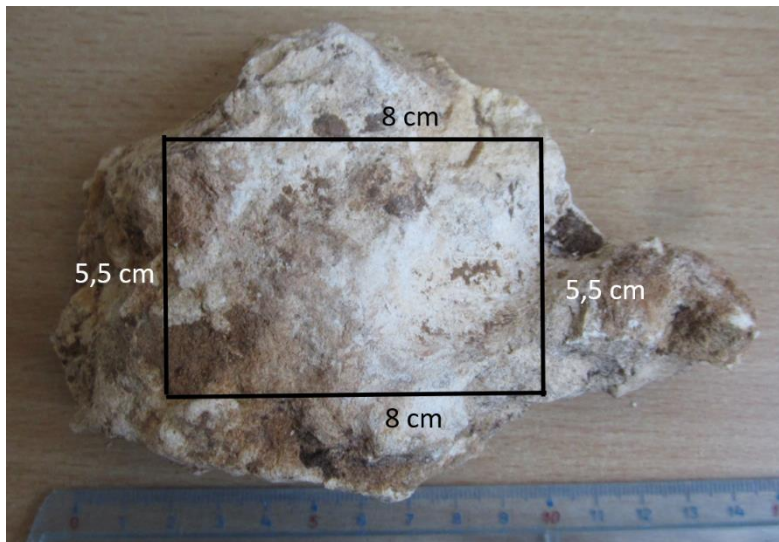


Figure 197 : Lascaux, échantillon n°3, cl. A. Jouteau.



Figure 198 : Lascaux, échantillon n°4, cl. A. Jouteau.



Figure 199 : Lascaux, de gauche à droite échantillons n°5, 3 et 6, cl. A. Jouteau.

B. Échantillons de Cussac

Les échantillons sont issus des déblais du sondage de l'entrée de la cavité et étaient entreposés à proximité immédiate du porche d'entrée. Il s'agit de blocs correspondant au calcaire lité de la cavité (niveaux 2 ou 3), Figures 202, 203, 204, 205.

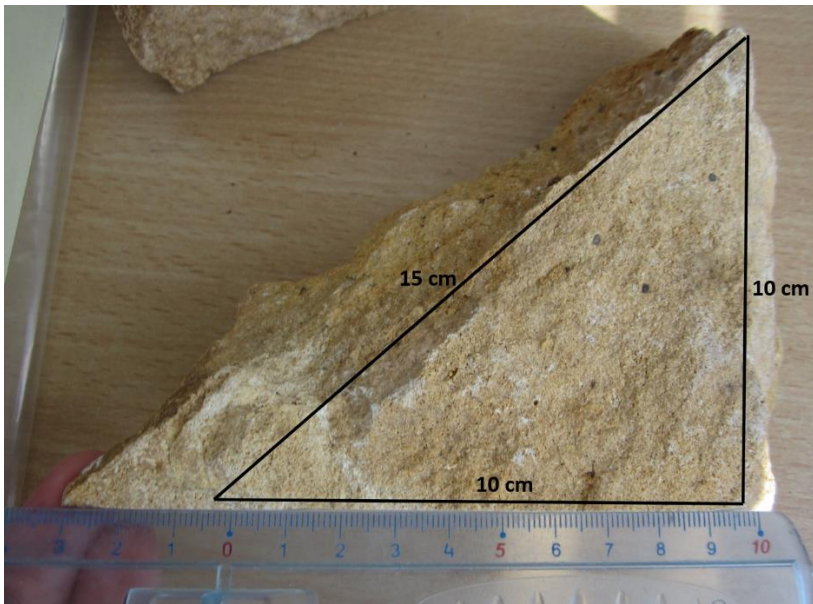


Figure 200 : Cussac, bloc n°1, cl. A. Jouteau.



Figure 201 : Cussac, bloc n°2, cl. A. Jouteau.

Annexes



Figure 202 : Cussac, bloc n°3, cl. A. Jouteau.



Figure 203 : Cussac, bloc n°4, cl. A. Jouteau.

C. Échantillons de Leye

Les échantillons ont été prélevés à l'intérieur de la grotte de Leye (il s'agissait de blocs préalablement tombés des parois), Figures 206, 207, 208, 209.



Figure 204 : Leye, bloc n°1, cl. A. Jouteau.



Figure 205 : Leye, bloc n°2, cl. A. Jouteau.

Annexes



Figure 206 : Leye, bloc n°3, cl. A. Jouteau.



Figure 207 : Leye, bloc n°4, cl. A. Jouteau.

D. Échantillons de calcite

Les échantillons de calcite proviennent du site de Coudoulous (Lot), Figures 210, 211, 212, 213.



Figure 208 : Calcite du site de Coudoulous, bloc n°1, cl. A. Jouteau.



Figure 209 : Calcite du site de Coudoulous, bloc n°2, cl. A. Jouteau.

Annexes



Figure 210 : Calcite du site de Coudoulous, bloc n°5, cl. A. Jouteau.



Figure 211 : Calcite du site de Coudoulous, bloc n°4, cl. A. Jouteau.

E. Échantillons d'argile

L'argile a été prélevée dans la grotte de Veysou (Dordogne) en raison de sa granulométrie proche de l'argile de la grotte de Cussac (Ledoux, 2019), Figure 214.

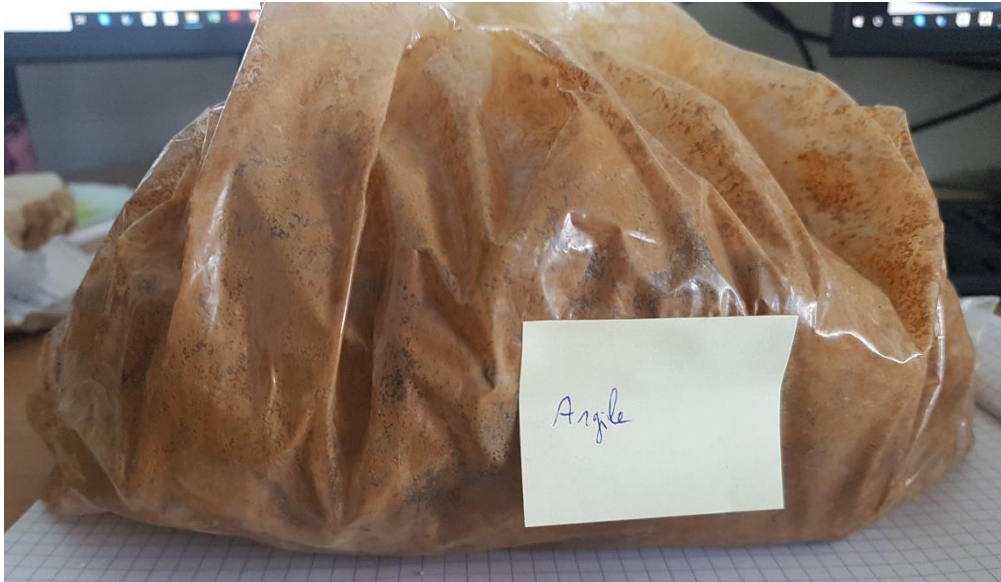
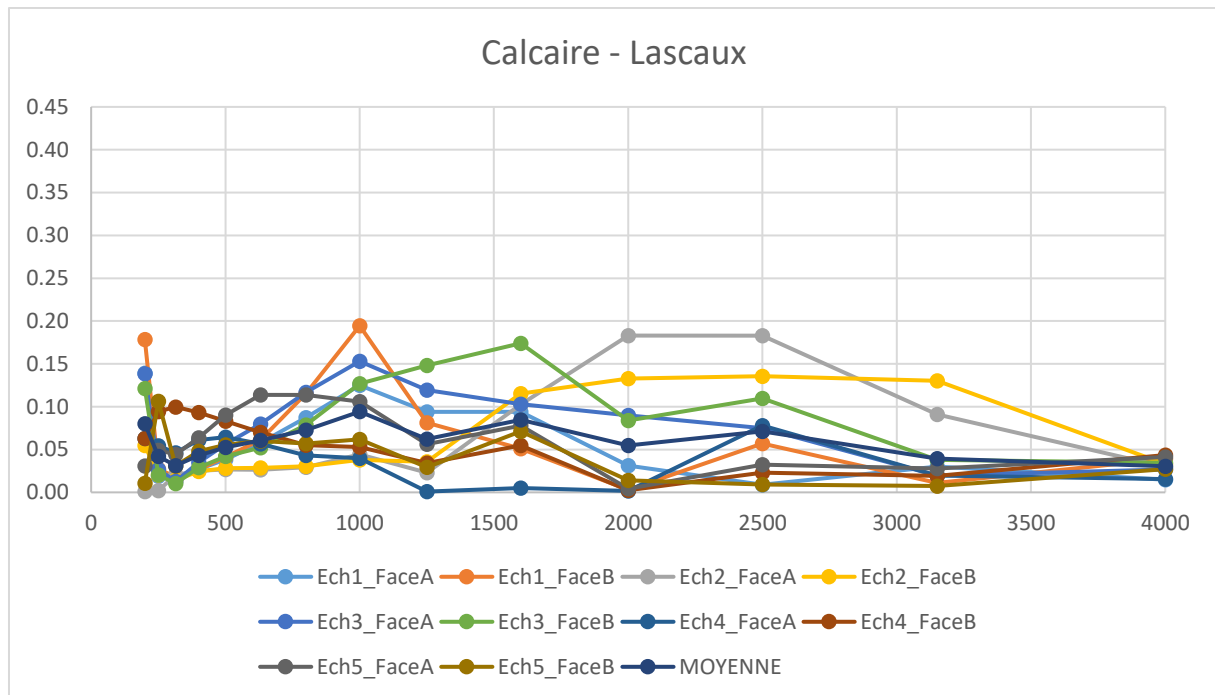


Figure 212 : Bloc d'argile de la grotte de Veysou utilisé pour les mesures au tube de Kundt, cl. A. Jouteau.

ANNEXE 5 : MESURES AU TUBE DE KUNDT COMPLÈTES

A. Mesures sur calcaires de Lascaux

Graphique 42 : Absorption en incidence normale α_n des mesures sur les échantillons de calcaire de Lascaux (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).

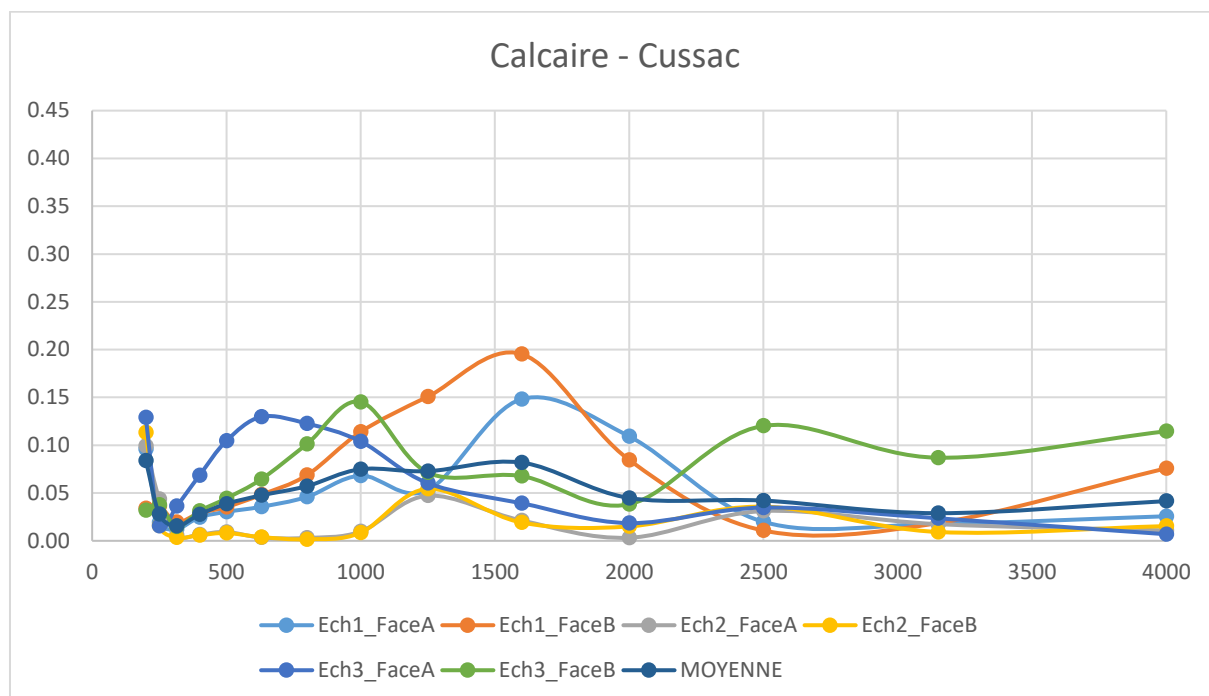
Réf. Matériaux	Calcaire - Lascaux					
	Freq. (Hz)	Ech1_FaceA	Ech1_FaceB	Ech2_FaceA	Ech2_FaceB	Ech3_FaceA
200	0.14	0.18	0.00	0.05	0.14	0.12
250	0.02	0.03	0.00	0.02	0.03	0.02
315	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
400	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03
500	0.04	0.04	0.03	0.03	0.06	0.04
630	0.06	0.06	0.03	0.03	0.08	0.05
800	0.09	0.12	0.03	0.03	0.12	0.08
1000	0.13	0.19	0.04	0.04	0.15	0.13
1250	0.09	0.08	0.02	0.04	0.12	0.15
1600	0.09	0.05	0.10	0.12	0.10	0.17
2000	0.03	0.00	0.18	0.13	0.09	0.08
2500	0.01	0.06	0.18	0.14	0.07	0.11
3150	0.03	0.01	0.09	0.13	0.02	0.04
4000	-0.01	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03

Tableau 34 : Absorption en incidence normale α_n de chaque face de chaque éprouvette des échantillons de calcaire de Lascaux – première partie (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).

Réf. Matériaux	Calcaire - Lascaux			
	Freq. (Hz)	Ech4_FaceA	Ech4_FaceB	Ech5_FaceA
200	0.06	0.06	0.03	0.01
250	0.05	0.09	0.05	0.11
315	0.05	0.10	0.04	0.03
400	0.06	0.09	0.06	0.05
500	0.06	0.08	0.09	0.06
630	0.06	0.07	0.11	0.06
800	0.04	0.06	0.11	0.06
1000	0.04	0.05	0.11	0.06
1250	0.00	0.03	0.06	0.03
1600	0.01	0.05	0.08	0.07
2000	0.00	0.00	0.00	-0.01
2500	0.08	-0.02	-0.03	0.01
3150	-0.02	0.02	0.03	0.01
4000	0.02	0.04	0.04	0.03

Tableau 35 : Absorption en incidence normale α_n de chaque face de chaque éprouvette des échantillons de calcaire de Lascaux – deuxième partie (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).

B. Mesures sur calcaires de Cussac

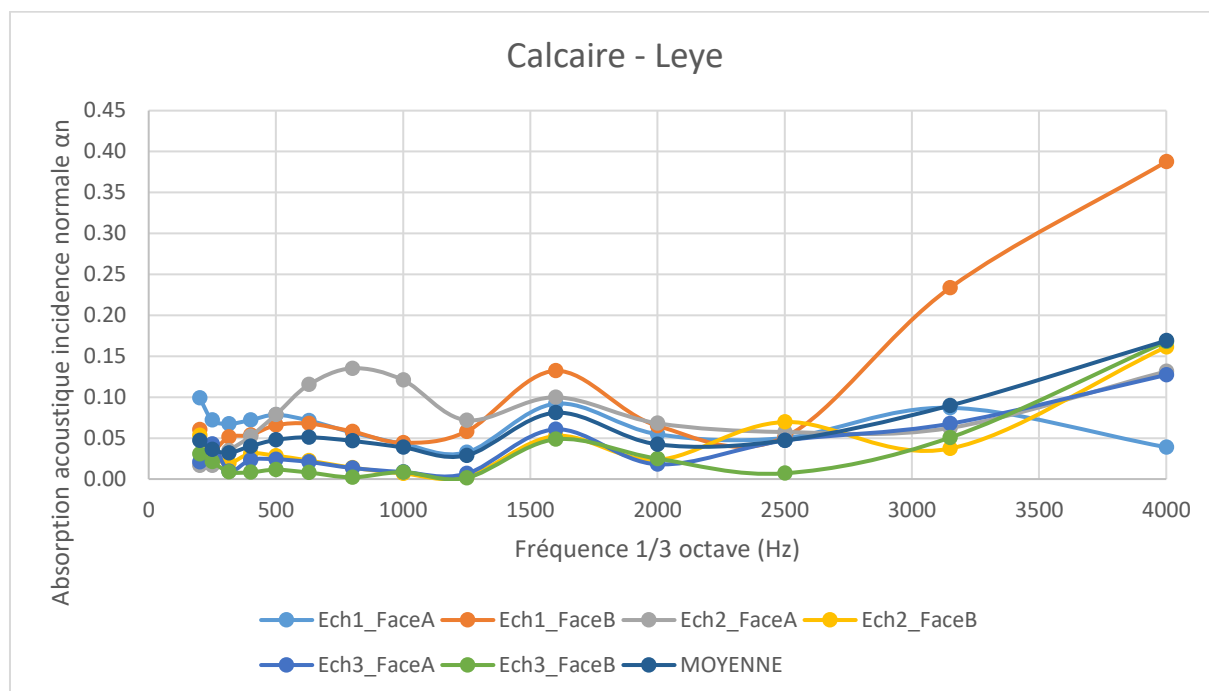


Graphique 43 : Absorption en incidence normale α_n des mesures sur les échantillons de calcaire de Cussac (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).

Réf. Matériaux	Calcaire - Cussac					
	Ech1_FaceA	Ech1_FaceB	Ech2_FaceA	Ech2_FaceB	Ech3_FaceA	Ech3_FaceB
200	0.10	0.03	0.10	0.11	0.13	0.03
250	0.02	0.04	0.04	0.02	0.02	0.04
315	0.01	0.02	0.01	0.00	0.04	0.01
400	0.02	0.03	0.01	0.01	0.07	0.03
500	0.03	0.04	0.01	0.01	0.10	0.04
630	0.04	0.05	0.00	0.00	0.13	0.06
800	0.05	0.07	0.00	0.00	0.12	0.10
1000	0.07	0.11	0.01	0.01	0.10	0.15
1250	0.05	0.15	0.05	0.05	0.06	0.07
1600	0.15	0.20	0.02	0.02	0.04	0.07
2000	0.11	0.08	0.00	-0.02	-0.02	0.04
2500	0.02	0.01	0.03	0.04	-0.03	0.12
3150	0.02	0.02	0.02	-0.01	0.02	0.09
4000	0.03	0.08	-0.01	0.02	0.01	0.11

Tableau 36 : Absorption en incidence normale α_n de chaque face de chaque éprouvette des échantillons de calcaire de Cussac (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).

C. Mesures sur calcaires de Leye

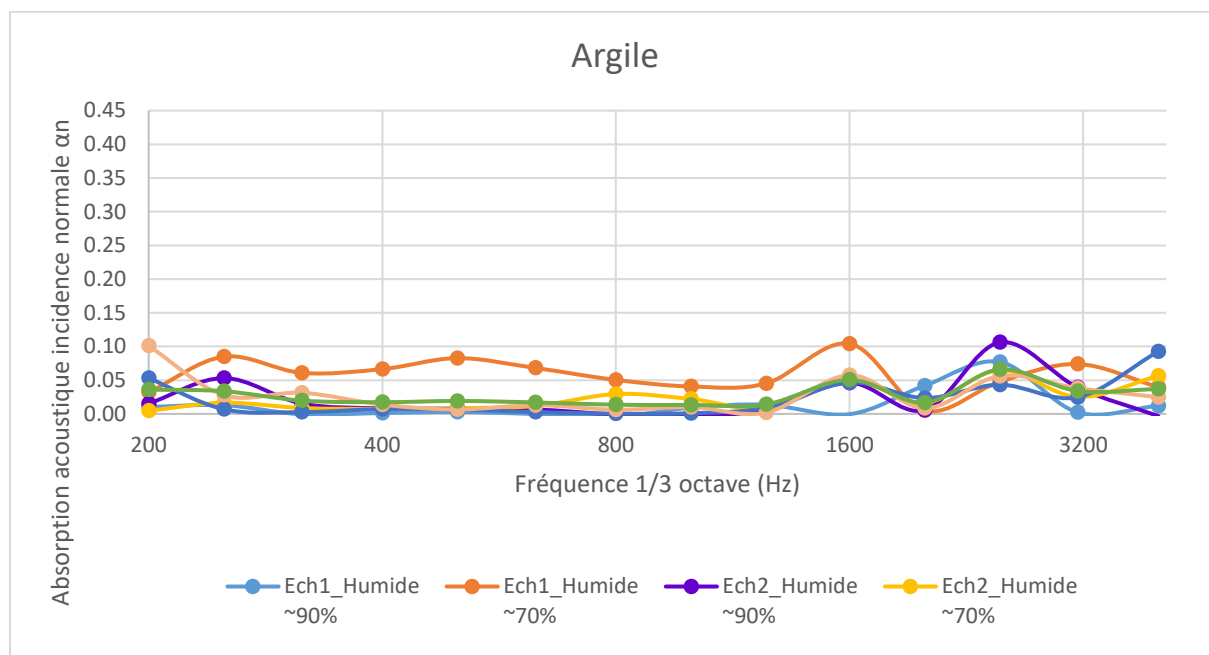


Graphique 44 : Absorption en incidence normale α_n des mesures sur les échantillons de calcaire de Leye (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).

Réf. Matériaux	Calcaire - Leye						
	Freq. (Hz)	Ech1_FaceA	Ech1_FaceB	Ech2_FaceA	Ech2_FaceB	Ech3_FaceA	Ech3_FaceB
	200	0.10	0.06	0.02	0.05	0.02	0.03
	250	0.07	0.04	0.02	0.03	0.04	0.02
	315	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01
	400	0.07	0.05	0.05	0.03	0.02	0.01
	500	0.08	0.07	0.08	0.03	0.02	0.01
	630	0.07	0.07	0.12	0.02	0.02	0.01
	800	0.06	0.06	0.14	0.01	0.01	0.00
	1000	0.04	0.04	0.12	0.01	0.01	0.01
	1250	0.03	0.06	0.07	0.00	0.01	0.00
	1600	0.09	0.13	0.10	0.05	0.06	0.05
	2000	0.05	0.07	0.07	-0.02	0.02	-0.02
	2500	0.05	0.05	0.06	-0.07	-0.05	-0.01
	3150	0.09	0.23	0.06	0.04	0.07	0.05
	4000	0.04	0.39	0.13	0.16	0.13	0.17

Tableau 37 : Absorption en incidence normale α_n de chaque face de chaque éprouvette des échantillons de calcaire de Leye (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).

D. Mesures sur l'argile



Graphique 45 : Absorption en incidence normale α_n des mesures sur les échantillons d'argile (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).

Réf. Matériau	Argile					
Freq. (Hz)	Ech1_Humide de ~90%	Ech1_Humide de ~70%	Ech2_Humide de ~90%	Ech2_Humide de ~70%	Ech3_Humide de ~90%	Ech3_Humide de ~70%
200	0.01	0.03	0.02	0.00	0.05	0.10
250	0.01	0.08	0.05	0.02	0.01	0.03
315	0.00	0.06	0.02	0.01	0.00	0.03
400	0.00	0.07	0.01	0.01	0.01	0.01
500	0.00	0.08	0.01	0.01	0.01	0.01
630	0.00	0.07	0.01	0.01	0.00	0.01
800	0.00	0.05	0.00	0.03	0.00	0.01
1000	0.01	0.04	0.00	0.02	0.00	0.01
1250	0.01	0.05	-0.01	0.01	0.01	0.00
1600	0.00	0.10	0.05	0.05	0.05	0.06
2000	-0.04	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	0.01
2500	-0.08	0.05	0.11	0.07	-0.04	-0.06
3150	0.00	0.07	0.04	0.03	-0.02	0.04
4000	0.01	0.04	0.00	0.06	0.09	-0.02

Tableau 38 : Absorption en incidence normale α_n de chaque face de chaque éprouvette des échantillons de calcaire d'argile (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).

ANNEXE 6 : FICHES D'IDENTITÉ DES RÉPONSES IMPULSIONNELLES DE LA GROTTÉ DE LEYE

Suite aux mesures de réponses impulsionnelles dans la grotte de Leye, chaque mesure a été développée sous la forme d'une fiche d'identité (Figures 215 et 216).

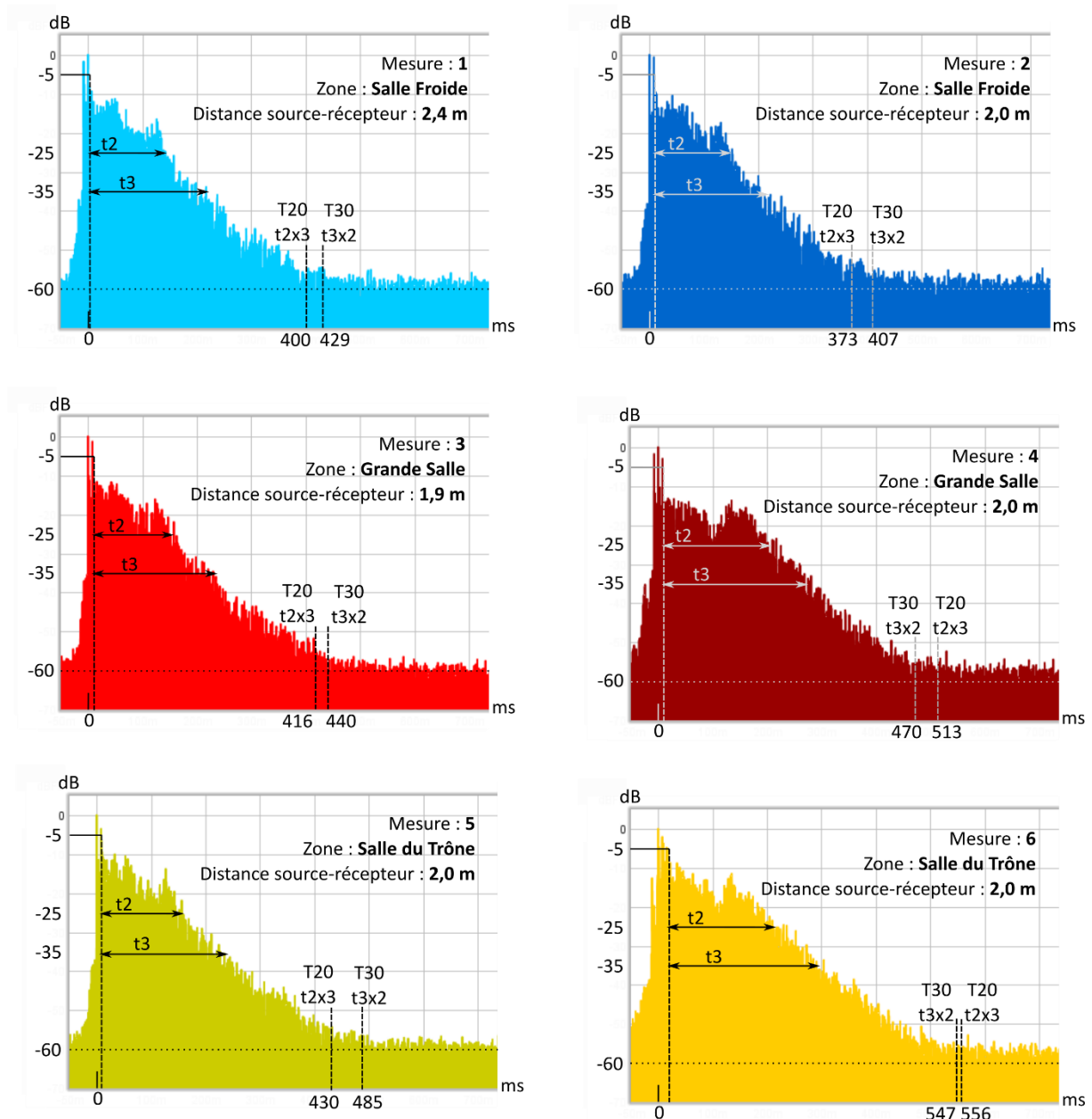


Figure 213 : Fiche d'identité des mesures de réponse impulsionnelle 1 à 6 réalisées à Leye.

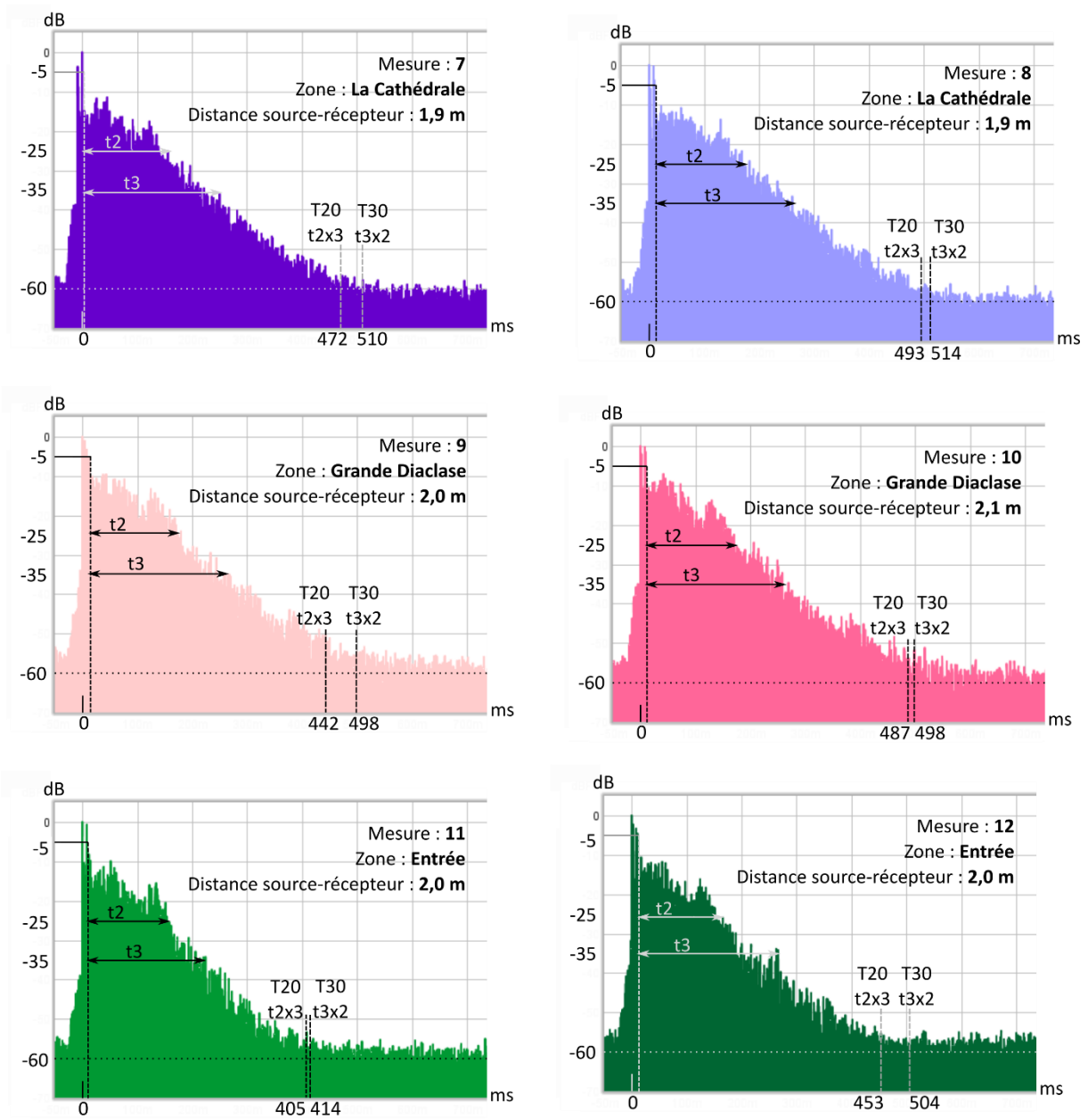


Figure 214 : Fiche d'identité des mesures de réponse impulsionnelle 7 à 12 réalisées à Leye

ANNEXE 7 : TEMPS DE RÉVERBÉRATION T30 PAR TIERS D'OCTAVE DES MESURES RÉALISÉES À CUSSAC

A. Première campagne de mesures (Tableaux 39 et 40)

Localisation	N°	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000	6 300	8 000	10 000
Premier Puits	1	7.72	1.20				0.60					2.53	1.95			0.86	0.75	0.74	0.67	0.57	0.50	0.51	0.47	0.47	
Premier Puits	2	1.88	0.14	3.93			1.40										0.77	0.74	0.71	0.59	0.52	0.45	0.44	0.44	0.53
Trois Points Noirs	3	3.47	0.04					0.53	1.24								0.78	3.70	3.67	0.53	0.37	0.33	0.36	0.36	
Trois Points Noirs	4	28.31	0.10								1.79							0.68	0.60	0.47	0.38	0.33	0.33	0.35	0.42
Entrée salle Panneau de la Découverte	5	10.54	0.33											1.41			0.76	0.69	0.60	0.45	0.26	0.26	0.39	0.35	0.43
Entrée salle Panneau de la Découverte	6	2.40	1.37				0.83			2.22				1.09			0.83	0.73	0.62	0.50	0.33	0.32	0.32	0.32	0.40
En bas du Panneau de la Découverte	7	1.22	0.02					1.40			2.04	2.29	1.26					0.75	0.64	0.48	0.38	0.36	0.37	0.36	
En bas du Panneau de la Découverte	8	0.10	0.70							2.98							0.83	0.74	0.62	0.49	0.40	0.37	0.39	0.41	
Sous le Panneau de la Découverte	9	5.14	0.00		6.00						1.37						0.75	0.64	1.25	0.53	0.27	0.24	0.26	0.31	4.23
Sous le Panneau de la Découverte	10	0.01	0.13		2.49			0.56	1.17	1.49	2.16						0.73	0.66	0.57	0.46	0.24	0.22	0.25	0.33	0.32
Entre Pont d'Argile et Locus 1	11	4.29	8.02					1.86		0.42			1.12					0.70	0.61	0.48	0.43	0.37	0.37	0.39	0.49
Entre Pont d'Argile et Locus 1	12	0.10	0.14						3.68								0.77	0.73	0.61	0.49	0.36	0.36	0.35	0.35	0.45
Aval du Locus 2	13	1.38	0.02					0.33	1.45								0.75	0.65	0.55	0.43	0.22	0.25	0.28	0.31	0.40
Aval du Locus 2	14	1.51	2.05	5.83						0.50							0.78	0.63	0.57	0.45	0.25	0.25	0.28	0.35	0.43
By-Pass	15	2.37	-9.23					0.17	0.46								0.73	0.67	0.53	0.43	0.31	0.30	0.33	0.37	
By-Pass	16	0.88	0.03				0.40										0.74	0.67	0.55	0.46	0.28	0.28	0.31	0.32	0.38

Tableau 39 : T30 de la première campagne de mesures réalisée à Cussac de 50 à 10 000 Hertz, première partie. Les cases grisées correspondent à une absence de données, les mesures « aberrantes » sont en orange.

Annexes

Localisation	N°	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000	6 300	8 000	10 000
Glissade du Bouquetin	17	-12.73	2.60			2.60						2.38		0.96			0.76	0.69	0.59	0.45	0.34	0.36	0.37	0.39	
Glissade du Bouquetin	18	2.08	1.30				0.99						1.71				0.78	0.67	0.56	0.45	0.36	0.36	0.37	0.39	
Animal Acéphale	19	1.49	0.00														0.77	0.70	0.55	0.43	0.32	0.29	0.30	0.34	0.40
Animal Acéphale	20	2.26	0.12					0.50	0.52								0.72	0.65	0.56	0.41	0.27	0.28	0.29	0.32	0.37
Locus 3	21	4.69	0.04				2.03	2.56	1.49	1.40		1.51	1.30	1.14	1.13		0.88	0.80	0.70	0.53	0.53	0.45	0.45	0.45	
Locus 3	22	0.11	1.74						1.07	2.19					1.01			0.83	0.67	0.54	0.45	0.41	0.38	0.40	0.46
Mammoth Isolé	23	0.15	0.55							1.37								0.67	0.57	0.42	0.23	0.27	0.27	0.32	0.55
Mammoth Isolé	24	3.37	0.03						1.22								0.76	0.65	0.59	0.42	0.28	0.24	0.27	0.31	
Grand Panneau	25	0.78	0.18					0.60	1.30					1.83				0.67	0.56	0.35	0.31	0.25	0.29	0.31	0.33
Grand Panneau	26	0.81	0.91				1.80	1.45	3.33	1.48		1.20	1.08			0.88	0.79	0.66	0.59	0.46	0.31	0.32	0.36	0.38	
Grand Panneau	27	2.43	0.10		7.92	6.38		3.68	3.09	2.36	2.57	2.14				0.93	0.86	0.76	1.58	1.55	0.45	0.37	0.37	0.40	
Bouquetin	28	1.13	0.05	3.47								1.58			1.42			1.54	0.82	0.50	0.37	0.35	0.38	0.39	
Aval P.D.	29	2.61	1.90	0.69	0.14								3.29	2.88	2.87	2.57	0.99	3.07	3.34	3.18	0.56	0.46	0.43	0.52	

Tableau 40 : T30 de la première campagne de mesures réalisée à Cussac de 50 à 10 000 Hertz, deuxième partie. Les cases grisées correspondent à une absence de données, les mesures « aberrantes » sont en orange.

B. Seconde campagne de mesures (Tableaux 41, 42 et 43)

Localisation	N°	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000	6 300	8 000	10 000
Panneau du Puits	1	2.32	0.72	0.19			0.49	1.41		0.67	1.24	2.79	2.43	1.45		1.05	0.98	1.01	0.97	0.61	0.51	0.51	0.39	0.38	
Panneau du Puits	2	1.79	2.18						0.98	1.46	2.72		2.37		1.10	1.00	1.06	0.98	1.01	0.72	0.60	0.54	0.43	0.42	
Trois Points Noirs	3	2.08	1.80	0.03						0.72	1.86	1.46					0.78	0.68	1.01	0.48	0.31	0.25	0.27	0.30	
Trois Points Noirs	4	2.18	1.73					0.46			0.55		1.51	1.00	1.95	1.38		0.69	0.59	0.49	0.32	0.24	0.30	0.30	0.35
Entrée salle Panneau de la Découverte	5	0.66	2.15		0.06					1.19	2.29		0.37			0.89	0.80	2.85	2.17	0.45	0.29	0.25	0.28	0.32	
Entrée salle Panneau de la Découverte	6	1.61	2.04					0.48	0.97	1.26	1.19	1.40	1.33	1.14	1.01	1.89	0.83	0.89	1.61	0.52	0.34	0.32	0.28	0.31	
En bas du Panneau de la Découverte	7	2.17	1.49	0.86								3.01					0.93	1.32	1.73	0.53	0.48	0.37	0.35	0.39	
En bas du Panneau de la Découverte	8	1.85	2.95							1.10			1.31	1.01	1.93	0.85		0.72	1.41	0.46	0.34	0.28	0.29	0.29	0.35
Sous le Panneau de la Découverte	9	2.66	0.17	1.76				1.59	1.49	1.41		0.38	0.30	0.29	0.20		0.84	1.40	1.58	0.43	0.28	0.23	0.28	0.31	
Sous le Panneau de la Découverte	10	2.61	0.13						3.08	1.65	0.34	0.34	0.37	0.19			0.82	0.65	1.26	0.48	0.29	0.27	0.26	0.30	
Entre Pont d'Argile et Locus 1	11	-9.58	0.65					1.24	1.12	2.25	1.31	1.21	1.15	1.03	0.95	0.87		0.74	0.64	0.54	0.38	0.35	0.33	0.34	
Entre Pont d'Argile et Locus 1	12	2.11	0.34					1.10	1.44		1.14	1.72	1.14	1.03	0.95	0.88	0.80	0.74	0.62	0.48	0.32	0.29	0.28	0.30	0.34
Aval du Locus 2	13	1.46	0.02					0.21	0.39		0.41	0.29		0.27	0.19		0.87	0.66	0.54	0.42	0.30	0.23	0.28	0.32	0.30
Aval du Locus 2	14	2.46	1.79	0.02		0.41	0.58	0.45	0.26		0.46	0.37				0.18	0.88	0.70	0.55	0.43	0.21	0.23	0.28	0.31	
By-Pass	15	1.49	0.03						0.31	0.45	0.39		0.33		0.23		0.86	0.71	0.58	0.45	0.27	0.23	0.27	0.34	0.33
By-Pass	16	2.74	2.06	1.32				0.42			0.38						0.77	0.74	0.55	0.46	0.25	0.26	0.29	0.36	0.37
Digitaux	17	8.17	0.33	0.05								0.60		1.03		0.89	0.78	0.70	0.59	0.48	0.30	0.29	0.29	0.32	0.35
Digitaux	18	2.05	1.88			0.74	0.58	0.65		2.14	0.59	1.34	1.24			0.16	0.77	0.67	0.59	0.45	0.32	0.28	0.29	0.32	0.35
Animal Acéphale	19	1.93	1.46		0.69	0.72	0.68										0.71	0.64	0.58	0.29	0.33	0.26	0.32	0.36	0.39
Animal Acéphale	20	1.93	0.09			0.79	0.68	0.74	0.29	0.36	1.08						0.87	0.83	0.75	0.56	0.44	0.26	0.22	0.28	0.32

Tableau 41 : T30 de la seconde campagne de mesures réalisée à Cussac de 50 à 10 000 Hertz, première partie. Les cases grisées correspondent à une absence de données, les mesures « aberrantes » sont en orange.

Annexes

Localisation	N°	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000	6 300	8 000	10 000
Locus 3	21	2.77	0.05					3.00	1.34	1.66	1.31	1.22	1.20	1.02	0.97		0.80	0.78	0.68	0.53	0.43	0.36	0.32	0.35	0.41
Locus 3	22	2.74	7.20				0.88	1.04	2.31	1.41	1.27	1.43	1.16	1.40	1.06	0.09		0.80	0.70	0.54	0.39	0.35	0.32	0.34	0.39
En bas du Triptyque	23	3.04	0.34				0.33	0.35	1.18	3.03	1.44	0.55	2.31				0.80	0.69	0.58	0.43	0.31	0.23	0.27	0.29	0.32
En bas du Triptyque	24	1.16	4.19			0.39	0.41	0.63	0.49	0.49		2.57	1.48	1.01			0.81	0.69	0.56	0.44	0.21	0.23	0.27	0.31	0.33
Sous Triptyque	25	1.57	5.28				1.47	0.69	1.46	2.23		1.19	1.34	1.04			0.76	0.63	0.58	0.42	0.18	0.23	0.27	0.33	0.31
Sous Triptyque	26	1.70	0.70				0.48	0.87	0.72	0.36		1.87	1.13	1.05			0.93	0.72	0.54	0.44	0.18	0.21	0.28	0.35	0.32
Mammoth isolé	27	1.75	0.03				5.69	3.10	1.46	2.66	1.56			1.04			0.79	0.66	0.55	0.44	0.32	0.24	0.27	0.31	
Mammoth isolé	28	1.50					4.84	4.03		3.31		1.23	1.19				0.76	0.69	0.57	0.44	0.19	0.23	0.29	0.32	0.31
Pied du Grand Panneau	29	2.11	0.10			0.80	1.48	0.79	0.43	0.36	1.19		1.11	1.09	1.00		0.81	0.67	0.56	0.41	0.22	0.22	0.28	0.31	0.30
Pied du Grand Panneau	30	2.13	0.34				0.43	0.52		2.66	1.10	1.73	1.13	1.47	0.94		0.80	0.69	0.60	0.44	0.27	0.25	0.27	0.30	0.33
Sous l'Empreinte	31	1.72	0.03			0.87	0.75	1.43	0.83	3.24	1.14		2.35	1.01	0.95	0.87	0.76	0.69	0.57	0.45	0.25	0.24	0.28	0.29	0.33
Sous l'Empreinte	32	2.64	0.06				0.91	0.70	0.97	1.74	1.57	1.19	1.11	1.02	0.90		0.79	0.72	0.60	0.44	0.27	0.23	0.26	0.30	
Salle des Gours	33	1.76	1.49					0.56	0.71	2.00	0.60	1.15	1.12	1.09	1.02		0.84	0.79	0.80	0.61	0.47	0.39	0.38	0.30	0.38
Salle des Gours	34	2.01	1.10	2.55			0.82	0.76	1.26	1.44	1.38	1.27		1.11	1.02	0.96	0.85	0.77	0.71	0.63	0.50	0.35	0.35	0.33	0.42
Aval Griffades	35	2.70	15.84					2.65	1.57		1.61	1.74	1.61	1.39	1.21	1.06	0.95	0.91	0.79	0.74	0.63	0.56	0.48	0.53	
Aval Griffades	36	1.48	0.16		4.82				1.58		1.59	1.89	1.52	1.29			1.00	0.87	0.80	0.65	0.53	0.43	0.39	0.33	0.39
Cavicorne	37	2.12	4.28			5.09	4.72	0.62	1.30	0.70		1.59	1.38		0.97		0.83	0.66	0.56	0.42	0.19	0.23	0.27	0.32	0.44
Cavicorne	38	2.65	1.93	0.21			0.41	0.27	0.49	1.43		1.18					0.77	0.68	0.54	0.42	0.17	0.23	0.29	0.33	0.30
Entre Cavicorne et Internacional	39	2.33	1.67							1.20	1.25	0.38	1.67		0.97		0.80	0.68	0.58	0.46	0.21	0.23	0.27	0.32	0.29
Entre Cavicorne et Internacional	40	8.10	0.90				0.53	1.13	1.64	1.05	1.28	1.17	1.16	1.10	0.95	0.89	0.75	0.70	0.65	0.46	0.26	0.25	0.26	0.30	0.32
Intersection du Bloc campaniforme	41	3.72	0.29				0.48	1.54	1.04	1.38	1.25	1.09	1.06	1.00	0.98	0.86	0.79	0.70	0.59	0.48	0.27	0.25	0.27	0.30	0.35
Intersection du Bloc campaniforme	42	1.59	0.25	0.21					1.40	1.19	1.85	1.19	1.15	1.03	0.92	0.91	0.78	0.70	0.64	0.46	0.32	0.26	0.25	0.30	0.32

Tableau 42 : T30 de la seconde campagne de mesures réalisée à Cussac de 50 à 10 000 Hertz, deuxième partie. Les cases grisées correspondent à une absence de données, les mesures « aberrantes » sont en orange.

Annexes

Localisation	N°	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000	6 300	8 000	10 000
Sous Rhinocéros	43	3.82	1.66				0.85			1.07	1.21	1.20	1.17	1.05		0.88		0.73	0.62	0.48	0.24	0.24	0.26	0.31	
Entre Rhinocéros et Gros blocs	44	1.96	1.35				0.49	0.73	1.49		1.22	2.10	1.08	1.06	0.99	0.96	0.82	0.75	0.66	0.53	0.36	0.30	0.28	0.30	0.34
Entre Rhinocéros et Gros blocs	45	2.09	0.80						1.29	1.15	1.26	2.26	1.11	1.08	1.00	0.93		0.74	0.69	0.51	0.35	0.29	0.28	0.30	0.35
Figures Féminines	46	3.54	0.04			1.40		1.31	2.80	1.43	1.37	1.24	1.28	1.26	1.17		1.06	0.93	0.87	0.72	0.56	0.55	0.49	0.40	0.64
Figures Féminines	47	4.53						1.44	1.23	1.40	1.52	1.23	1.28	1.31	1.18	1.11	1.10	0.98	0.92	0.79	0.67	0.55	0.49	0.53	

Tableau 43 : T30 de la seconde campagne de mesures réalisée à Cussac de 50 à 10 000 Hertz, troisième partie. Les cases grisées correspondent à une absence de données, les mesures « aberrantes » sont en orange.

ANNEXE 8 : SIMULATIONS DE SONS DANS LE MODÈLE 3D DE LA GROTTE DE LASCAUX SELON TROIS HYPOTHÈSES DE COEFFICIENTS D'ABSORPTION ACOUSTIQUE

Nous avons simulé un chant d'opéra dans le modèle 3D de la version actuelle de la Salle des Taureaux de Lascaux selon trois hypothèses de coefficients d'absorption acoustique :

- Hypothèse 1 : utilisation des coefficients mesurés au tube de Kundt sans retouche.
- Hypothèse 2 : légère augmentation du coefficient d'absorption mesuré au tube de Kundt à partir de 3 150 Hz, en suivant la correction appliquée pour la grotte de Leye.
- Hypothèse 3 : augmentation nette du coefficient d'absorption mesuré au tube de Kundt à partir de 3 150 Hz, en suivant la correction appliquée pour la grotte de Cussac.

Les fichiers sont disponibles dans l'archive associée au manuscrit.

ANNEXE 9 : ARTICLES PUBLIÉS EN PREMIER AUTEUR

Jouteau A., Feruglio V., Bourdier C., Camus H., Ferrier C., Santos F. et Jaubert J. (2019)
– Choosing rock art locations: Geological parameters and social behaviours. The example of Cussac Cave (Dordogne, France), *Journal of Archaeological sciences*, 105, p. 81-96.

DOI: [10.1016/j.jas.2019.03.008](https://doi.org/10.1016/j.jas.2019.03.008)

Jouteau A., Feruglio V., Lacanette D., Carré S., Noé N. et Jaubert J. (2020) –
Understanding the perception and appropriation of space in Palaeolithic decorated caves: New methods and tools, with the examples of Cussac and Lascaux caves, *Rock Art Research*, 37, 2, p. 137-154.

ANNEXE 10 : SIMULATIONS D'IMAGES POUR L'ANALYSE DES DÉPLACEMENTS DANS CUSSAC

Reproduction sans saturation des figures produites avec *Phanie* dans le Sous-chapitre 3.1.C. *Se déplacer* du Chapitre 3.1 *La grotte de Cussac*.

Pour observer ces images, il est nécessaire de disposer d'un écran calibré, et que les images soient affichées en plein écran. L'observateur doit être plongé dans un environnement non éclairé depuis au moins 20 min avant de réaliser des observations, afin que ses yeux soient habitués à l'obscurité.

Les fichiers sont disponibles dans l'archive associée au manuscrit.

ANNEXE 11 : AURALISATIONS DE L'EXPÉRIENCE D'ÉCHOLOCALISATION

Dix sons ont été produits par *Icare*, respectivement dans les environnements suivants du modèle 3D de la grotte de Cussac :

- Espace n° 1 : Couloir étroit (env. 2 m de large) et bas de plafond (env. 1,50 m).
- Espace n° 2 : Entrée d'une large salle (env. 5 m de haut et de large).
- Espace n° 3 : Centre d'une large salle (env. 6 m de large et 5 m de haut).
- Espace n° 4 : Couloir bas (env. 1,50 m) mais large (env. 5 m).
- Espace n° 5 : Espace de dimensions moyennes (env. 2 m de haut, 3 m de large), situé à la jonction entre plusieurs galeries.
- Espace n° 6 : Extrémité d'une galerie de dimensions moyennes (env. 3 m de large et de haut) s'ouvrant sur une large salle (env. 5 m de haut et de large).
- Espace n° 7 : Galerie de dimensions moyennes (env. 3 m de haut et de large), encombrée de spéléothèmes au sol et au plafond.
- Espace n° 8 : Entrée (env. 3 m de haut et de large) d'une large galerie (env. 5 m de large et de haut, 10 m de long).
- Espace n° 9 : Centre d'une large galerie (env. 5 m de large et de haut, 10 m de long).
- Espace n° 10 : Espace en forme de méandre, bas de plafond (1,30 m de haut).

Les fichiers sont disponibles dans l'archive associée au manuscrit.

ANNEXE 12 : RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE D'ÉCHOLOCALISATION

Le détail des réponses des participants à l'expérience d'écholocation sont présentés dans le Tableau 44.

Participant	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
Espace associé au son 1	4	1	6	1	4	1	4	1	10	1	4	4	6	6	1	1	7	1	6	8	1	6	3	1
Espace associé au son 2	2	2	4	5	10	2	1	8	4	10	2	1	2	8	10	8	1	5	10	9	3	1	5	2
Espace associé au son 3	3	10	1	4	8	7	10	10	6	7	5	5	8	1	7	7	6	8	1	10	6	7	8	3
Espace associé au son 4	6	4	5	10	1	3	6	4	1	6	8	7	10	4	6	10	10	9	4	5	8	5	9	9
Espace associé au son 5	1	5	7	7	5	9	8	7	2	4	6	10	7	7	4	4	8	7	5	2	2	2	2	6
Espace associé au son 6	7	7	9		3	10	7	3	7	9	1	9	3	9	9	3	2	3	3	6	4	3	1	4
Espace associé au son 7	8	8	8	9	7	8	9	5	5	2	10	6	4	10	5	6	5	2	2	3	5	10	7	7
Espace associé au son 8	9		10	8	6	6	5	6	8	5	7	8	1	5	8	5	4	4	8	4	7	8	6	5
Espace associé au son 9	5	9	3	2	2	4	3	9	3	3	9	2	9	2	2	9	9	10	7	1	9	9	4	8
Espace associé au son 10	10	3	2	3	9	5	2	2	9	8	3	3	5	3	3	2	3	6	9	7	10	4	10	10

Tableau 44 : Résultats de chaque participant à l'expérience.

ANNEXE 13 : SIMULATIONS D'IMAGES DANS LE CADRE DE L'OBSERVATION DU PANNEAU DE LA DÉCOUVERTE (CUSSAC)

Reproduction sans saturation des figures produites avec *Phanie* dans le Sous-chapitre 3.1.D. *L'observation du monde souterrain* du Chapitre 3.1 *La grotte de Cussac*.

Pour observer ces images, il est nécessaire de disposer d'un écran calibré, et que les images soient affichées en plein écran. L'observateur doit être plongé dans un environnement non éclairé depuis au moins 20 min avant de réaliser des observations, afin que ses yeux soient habitués à l'obscurité.

Les fichiers sont disponibles dans l'archive associée au manuscrit.

ANNEXE 14 : SIMULATIONS D'IMAGES DANS LE DIVERTICULE AXIAL (LASCAUX)

Reproduction sans saturation des figures produites avec *Phanie* dans le Sous-chapitre 3.2.C. *Influence de l'éclairage sur la distinction des couleurs* du Chapitre 3.2. *La grotte de Lascaux*.

Pour observer ces images, il est nécessaire de disposer d'un écran calibré, et que les images soient affichées en plein écran. L'observateur doit être plongé dans un environnement non éclairé depuis au moins 20 min avant de réaliser des observations, afin que ses yeux soient habitués à l'obscurité.

Les fichiers sont disponibles dans l'archive associée au manuscrit.

ANNEXE 15 : SIMULATIONS D'IMAGES POUR L'ANALYSE DE LA VISIBILITÉ DE L'ACCÈS AU PUIITS (LASCAUX)

Reproduction sans saturation des figures produites avec *Phanie* dans le Sous-chapitre 3.2.D. *L'accès au Puits*, du Chapitre 3.1 *La grotte de Cussac*, présentant l'influence de l'éclairage sur l'accès au Puits.

Pour observer ces images, il est nécessaire de disposer d'un écran calibré, et que les images soient affichées en plein écran. L'observateur doit être plongé dans un environnement non éclairé depuis au moins 20 min avant de réaliser des observations, afin que ses yeux soient habitués à l'obscurité.

Les fichiers sont disponibles dans l'archive associée au manuscrit.

ANNEXE 16 : AURALISATIONS POUR L'ACCÈS AU PUIITS (LASCAUX)

Simulations d'un son ponctuel dans le modèle 3D de l'Abside et du Puits de la grotte de Lascaux, reconstitué selon la morphologie présumée de la grotte en 1940 (au moment de sa découverte).

Les fichiers sont disponibles dans l'archive associée au manuscrit.

Table des Figures

Figure 1 : Relevé des taureaux du plafond de la grotte d'Altamira par M. Sanz de Sautuola (op. cit.).	12
Figure 2 : Entrée actuelle de la grotte de Cussac (CC-BY-SA-C. Lamaison).	36
Figure 3 : Situation géographique de la grotte de Cussac (doc. Géoportail.gouv, modifié).	36
Figure 4 : Plan topographique résumé de la grotte de Cussac (topographie H. Camus et coll. Protée, DAO Archéosphère).	37
Figure 5 : Profil d'une section de la galerie de la grotte – Panneau des Animaux Affrontés (coupe H. Camus, modifié).	39
Figure 6 : Sélection de quelques motifs de la grotte de Cussac. a : Grand Bison du Grand Panneau (cl. N. Aujoulat), b : bison et cheval du Panneau des Animaux Affrontés (cl. N. Aujoulat), c : Petit Mammouth du Panneau du Bouquetin (cl. N. Aujoulat), d : Panneau des Trois Points Noirs (cl. M. Peyroux), e : figure féminine du Panneau des Figures Féminines (cl. V. Feruglio, C. Bourdier), f : Panneau des Fusiformes (cl. V. Feruglio), g : Panneau de la Tête à l'Œil Ovale (cl. V. Feruglio), h : tête de l'Oie du Panneau de l'Oie (cl. V. Feruglio).	43
Figure 7 : Emprise des modèles 3D réalisés par Perazio Engineering « Perazio », Patrimonio e Industria « Patrimonio » et Archéovision Production. (Fond topographique Camus et coll. Protée).	45
Figure 8 : Situation géographique de la grotte de Lascaux (doc. Géoportail.gouv, modifié).	46
Figure 9 : Formes des coupoles, voûtes et parois à Lascaux, exemple de la Salle des Taureaux (3D Perazio Engineering 2012).	47
Figure 10 : Plan topographique de la grotte de Lascaux, d'après doc. N. Aujoulat, fond topographique C. Bassier.	48
Figure 11 : Sélection de quelques entités graphiques de la grotte de Lascaux. a : Cheval flottant (Salle des Taureaux), b : la Licorne (Salle des Taureaux), c : Cheval Chinois (Diverticule Axial), d : Bisons Adossés (Nef), e : Scène du Puits (Puits), f : chevaux affrontés (Cabinet des Félines), g : la Vache Noire (Nef), h : Frise des Cerfs (Nef), 3D Perazio Engineering 2012.	51
Figure 12 : Entrée de la grotte de Leye (cl. D. Lacanette).	54
Figure 13 : Situation géographique de la grotte de Leye (doc. Géoportail.gouv, modifié).	55
Figure 14 : Grotte de Leye (d'après le fond topographique C. Ferrier, D. Large, D. Lacanette).	55
Figure 15 : Profil de la grotte de Leye d'après le modèle 3D Perazio Engineering.	56
Figure 16 : Prise de vue depuis l'entrée de la Salle du Trône, a : Modélisation 3D à partir d'un relevé laser (Perazio Engineering), b : reproduction photogrammétrique (Archeovision Production), c : prise de vue photographique (Cl. S. Konik).	58
Figure 17 : Entrée de la petite carrière de Lugasson (cl. C. Verdet).	59
Figure 18 : Situation géographique de la carrière de Lugasson (doc. Géoportail.gouv, modifié).	59
Figure 19 : Topographie de la première galerie de Lugasson avec en gris la partie accessible (topographie C. Verdet, Verdet, 2019).	60
Figure 20 : Production de feux dans le cadre du projet CarMoThaP (Salmon, 2019).	61
Figure 21 : Plan topographique (topographie C. Verdet, Verdet, 2019) et modèle 3D (P. Mora, Archéovision Production) des deux galeries de la première carrière et modèle texturé de la galerie 2 (a, P. Mora, Archéovision).	62
Figure 22 : Répartition des numérisations de secteurs réalisées jusqu'à présent de la Branche Aval de la grotte de Cussac (d'après un plan topographique H. Camus et coll., Protée, 2010-2011).	74
Figure 23 : Vue latérale du modèle 3D de Lascaux inscrit dans le massif, (Perazio Engineering).	75
Figure 24 : Directivité du flux lumineux pour une lampe à graisse (à gauche), une torche en bois (au centre) et une torche électrique moderne (à droite).	84
Figure 25 : Longueurs d'ondes et spectre de la lumière visible en nanomètres (modifié d'après Elias et Lafait dir., 2006).	85
Figure 26 : Spectres émis par quelques sources naturelles ou artificielles modernes. Modifié d'après Zanier et Delahaye, 2019.	85
Figure 27 : Couleur perçue d'un objet selon un éclairage blanc à gauche, et rouge à droite.	86

<i>Figure 28 : Schéma représentant l'intensité, le flux, l'éclairement et la luminance produite par une lampe à graisse.</i>	87
<i>Figure 29 : Schéma simplifié de l'œil humain, d'après Elias et Lafait dir., 2006.</i>	88
<i>Figure 30 : Illustration de la correction du signal RVB à l'aide du spectre.</i>	91
<i>Figure 31 : Étapes de fonctionnement général du logiciel Phanie (S. Carré, CSTB).</i>	93
<i>Figure 32 : Simulation de la présence d'une torche dans le Passage (Lascaux) à l'aide de la méthode par illumination élémentaire. Saturation : 10 000, aucun correctif appliqué.</i>	94
<i>Figure 33 : Simulation de la présence d'une torche dans le Passage (Lascaux) à l'aide de la méthode par suivi de chemin. Saturation : 10 000, aucun correctif appliqué.</i>	95
<i>Figure 34 : Simulation de la présence d'une torche dans le Passage (Lascaux) à l'aide de la méthode par lancer de photons. Saturation : 10 000, aucun correctif appliqué.</i>	96
<i>Figure 35 : Simulation de la présence d'une torche dans le Passage (Lascaux) à l'aide de la méthode de radiosités. Saturation : 10 000, aucun correctif appliqué.</i>	97
<i>Figure 36 : Comparaison des résultats des simulations photoréalistes de la présence d'une torche dans le Passage de Lascaux selon les différentes méthodes de calcul.</i>	98
<i>Figure 37 : Banc de mesure des propriétés de réflexion de surfaces du CSTB de Nantes (cl. S. Carré).</i>	103
<i>Figure 38 : Échantillon calcaire de Lascaux.</i>	104
<i>Figure 39 : Échantillon calcaire de Cussac.</i>	104
<i>Figure 40 : Échantillons calcaires de Leye.</i>	104
<i>Figure 41 : Échantillon de sédiment argileux de Cussac.</i>	104
<i>Figure 42 : Échantillon de sédiment argileux de Veysou.</i>	104
<i>Figure 43 : Échantillon de calcite de Coudoulous.</i>	105
<i>Figure 44 : Localisation des mesures de spectre sur des surfaces de Cussac, près du Panneau de la Découverte.</i>	107
<i>Figure 45 : Faciès-types des surfaces mesurées.</i>	107
<i>Figure 46 : Correspondance entre les numéros de mesure et le type de matériau.</i>	108
<i>Figure 47 : Petite galerie, installation du spectroradiomètre (cl. D. Lacanette).</i>	109
<i>Figure 48 : Mesure sur le réflecteur parfait (cl. D. Lacanette).</i>	109
<i>Figure 49 : Localisation des mesures de spectres réalisées sur les parois de la carrière de Lugasson (cl. D. Lacanette).</i>	110
<i>Figure 50 : à gauche, lampe façonnée en grès à cuvette fermée (© Musée national de Préhistoire). Au centre, plaquette de calcaire naturellement concave potentiellement utilisée comme lampe (© Musée national de Préhistoire). À droite, ensemble de pierres creuses et potentielles lampes issues de la mission Glory 1957-1958 (d'après Delluc et Delluc, 1979a).</i>	119
<i>Figure 51 : a) lampe plate (cl. L. Ledoux), b) lampe retournée (cl. M. Peyroux).</i>	120
<i>Figure 52 : Galets utilisés lors de la taille des lampes (cl. A. Jouteau).</i>	123
<i>Figure 53 : Mèche de lichen en boule (à gauche, cl. A. Jouteau, C. Ferrier) et lichen naturel (à droite, cl. B. Dupont).</i>	124
<i>Figure 54 : Mèche de mousse (cl. C. Ferrier).</i>	124
<i>Figure 55 : Amadou naturel (en haut à droite), en coupe (en bas) et en morceau pour servir de mèche (en haut à gauche).</i>	125
<i>Figure 56 : a) braise refroidie (charbon) de pin sylvestre (cl. A. Jouteau, C. Ferrier), b) pin sylvestre (cl. A. Jouteau).</i>	125
<i>Figure 57 : a) braise refroidie (charbon) de châtaignier (cl. A. Jouteau, C. Ferrier), b) châtaignier naturel (cl. Darkone).</i>	126
<i>Figure 58 : a) Morceau de pin maritime ayant servi de mèche (cl. A. Jouteau, C. Ferrier), b) tronc de pin maritime mort (cl. J. C. Leblanc).</i>	126
<i>Figure 59 : Morceau d'épiphyse de bœuf carbonisée (cl. A. Jouteau, C. Ferrier).</i>	127
<i>Figure 60 : Découpe de graisse de bœuf à l'aide d'un éclat de silex, (à gauche, cl. C. Ferrier) et de graisse de cheval avec un couteau (à droite, cl. A. Jouteau).</i>	128
<i>Figure 61 : Ensemble des lampes creusées (cl. A. Jouteau).</i>	129

Figure 62 : Lampe n°1 après 5 minutes (a), 20 minutes (b), 30 minutes (c) et 90 minutes (d) de taille (cl. A. Jouteau).....	130
Figure 63 : Mise en place de la graisse dans la cuvette (a), Brins enflammés mis à proximité (b et c), mèche placée dans l'huile fondue (d), inflammation de la mèche (e) et mèche fonctionnelle alimentée en graisse (f), cl. A. Jouteau.....	132
Figure 64 : Hauteurs maximales des flammes produites par différentes mèches naturelles (cl. A. Jouteau, C. Ferrier).....	134
Figure 65 : Influence de la taille et de la forme de la mèche sur la production de flamme.....	137
Figure 66 : Graisses et mèches utilisées lors de la comparaison des différentes graisses (cl. A. Jouteau).....	138
Figure 67 : Exemples de résidus charbonneux découverts à Cussac. a) Charbon situé au sol, à l'aplomb d'un mouchage en paroi, prélevé en janvier 2013 par l'équipe TrAc's. b) Mouchage de torche avec résidus charbonneux suspendus (cl. N. Fourment). c) Trace charbonneuse sur bloc calcaire (cl. M. Peyroux). d) Mouchage sur stalagmite (cl. F. Maksud).....	143
Figure 68 : a) Pin sylvestre (cl. A. Jouteau), b) nœud riche en résine (cl. J. C. Leblanc), c) tas de branches utilisées pour les expérimentations (cl. J. C. Leblanc).....	145
Figure 69 : a) Baies et épines de genévrier, b) Buisson de genévrier, c) branche dont les épines ont été consommées par des herbivores (cl. ; A. Jouteau, L. Jouteau).....	146
Figure 70 : Exemple de torche réalisée avec des branches en pin sylvestre (cl. C. Ferrier).....	147
Figure 71 : En haut : port d'une lampe à graisse (composée de graisse de cheval et d'une mèche en amadou) de nuit en extérieur, cl. P. Mora. En bas : déplacement dans la carrière à l'aide d'une torche en pin sylvestre, cl. C. Ferrier.....	155
Figure 72 : a) Salle éclairée par des lampes à graisse (cl. A. Jouteau), b) Salle éclairée par une torche (cl. A. Jouteau), c) Mouchage de torche expérimental (cl. C. Ferrier), d) Mouchage de torche sur un bloc calcaire à Cussac (cl. M. Peyroux).....	157
Figure 73 : Fragments de charbons produits lors de la combustion complète d'une torche expérimentale.....	160
Figure 74 : Matériel utilisé lors des mesures. De gauche à droite : Spectroradiomètre Konica Minolta CS-2000 (cl. P. Mora), Diffuseur parfait (cl. P. Mora), Luxmètre Chauvin Arnoux 1110.....	161
Figure 75 : Schéma et photographie de l'installation du matériel fixe pour les mesures (cl. P. Mora).....	163
Figure 76 : Influence du vent sur la flamme d'une même lampe à graisse (cl. P. Mora).....	163
Figure 77 : Schéma et photographie du luxmètre mobile lors des mesures sur les lampes (cl. P. Mora).....	165
Figure 78 : Schéma et photographie de l'organisation des luxmètres fixes et mobiles lors des mesures sur les torches (cl. P. Mora).....	166
Figure 79 : Éclairage des torches en fonction de la position du luxmètre dans l'espace.....	170
Figure 80 : Mise en évidence des valeurs extrêmes dues à la réalisation d'un mouchage ou à l'occultation du luxmètre par exemple.....	172
Figure 81 : Diagramme de chromaticité des lampes à graisse.....	176
Figure 82 : Localisation des spectres des lampes à graisse sur le diagramme de chromaticité CIE xy.....	177
Figure 83 : Diagramme de chromaticité des torches.....	179
Figure 84 : Comparaison de la localisation des spectres des torches et des lampes à graisse sur le diagramme de chromaticité CIE x,y.....	179
Figure 85 : Comparaison d'une même scène simulée à l'aide d'un éclairage de type torche préhistorique avec un spectre de réflexion des surface différent : a) entrée de la Salle du Panneau de la Découverte, paroi Gauche, spectre sans calcite ; b) entrée de la Salle du Panneau de la Découverte, paroi Gauche, spectre complet ; c) vue sur le Panneau de la Découverte depuis l'amont, spectre sans calcite ; d) vue sur le Panneau de la Découverte depuis l'amont, spectre complet.....	184
Figure 86 : Comparaison d'une même scène simulée à l'aide d'un éclairage de type torche préhistorique avec un spectre de réflexion des surfaces différent : a) entrée du Passage, spectre avec une extrapolation en forme de pente ; b) entrée du Passage, spectre avec une extrapolation stable ; c) Salle des Taureaux, extrapolation en forme de pente ; d) Salle des Taureaux, extrapolation stable.....	186
Figure 87 : Extrait de la Salle des Taureaux éclairée par six spectres différents, correspondants aux spectres moyens des six lampes à graisses enregistrées.....	188

<i>Figure 88 : Extrait de la Salle des Taureaux éclairée par quatre spectres différents, correspondants aux spectres moyens des quatre torches mesurées.</i>	189
<i>Figure 89 : Valeurs d'éclairement intégrées dans Phanie pour caractériser les lampes à graisse.</i>	191
<i>Figure 90 : Valeurs d'éclairement des torches intégrées dans Phanie.</i>	192
<i>Figure 91 : Schéma de la diffusion, de la réflexion et de l'absorption d'une onde au contact avec un objet, Calvet, 2019.</i>	196
<i>Figure 92 : Schéma des organes de l'audition chez l'humain, d'après Turrier, 2015.</i>	199
<i>Figure 93 : Schéma d'une réponse impulsionnelle basée sur la RI de la Salle Froide de la grotte de Leye (24).</i> .	201
<i>Figure 94 : Schéma d'une réponse impulsionnelle mesurée dans la Salle Froide de grotte de Leye avec réflexions précoces et réflexions tardives et diffuses.</i>	204
<i>Figure 95 : Étapes de fonctionnement du logiciel Icare.</i>	205
<i>Figure 96 : Chambre anéchoïque du Laboratoire national de métrologie et d'essais (Paris ; J.-P. Roche)</i>	208
<i>Figure 97 : Schéma du dispositif utilisé, dit tube de Kundt, T. Blinet et A. Jouteau</i>	211
<i>Figure 98 : Carottage en cours d'un échantillon du site de Cussac (CSTB).</i>	212
<i>Figure 99 : Éprouvettes issus des échantillons de Lascaux (CSTB).</i>	212
<i>Figure 100 : Éprouvettes issus des échantillons de Cussac (CSTB).</i>	213
<i>Figure 101 : Éprouvettes issus des échantillons de Leye (CSTB).</i>	213
<i>Figure 102 : Tentatives de carottage d'échantillons dans de la calcite (CSTB).</i>	214
<i>Figure 103 : Éprouvettes issus du bloc d'argile (CSTB).</i>	214
<i>Figure 104 : Exemple de T20 et T30 sur une RI enregistrée à Cussac, près du Panneau de la Tête à l'Œil Ovalaire (première campagne de mesures).</i>	219
<i>Figure 105 : Enceinte Jabra Solemate et webcam Logitech HD C270 (cl. A Jouteau).</i>	220
<i>Figure 106 : Localisation des secteurs où des mesures de réponse impulsionnelle ont été réalisées (d'après le fond topographique C. Ferrier, D. Large, D. Lacanette)</i>	221
<i>Figure 107 : Organisation des instruments de mesure dans la Salle du Trône (cl. A Jouteau).</i>	222
<i>Figure 108 : Localisation des secteurs des mesures réalisées lors de la première campagne, © Dao F. Lacrampe-Cuyaubère (d'apr. relevés terrain H. Camus & coll./Protée et Durif-Delluc-Massoulier/Spéléo-club de Périgueux), PCR Cussac/Mc.</i>	223
<i>Figure 109 : Localisation des secteurs des mesures réalisées lors de la seconde campagne, © Dao F. Lacrampe-Cuyaubère (d'apr. relevés terrain H. Camus & coll./Protée et Durif-Delluc-Massoulier/Spéléo-club de Périgueux), PCR Cussac/Mc.</i>	224
<i>Figure 110 : Organisation des instruments de mesure au niveau du Panneau du Mammouth Isolé (4D3), cl. D. Lacanette.</i>	225
<i>Figure 111 : Fiche d'identité des mesures de réponse impulsionnelle numéros 2 et 6 réalisées à Leye.</i>	226
<i>Figure 112 : Réponses impulsionnelles des mesures n° 27, 28 et 29 réalisées lors de la première campagne de mesures.</i>	229
<i>Figure 113 : Comparaison de quelques Réponses Impulsionnelles mesurées aux mêmes localités lors de la première et de la seconde campagne de mesures.</i>	230
<i>Figure 114 : Plan de la cavité, avec localisation des locus à restes humains et zones graphiques.</i>	257
<i>Figure 115 : Évolution du creusement d'une galerie, exemple de la section du Panneau des Animaux Affrontés (doc. H. Camus, Protée, modifié).</i>	260
<i>Figure 116 : Coupe topographique de l'éboulis d'entrée de la grotte. Tronçon intérieur extrait par X. Muth à partir des données lasergrammétriques (Scanner Patrimonio e Industria), tronçon extérieur levé par tachéométrique (X. Muth et H. Camus), DAO F. Lacrampe-Cuyaubère.</i>	263
<i>Figure 117 : Plan du secteur modélisé. a : vue sur le Panneau de la Découverte, cl. V. Feruglio, C. Bourdier/MC, b : Panneau du Pont d'Argile à gauche, la Mezzanine à droite, cl. V. Feruglio, C. Bourdier, M. Delluc/MC, c : le méandre inférieur 5Av, cl. V. Feruglio, A. Jouteau/MC, d : localisation du By-pass et de la piste des ours, modèle 3D Perazio. Fond topographique de précision, doc. H. Camus, Hypogée</i>	269
<i>Figure 118 : Localisation des traces d'activités en amont du Panneau de la Découverte. Carte topographique H. Camus (Protée), cl. V. Feruglio, C. Bourdier/MC.</i>	273
<i>Figure 119 : Localisation des traces d'activité autour du Panneau du Pont d'argile. Carte topographique H. Camus (Protée), cl. a : V. Feruglio, C. Bourdier, M. Delluc/MC, cl. b : V. Feruglio, M. Delluc/MC</i>	274

<i>Figure 120 : Localisation des traces d'activités dans le méandre inférieur 5Av. Carte topographique H. Camus (Protée), cl. V. Feruglio, A. Jouteau/MC.</i>	<i>275</i>
<i>Figure 121 : Localisation des traces d'activité près des locus 1 et 2, du By-pass et de la piste des ours. Carte topographique H. Camus (Protée), modèle 3D Perazio engineering.....</i>	<i>276</i>
<i>Figure 122 : Panneau de la Découverte observé depuis l'entrée amont de la Salle éponyme et éclairé depuis l'aval par une lampe frontale moderne (cl. V. Feruglio, C. Bourdier /MC.</i>	<i>278</i>
<i>Figure 123 : Simulation numérique réalisée en amont de l'entonnoir, près de l'entrée de la salle du Panneau de la Découverte, avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. Distance entre la caméra et le bloc central d'environ 7 m. À gauche : simulation d'éclairage avec une torche de type 3, saturation de 10 000, à droite : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 1B, saturation de 30 000.</i>	<i>279</i>
<i>Figure 124 : Simulation numérique réalisée en amont du bloc central, avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. Distance entre la caméra et le bloc central d'environ 5 m. À gauche : simulation d'éclairage avec une torche de type 3, saturation de 10 000, à droite : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 1B, saturation de 30 000.....</i>	<i>280</i>
<i>Figure 125 : Simulation numérique réalisée depuis le haut de la voie menant au Panneau de la Découverte, avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. Distance entre la caméra et la paroi opposée d'environ 6,5 m. À gauche : simulation d'éclairage avec une torche de type 3, saturation de 10 000, à droite : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 1B, saturation de 30 000.</i>	<i>280</i>
<i>Figure 126 : Simulations numériques d'un éclairage avec une torche de type 3 et une saturation de 10 000, réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio. a) Simulation réalisée avec la méthode de suivi de chemin avec cache, vue depuis l'entrée de la salle du Panneau de la Découverte, b) Simulation réalisée avec la méthode de suivi de chemin avec cache, vue sur le Panneau de la Découverte, c) Simulation réalisée avec le modèle d'illumination élémentaire, vue sur l'ensemble de la salle du Panneau de la Découverte, d) Simulation réalisée avec le modèle d'illumination élémentaire, vue sur la localisation du dispositif d'éclairage.</i>	<i>281</i>
<i>Figure 127 : Simulations numériques d'un éclairage avec une lampe de type 1B et une saturation de 10 000, réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio. a) Simulation réalisée avec la méthode de suivi de chemin avec cache, vue depuis l'entrée de la salle du Panneau de la Découverte, b) Simulation réalisée avec la méthode de suivi de chemin avec cache, vue sur le Panneau de la Découverte, c) Simulation réalisée avec le modèle d'illumination élémentaire, vue sur l'ensemble de la salle du Panneau de la Découverte, d) Simulation réalisée avec le modèle d'illumination élémentaire, vue sur la localisation du dispositif d'éclairage.</i>	<i>282</i>
<i>Figure 128 : Simulation numérique avec vue sur le Panneau du Pont d'Argile, réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. Distance entre la caméra et le panneau d'environ 7 m. À gauche : simulation d'éclairage avec une torche de type 3, saturation de 10 000, à droite : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 1B, saturation de 30 000.</i>	<i>283</i>
<i>Figure 129 : Simulations numériques d'un éclairage avec une torche de type 3 et une saturation de 10 000, réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. a) Vue depuis l'entrée de la salle du Panneau de la Découverte, b) Vue sur le Panneau de la Découverte, c) Vue sur l'ensemble de la salle du Panneau de la Découverte, d) Vue sur la localisation du dispositif d'éclairage.</i>	<i>284</i>
<i>Figure 130 : Simulations numériques d'un éclairage avec une lampe de type 1B et une saturation de 30 000, réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. a) Vue depuis l'entrée de la salle du Panneau de la Découverte, b) Vue sur le Panneau de la Découverte, c) Vue sur l'ensemble de la salle du Panneau de la Découverte, d) Vue sur la localisation du dispositif d'éclairage.</i>	<i>285</i>
<i>Figure 131 : Simulations numériques réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. Simulation d'éclairage à l'aide d'une torche de type 3 et d'une saturation de 10 000 (a, b, c) et d'une lampe à graisse de type 1B associée à une saturation de 30 000 (a', b', c'). a et a' : vue sur le sol en contrebas, b et b' : vue vers la droite, en direction du Locus 1, luminaire porté</i>	

à droite de la caméra, c et c' : vue vers la droite, en direction du Locus 1, luminaire porté à gauche de la caméra.	286
Figure 132 : Simulation numérique réalisée au pied de la descente du Panneau du Pont d'argile, avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. Distance entre la caméra et la stalagmite de gauche d'environ 3 m. À gauche : simulation d'éclairage avec une torche de type 3, saturation de 10 000, à droite : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 1B, saturation de 30 000.	287
Figure 133 : Simulation numérique réalisée en amont de la galerie menant au Locus 1, avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. Distance entre la caméra et le relief en paroi gauche d'environ 2,50 m. À gauche : simulation d'éclairage avec une torche de type 3, saturation de 10 000, à droite : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 1B, saturation de 30 000.	288
Figure 134 : Simulation numérique réalisée en amont du Locus 1, près de la paroi gauche, avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. Distance entre la caméra et le bloc basculé d'environ 4 m. À gauche : simulation d'éclairage avec une torche de type 3, saturation de 10 000, à droite : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 1B, saturation de 30 000.	288
Figure 135 : Simulation numérique réalisée à la bifurcation entre la piste des ours, vers la gauche, et le By-pass, vers la droite, avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. Distance entre la caméra et le bord proximal du Locus 2 d'environ 3 m. À gauche : simulation d'éclairage avec une torche de type 3, saturation de 10 000, à droite : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 1B, saturation de 30 000.	289
Figure 136 : Lien entre le nombre de bonnes réponses et l'entraînement auditif.	297
Figure 137 : Lien entre le nombre de bonnes réponses et pratique de la spéléologie.	298
Figure 138 : Sur 10 000 générations de données aléatoires, répartition de la moyenne du nombre d'observateurs ayant correctement reconnu un son.	299
Figure 139 : Panneau de la Découverte. La surface éclairée correspond à la surface gravée. Photographie © V. Feruglio, C. Bourdier, PCR Cussac/MC.	301
Figure 140 : Aires de visibilité vérifiées et hypothétiques du Panneau de la Découverte, modifié d'après Jouteau et al., 2019.	302
Figure 141 : Simulations numériques du champ de visibilité du Panneau de la Découverte (délimité par les traits blancs) par éclairage direct à l'aide d'une torche de type 3 (puissance moyenne). Simulations numériques réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire et d'une saturation de 10 000.	304
Figure 142 : Simulations numériques du champ de visibilité du Panneau de la Découverte (délimité par les traits blancs) par éclairage direct à l'aide d'une lampe à graisse de type 1B (puissance la plus élevée des lampes à graisse). Simulations numériques réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire et d'une saturation de 30 000.	305
Figure 143 : Simulations numériques du champ de visibilité du Panneau de la Découverte par éclairage indirect à l'aide d'une torche de type 3 (puissance moyenne). Simulations numériques réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire et d'une saturation de 10 000.	307
Figure 144 : Simulations numériques du champ de visibilité du Panneau de la Découverte par éclairage indirect à l'aide d'une lampe à graisse de type 1B (puissance la plus élevée des lampes à graisse). Simulations numériques réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire et d'une saturation de 30 000.	308
Figure 145 : Simulations numériques du champ de visibilité du Panneau de la Découverte par éclairage indirect à l'aide de trois lampe à graisse de type 1B (puissance la plus élevée des lampes à graisse) posées au sol sur le bloc sous-jacent au Panneau de la Découverte. Simulations numériques réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire et d'une saturation de 30 000.	309

<i>Figure 146 : Visibilité du Panneau de la Découverte par un éventuel graveur, selon trois hypothèses d'éclairage. Simulations numériques réalisées avec le logiciel Phanie et le modèle numérique Perazio, à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire. Simulations d'une torche portée ou posée au sol (torche de type 3, avec une saturation de 10 000), ou de trois lampes à graisse posées au sol sous le Panneau de la Découverte (lampes de type 1B, avec une saturation de 30 000).</i>	312
<i>Figure 147 : Sectorisation de la Branche Aval en fonction des caractéristiques acoustiques constatées par I. Reznikoff, © Dao F. Lacrampe-Cuyaubère (d'apr. relevés terrain H. Camus & coll./Protée et Durif-Delluc-Massoulier/Spéléo-club de Périgueux), PCR Cussac/Mc.</i>	316
<i>Figure 148 : Localisation des mesures de réponses impulsionnelles, © Dao F. Lacrampe-Cuyaubère (d'apr. relevés terrain H. Camus & coll./Protée et Durif-Delluc-Massoulier/Spéléo-club de Périgueux), PCR Cussac/Mc.</i>	319
<i>Figure 149 : TR optimal de différents secteurs de Cussac.</i>	320
<i>Figure 150 : D50 des différents secteurs de Cussac.</i>	322
<i>Figure 151 : C80 des différents secteurs de Cussac.</i>	323
<i>Figure 152 : Localisation des sources et récepteurs virtuels des quatre simulations.</i>	329
<i>Figure 153 : TR optimaux simulés pour quatre secteurs du modèle 3D.</i>	330
<i>Figure 154 : Boîtes à moustache des mesures de TR issues des simulations avec celles enregistrées sur le terrain dans le même secteur.</i>	331
<i>Figure 155 : D50 simulés pour quatre secteurs du modèle 3D.</i>	332
<i>Figure 156 : C80 simulés pour quatre secteurs du modèle 3D.</i>	332
<i>Figure 157 : Comparaison des mesures de C80 issues des simulations avec celles enregistrées sur le terrain dans le même secteur et celles issues des secteurs les plus propices à la musique.</i>	333
<i>Figure 158 : Plan topographique de la grotte de Lascaux, d'après doc. N. Aujoulat, fond topographique C. Bassier.</i>	345
<i>Figure 159 : Évolution de l'entrée : Premier agrandissement en 1940 (photographie en haut à droite ; Ph. M. Larivière/CNP), Travaux d'aménagement pour l'accueil du public en 1947 (photographie de gauche ; © D.R.), et état actuel de l'entrée (photographie en bas à droite : O. Huard/Centre National de la Préhistoire/Ministère de la Culture).</i>	347
<i>Figure 160 : Évolution de l'aspect du secteur d'entrée de la grotte de Lascaux avec un éclairage omnidirectionnel de couleur blanche situé depuis l'intérieur de la cavité. a) Coupe de l'entrée actuelle (Ministère de la Culture/Centre National de la Préhistoire) ; a') Vue de l'entrée actuelle depuis la Salle des Taureaux dans le modèle 3D (Perazio engineering, 2012) ; b) Coupe d'une hypothèse de l'entrée en 1940 (Ministère de la Culture/Centre National de la Préhistoire) ; b') Reconstitution de l'entrée lors de la découverte, vue depuis la Salle des Taureaux dans le modèle 3D (projet MicroPaGO, d'après 3D Perazio engineering, 2012) ; c) Coupe d'une hypothèse de l'état de l'entrée Paléolithique (Ministère de la Culture/Centre National de la Préhistoire) ; c') Hypothèse de reconstitution de l'entrée Paléolithique, vue depuis la Salle des Taureaux dans le modèle 3D (projet MicroPaGO, d'après 3D Perazio engineering, 2012).</i>	348
<i>Figure 161 : Différents états de la Salle des Taureaux, depuis l'entrée de la salle.</i>	350
<i>Figure 162 : Différents états du Diverticule Axial, depuis l'entrée de la galerie.</i>	351
<i>Figure 163 : L'entrée du Passage vue de la Salle des Taureaux, en 1940 (photographie et légende d'après Leroi-Gourhan, 1979b, in Leroi-Gourhan et Allain dir., 1979, p. 56).</i>	352
<i>Figure 164 : L'entrée du Passage a été creusé et tout l'avant dégagé pour l'escalier (photographie et légende d'après Leroi-Gourhan, 1979b, in Leroi-Gourhan et Allain dir., 1979, p. 56).</i>	353
<i>Figure 165 : Passage, vue depuis l'entrée nord. Photographie du haut : état actuel (N. Aujoulat/Centre National de la Préhistoire/Ministère de la Culture) et image du bas : restitution de l'époque de la découverte par l'équipe MicroPaGO (projet MicroPaGO, d'après 3D Perazio engineering, 2012).</i>	354
<i>Figure 166 : La Nef, vue depuis la sortie du Passage. En haut, photographie de l'état actuel (N. Aujoulat/Centre National de la Préhistoire/Ministère de la Culture). En bas, proposition de restitution de la morphologie de la découverte (projet MicroPaGO, d'après 3D Perazio engineering, 2012).</i>	355
<i>Figure 167 : Différents états de l'Abside, vues, depuis la Nef.</i>	356
<i>Figure 168 : Puits, morphologie actuelle en haut (Perazio engineering, 2012) et proposition de restitution de la morphologie de 1940 (projet MicroPaGO, d'après 3D Perazio engineering, 2012).</i>	358

<i>Figure 169 : Panneau des Chevaux Chinois – Vache Rouge à Tête noire et Troisième Cheval Chinois, prise de vue de la simulation avec un éclairage blanc (modèle 3D Perazio Engineering, 2012).</i>	363
<i>Figure 170 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Diverticule Axial Perazio Engineering, modifié par l'équipe MicroPaGO : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 3A (à gauche) ou de type 1B (à droite) sur la Vache Rouge à Tête Noire et le Troisième Cheval Chinois. Distance entre la caméra et la paroi d'environ 1,70 m. Saturation de 30 000.</i>	364
<i>Figure 171 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Diverticule Axial Perazio Engineering, modifié par l'équipe MicroPaGO : simulation d'éclairage avec les torches de types 2, 3 et 4 sur la Vache Rouge à Tête Noire et le Troisième Cheval Chinois. Distance entre la caméra et la paroi d'environ 1,70 m. Saturation de 10 000.</i> .	365
<i>Figure 172 : Panneau de la Vache Tombant – Vache Rouge et Noire et frise de petits chevaux, prise de vue de la simulation avec un éclairage blanc (modèle 3D Perazio, 2012).</i>	366
<i>Figure 173 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Diverticule Axial Perazio, modifié par l'équipe MicroPaGO : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 3A (à gauche) ou de type 1B (à droite) sur la Vache Tombant et la frise de petits chevaux. Distance entre la caméra et la paroi d'environ 2 m. Saturation de 30 000.</i>	367
<i>Figure 174 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Diverticule Axial Perazio Engineering, modifié par l'équipe MicroPaGO : simulation d'éclairage avec les torches de types 2, 3 et 4 sur la Vache Tombant et la frise de petits chevaux. Distance entre la caméra et la paroi d'environ 2 m. Saturation de 10 000.</i>	368
<i>Figure 175 : Panneau de la Vache Tombant – diptyque des Bouquetins Affrontés, prise de vue de la simulation avec un éclairage blanc (modèle 3D Perazio, 2012).</i>	369
<i>Figure 176 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Diverticule Axial Perazio, modifié par l'équipe MicroPaGO : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 3A (à gauche) ou de type 1B (à droite) sur le diptyque des Bouquetins Affrontés. Distance entre la caméra et la paroi d'environ 2,50 m. Saturation de 30 000.</i>	370
<i>Figure 177 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Diverticule Axial Perazio, modifié par l'équipe MicroPaGO : simulation d'éclairage avec les torches de types 2, 3 et 4 sur le diptyque des Bouquetins Affrontés. Distance entre la caméra et la paroi d'environ 2,50 m. Saturation de 10 000.</i>	371
<i>Figure 178 : Panneau du Grand Taureau Noir – détail du Grand Taureau, accompagné d'une Vache rouge et de quatre protomés d'Aurochs Jaunes, prise de vue de la simulation avec un éclairage blanc (modèle 3D Perazio, 2012).</i>	372
<i>Figure 179 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Diverticule Axial Perazio Engineering, modifié par l'équipe MicroPaGO : simulation d'éclairage avec une lampe à graisse de type 3A (à gauche) ou de type 1B (à droite) sur le Grand Taureau Noir, accompagné d'une Vache Rouge et de quatre Protomés d'Aurochs Jaunes. Distance entre la caméra et la paroi d'environ 1,20 m. Saturation de 30 000.</i>	373
<i>Figure 180 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Diverticule Axial Perazio Engineering, modifié par l'équipe MicroPaGO : simulation d'éclairage avec les torches de types 2, 3 et 4 sur le Grand Taureau Noir, accompagné d'une Vache Rouge et de quatre Protomés d'Aurochs Jaunes. Distance entre la caméra et la paroi d'environ 1,20 m. Saturation de 10 000.</i>	374
<i>Figure 181 : Emplacement des simulations indiqué par une croix sur le sol de la découverte, en haut, vue de profil de l'Abside et de la Grande Diaclase, en bas, vue depuis l'intérieur du modèle 3D (projet MicroPaGO, Archéovision Production, d'après Perazio engineering, 2012). a) extrémité distale de l'Abside, b) entrée du passage bas qui mène au Puits, c) bord du décrochement qui mène au Puits.</i>	379
<i>Figure 182 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique de l'Abside Perazio, modifié par l'équipe MicroPaGO,</i>	

Archéovision Production (modification du niveau du sol, présenté ici par une surface unie marron). a) simulation d'éclairage avec une lampe de type 3A, saturation de 30 000, b) simulation d'éclairage avec une lampe de type 1B, saturation de 30 000, c) simulation d'éclairage avec une torche de type 2, saturation de 10 000, d) simulation d'éclairage avec une torche de type 4, saturation de 10 000, les images d'origine sont disponibles en Annexe 15.....	380
Figure 183 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique de l'Abside et du Puits d'après Perazio, modifié par l'équipe MicroPaGO, Archéovision Production, a) simulation d'éclairage avec une lampe de type 3A, saturation de 30 000, b) simulation d'éclairage avec une lampe de type 1B, saturation de 30 000, c) simulation d'éclairage avec une torche de type 2, saturation de 10 000, d) simulation d'éclairage avec une torche de type 4, saturation de 10 000, les images d'origine sont disponibles en Annexe 15.....	382
Figure 184 : Simulation numérique à partir de la méthode de calcul du modèle d'illumination élémentaire réalisée avec le logiciel Phanie et le modèle numérique du Puits d'après Perazio, modifié par l'équipe MicroPaGO, Archéovision Production. a) simulation d'éclairage avec une lampe de type 3A, saturation de 30 000, b) simulation d'éclairage avec une lampe de type 1B, saturation de 30 000, c) simulation d'éclairage avec une torche de type 2, saturation de 10 000, d) simulation d'éclairage avec une torche de type 4, saturation de 10 000, les images d'origine sont disponibles en Annexe 15.....	383
Figure 185 : Localisation des simulations numériques acoustiques dans Lascaux permettant de comparer les caractéristiques acoustiques de la grotte selon différentes morphologies (d'après doc. N. Aujoulat, fond topographique C. Bassier).	387
Figure 186 : Localisation des simulations numériques acoustiques dans Lascaux (d'après doc. N. Aujoulat, fond topographique C. Bassier).	393
Figure 187 : Boite à moustache des TR optimaux simulés dans neuf localités de la grotte de Lascaux (modèle Perazio Engineering, 2012, retravaillé par le projet MicroPaGO).	394
Figure 188 : Boite à moustache du C80 simulé dans neuf localités de la grotte de Lascaux (modèle Perazio Engineering, 2012, retravaillé par le projet MicroPaGO).	395
Figure 189 : Boite à moustache du D50 simulé dans neuf localités de la grotte de Lascaux (modèle Perazio Engineering, 2012, retravaillé par le projet MicroPaGO).	397
Figure 190 : QR-code permettant l'accès à la reconstitution de l'accès au Panneau de la Découverte depuis un smartphone (Réalisation Sarah Feruglio/CÉGO/Nouvelle-Aquitaine/MC).	421
Figure 194 : Torche numéro T9, cl. C. Ferrier et A. Jouteau.....	468
Figure 195 : Torche numéro T10, cl. C. Ferrier et A. Jouteau.....	468
Figure 196 : Torche numéro T11, cl. C. Ferrier et A. Jouteau.....	469
Figure 194 : Blocs de la colline de Lascaux dont sont issus les échantillons mesurés (cl. J.-C. Portais).	471
Figure 195 : Lascaux, échantillon n°1, cl. A. Jouteau.....	472
Figure 196 : Lascaux, échantillon n°2, cl. A. Jouteau.....	472
Figure 197 : Lascaux, échantillon n°3, cl. A. Jouteau.....	473
Figure 198 : Lascaux, échantillon n°4, cl. A. Jouteau.....	473
Figure 199 : Lascaux, de gauche à droite échantillons n°5, 3 et 6, cl. A. Jouteau.	473
Figure 200 : Cussac, bloc n°1, cl. A. Jouteau.....	474
Figure 201 : Cussac, bloc n°2, cl. A. Jouteau.....	474
Figure 202 : Cussac, bloc n°3, cl. A. Jouteau.....	475
Figure 203 : Cussac, bloc n°4, cl. A. Jouteau.....	475
Figure 204 : Leye, bloc n°1, cl. A. Jouteau.	476
Figure 205 : Leye, bloc n°2, cl. A. Jouteau.	476
Figure 206 : Leye, bloc n°3, cl. A. Jouteau.	477
Figure 207 : Leye, bloc n°4, cl. A. Jouteau.	477
Figure 208 : Calcite du site de Coudoulous, bloc n°1, cl. A. Jouteau.....	478
Figure 209 : Calcite du site de Coudoulous, bloc n°2, cl. A. Jouteau.....	478
Figure 210 : Calcite du site de Coudoulous, bloc n°5, cl. A. Jouteau.....	479
Figure 211 : Calcite du site de Coudoulous, bloc n°4, cl. A. Jouteau.....	479
Figure 212 : Bloc d'argile de la grotte de Veyssou utilisé pour les mesures au tube de Kundt, cl. A. Jouteau. ...	480

Figure 213 : Fiche d'identité des mesures de réponse impulsionnelle 1 à 6 réalisées à Leye..... 486
Figure 214 : Fiche d'identité des mesures de réponse impulsionnelle 7 à 12 réalisées à Leye..... 487

Liste des Graphiques

<i>Graphique 1 : Réflectance des échantillons (Mesure S. Carré, CSTB Nantes).....</i>	<i>111</i>
<i>Graphique 2 : Réflectance des échantillons humidifiés (Mesure S. Carré, CSTB Nantes).....</i>	<i>112</i>
<i>Graphique 3 : Réflectance d'une sélection de parois de Cussac (Mesure D. Lafon-Pham).....</i>	<i>113</i>
<i>Graphique 4 : Réflectance d'une sélection de parois de Lugasson (Mesure S. Konik).....</i>	<i>114</i>
<i>Graphique 5 : Mesures de réflectance sur des calcaires lités du site de Cussac (mesures S. Carré, CSTB Nantes et D. Lafon-Pham).....</i>	<i>116</i>
<i>Graphique 6 : Production de lumière (en lux ou en hauteur de flamme) en fonction de la nature et du diamètre des brins.</i>	<i>148</i>
<i>Graphique 7 : Durée de la combustion en fonction de la nature et du diamètre des brins.</i>	<i>148</i>
<i>Graphique 8 : Production de lumière (en hauteur de flamme) en fonction de la nature et du diamètre des brins dans des torches composées de quatre brins.....</i>	<i>150</i>
<i>Graphique 9 : Durée de la combustion en fonction de la nature et du diamètre des brins dans des torches composées de quatre brins.</i>	<i>150</i>
<i>Graphique 10 : Comparaison de l'éclairement de torches constituées de diverses proportions de brins en pin sylvestre et/ou genévrier.....</i>	<i>151</i>
<i>Graphique 11 : Relation entre diamètre d'une torche et hauteur de la flamme produite.</i>	<i>152</i>
<i>Graphique 12 : Évolution de l'éclairement produit par des lampes à graisse différentes en fonction de l'angle de la mesure.....</i>	<i>167</i>
<i>Graphique 13 : Moyenne glissée de l'éclairement de la lampe 1C en fonction du temps.</i>	<i>168</i>
<i>Graphique 14 : Éclairement à un moment donné autour et au pied des torches.....</i>	<i>171</i>
<i>Graphique 15 : Moyenne glissante de l'éclairement de la source à un mètre de distance.</i>	<i>173</i>
<i>Graphique 16 : Spectres de réflexion des lampes à graisse mesurés via un réflecteur parfait.</i>	<i>175</i>
<i>Graphique 17 : Spectres de réflexion des torches mesurés via un réflecteur parfait.</i>	<i>178</i>
<i>Graphique 18 : Moyennes des spectres enregistrés dans Cussac, intégrant ou non les mesures réalisées sur de la calcite.</i>	<i>183</i>
<i>Graphique 19 : Spectre intégré dans Phanie lors des simulations dans le modèle 3D de la grotte de Cussac.</i>	<i>184</i>
<i>Graphique 20 : Extrapolation de la réflectance entre 380 et 425 nm selon deux hypothèses.</i>	<i>185</i>
<i>Graphique 21 : Spectre intégré dans Phanie lors des simulations dans le modèle 3D de la grotte de Lascaux. .</i>	<i>187</i>
<i>Graphique 22 : Courbe audiométrique de la perte auditive moyenne en fonction de l'âge et des fréquences. D'après Guinchard et al., 2017.....</i>	<i>200</i>
<i>Graphique 23 : Mesures d'absorption moyennes au tube de Kundt des éprouvettes de calcaires de Lascaux, Cussac, Leye et d'argile.</i>	<i>216</i>
<i>Graphique 24 : Comparaison du coefficient d'absorption des matériaux calcaires et de l'argile avec des matériaux réverbérants : marbre et béton (données issues du site : http://www.acouphile.fr/materiaux.html).</i>	<i>217</i>
<i>Graphique 25 : Comparaison du coefficient d'absorption des matériaux calcaires et de l'argile avec des matériaux réverbérants : marbre et béton et des matériaux absorbants : moquette épaisse et tissu en coton (données issues du site : http://www.acouphile.fr/materiaux.html).....</i>	<i>218</i>
<i>Graphique 26 : Coefficient de régression des T20 et T30 des mesures de la grotte de Leye.</i>	<i>227</i>
<i>Graphique 27 : Évolution di T30 pour chaque mesure entre 250 et 4 000 Hertz.</i>	<i>228</i>
<i>Graphique 28 : Évolution, pour chaque mesure, du T30 par tiers d'octave, hors mesures supérieures à 5 secondes.....</i>	<i>228</i>
<i>Graphique 29 : Coefficient de régression des mesures réalisées lors de la première campagne de mesures.</i>	<i>231</i>
<i>Graphique 30 : Coefficient de régression des mesures de la Branche Aval réalisées lors de la seconde campagne de mesures.</i>	<i>231</i>
<i>Graphique 31 : Coefficient de régression des mesures de la Branche Amont réalisées lors de la seconde campagne de mesures.</i>	<i>232</i>

<i>Graphique 32 : Évolution, pour les mesures n°5 à n°14 de la première campagne de mesures réalisées à Cussac, du T30 en fonction des tiers d’octave, hors mesures supérieures à 5 secondes.....</i>	<i>235</i>
<i>Graphique 33 : Évolution, pour les mesures n°5 à n°14 de la seconde campagne de mesures réalisées à Cussac, du T30 en fonction des tiers d’octave, hors mesures supérieures à 5 secondes.....</i>	<i>236</i>
<i>Graphique 34 : Comparaison des Temps de Réverbération moyens obtenus sur le terrain et par les simulations à partir des coefficients d’absorptions mesurés au tube de Kundt.</i>	<i>240</i>
<i>Graphique 35 : Comparaison des Temps de Réverbération moyen obtenus in situ et par les simulations</i>	<i>241</i>
<i>Graphique 36 : Comparaison des coefficients d’absorption optimaux et des échantillons de Leye et de Cussac.</i>	<i>242</i>
<i>Graphique 37 : Comparaison de la médiane des D50 obtenus par la mesure de réponses impulsionnelles sur le terrain avec celle des D50 obtenus par les simulations numériques réalisées avec Icare.</i>	<i>327</i>
<i>Graphique 38 : Comparaison de la médiane des C80 obtenus par la mesure de réponses impulsionnelles sur le terrain avec celle des D50 obtenus par les simulations numériques réalisées avec Icare.</i>	<i>328</i>
<i>Graphique 39 : Comparaison du TR moyen simulé dans différents modèles 3D de la grotte de Lascaux : état actuel (modèle Perazio Engineering, 2012), de la découverte et lors de la fréquentation Paléolithique (modèle Perazio Engineering, Archeovision Production 2012, projet MicroPaGO).</i>	<i>388</i>
<i>Graphique 40 : Comparaison du C80 moyen simulé dans différents modèles 3D de la grotte de Lascaux : état actuel (modèle Perazio Engineering, 2012), de la découverte et lors de la fréquentation Paléolithique (modèle Perazio Engineering, Archeovision Production 2012, projet MicroPaGO).</i>	<i>389</i>
<i>Graphique 41 : Comparaison du D50 moyen simulé dans différents modèles 3D de la grotte de Lascaux : état actuel (modèle Perazio Engineering, 2012), de la découverte et lors de la fréquentation Paléolithique (modèle Perazio Engineering, Archeovision Production 2012, projet MicroPaGO).</i>	<i>390</i>
<i>Graphique 42 : Absorption en incidence normale α_n des mesures sur les échantillons de calcaire de Lascaux (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).</i>	<i>481</i>
<i>Graphique 43 : Absorption en incidence normale α_n des mesures sur les échantillons de calcaire de Cussac (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).</i>	<i>483</i>
<i>Graphique 44 : Absorption en incidence normale α_n des mesures sur les échantillons de calcaire de Leye (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).</i>	<i>484</i>
<i>Graphique 45 : Absorption en incidence normale α_n des mesures sur les échantillons d’argile (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).</i>	<i>485</i>

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Définition des termes permettant de décrire les manifestations graphiques à Cussac et à Lascaux.	72
Tableau 2 : Taux d'humidité des échantillons après mise en contact avec de l'eau pendant 24h.	103
Tableau 3 : Efficacité de quelques graisses testées dans des lampes à graisse. +++ : Excellent qualité, + : bonne qualité, - : qualité moyenne, --- : très mauvaise qualité.	121
Tableau 4 : Efficacité de quelques mèches testées dans des lampes à graisse. +++ : Excellent qualité, + : bonne qualité, - : qualité moyenne, --- : très mauvaise qualité.	122
Tableau 5 : Description des lampes fabriquées.	129
Tableau 6 : Hauteurs de flamme et durée de la combustion pour chaque mèche.	133
Tableau 7 : Reproduction des quatre mèches ayant donné les flammes les plus hautes.	134
Tableau 8 : Hauteur maximale de flamme produite et durée de la combustion en fonction de la nature et des dimensions de la mèche utilisée.	136
Tableau 9 : Hauteur de flamme et durée de la combustion en fonction de la graisse et de la mèche utilisées.	139
Tableau 10 : Liste des lampes mesurées et de leurs composants.	164
Tableau 11 : Liste des torches mesurées, de leurs composants, leurs dimensions et de celles de leurs brins.	164
Tableau 12 : Valeur « moyenne » de l'éclairement obtenu pour chaque lampe à graisse.	167
Tableau 13 : Mesures d'éclairement des torches à différents moments de leur combustion, depuis quatre localisations.	170
Tableau 14 : Valeurs d'éclairement à un moment donné autour et au pied des torches.	171
Tableau 15 : Éclairement moyen, minimal et maximal des quatre torches à un mètre de distance.	173
Tableau 16 : Exemples du niveau de quelques ambiances sonores à proximité immédiate de la source (Calvet, 2019, Turrier, 2015).	198
Tableau 17 : Pourcentage d'absorption moyen au tube de Kundt (CSTB).	215
Tableau 18 : Numéro et localisation des mesures effectuées dans la grotte de Leye.	221
Tableau 19 : Nom et numéro des mesures réalisées lors de la première campagne de mesures à Cussac.	223
Tableau 20 : Nom et numéro des mesures réalisées lors de la seconde campagne.	224
Tableau 21 : T30 de quelques mesures de 50 à 10 000 Hertz de la première campagne de mesures. Les cases grisées correspondent à une absence de données, les mesures « aberrantes » sont en orange.	234
Tableau 22 : T30 de quelques mesures de 50 à 10 000 Hertz de la seconde campagne de mesures. Les cases grisées correspondent à une absence de données, les mesures « aberrantes » sont en orange.	234
Tableau 23 : Coefficient d'absorption moyen d'échantillons de calcaires issus des grottes de Cussac et de Leye.	239
Tableau 24 : Coefficients d'absorption extrapolés entre 5000 et 10 000 Hz.	239
Tableau 25 : Coefficients d'absorption optimaux permettant aux simulations de proposer une restitution au plus proche du réel.	241
Tableau 26 : Pratique de la spéléologie, entraînement musical et nombre de bonnes réponses par participant.	296
Tableau 27 : Nombre de bonnes associations entre espaces et sons.	296
Tableau 28 : Nombre de bonnes réponses par participant.	298
Tableau 29 : Temps de réverbération courants de quelques espaces modernes.	321
Tableau 30 : Production de lumière et durée de l'éclairage d'une torche composée d'un brin de pin sylvestre en fonction du diamètre de ce dernier.	465
Tableau 31 : Production de lumière et durée de l'éclairage d'une torche composée d'un brin de genévrier en fonction du diamètre de ce dernier.	466
Tableau 32 : Hauteur de flamme et durée de l'éclairage de torches constituées de 4 brins en fonction de la nature et de la dimension des brins.	467
Tableau 33 : Hauteur de flamme, éclairement et durée de l'éclairage de torches constituées de 8 brins en fonction de la nature et de la dimension des brins et de la circonférence de la torche.	467

<i>Tableau 34 : Absorption en incidence normale α_n de chaque face de chaque éprouvette des échantillons de calcaire de Lascaux – première partie (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).....</i>	<i>482</i>
<i>Tableau 35 : Absorption en incidence normale α_n de chaque face de chaque éprouvette des échantillons de calcaire de Lascaux – deuxième partie (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).....</i>	<i>482</i>
<i>Tableau 36 : Absorption en incidence normale α_n de chaque face de chaque éprouvette des échantillons de calcaire de Cussac (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).</i>	<i>483</i>
<i>Tableau 37 : Absorption en incidence normale α_n de chaque face de chaque éprouvette des échantillons de calcaire de Leye (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).</i>	<i>484</i>
<i>Tableau 38 : Absorption en incidence normale α_n de chaque face de chaque éprouvette des échantillons de calcaire d'argile (T. Blinet, CSTB Marne-la-Vallée).....</i>	<i>485</i>
<i>Tableau 39 : T30 de la première campagne de mesures réalisée à Cussac de 50 à 10 000 Hertz, première partie. Les cases grisées correspondent à une absence de données, les mesures « aberrantes » sont en orange.....</i>	<i>488</i>
<i>Tableau 40 : T30 de la première campagne de mesures réalisée à Cussac de 50 à 10 000 Hertz, deuxième partie. Les cases grisées correspondent à une absence de données, les mesures « aberrantes » sont en orange.....</i>	<i>489</i>
<i>Tableau 41 : T30 de la seconde campagne de mesures réalisée à Cussac de 50 à 10 000 Hertz, première partie. Les cases grisées correspondent à une absence de données, les mesures « aberrantes » sont en orange.....</i>	<i>490</i>
<i>Tableau 42 : T30 de la seconde campagne de mesures réalisée à Cussac de 50 à 10 000 Hertz, deuxième partie. Les cases grisées correspondent à une absence de données, les mesures « aberrantes » sont en orange.....</i>	<i>491</i>
<i>Tableau 43 : T30 de la seconde campagne de mesures réalisée à Cussac de 50 à 10 000 Hertz, troisième partie. Les cases grisées correspondent à une absence de données, les mesures « aberrantes » sont en orange.....</i>	<i>492</i>
<i>Tableau 44 : Résultats de chaque participant à l'expérience.</i>	<i>497</i>

Résumé

Les grottes ornées sont des espaces naturels extrêmement stables qui ont nécessairement contraint les Préhistoriques à sélectionner et/ou adapter leurs activités souterraines aux caractéristiques du site élu. Comprendre la perception qu'ils avaient dudit site devient alors un élément clé pour en interpréter l'occupation paléolithique. Les simulations numériques sont apparues comme l'outil idéal pour investir la question de la perception paléolithique des cavités ornées. En effet, non seulement ils permettent de reproduire des phénomènes qui ne se conservent pas, tels le son ou la lumière, mais ils produisent, à partir de données entièrement calibrées, des résultats reproductibles. Il est aussi possible d'utiliser des modèles 3D reconstituant la morphologie considérée comme celle connue par les Paléolithiques, pourtant physiquement perdue depuis.

Nous nous sommes intéressés aux modalités de l'investissement du monde souterrain par les Hommes du Paléolithique au travers de deux exemples : les grottes ornées de Cussac et de Lascaux (Dordogne), aux contextes archéologiques complémentaires. À Cussac, nous ne bénéficions que d'une portion du modèle 3D et celui-ci reproduit uniquement la morphologie actuelle, mais la présence d'une équipe pluridisciplinaire (PCR Cussac, dir. J. Jaubert) et l'attention portée à sa préservation ont permis d'obtenir des données sur le contexte archéologique. À l'opposé, la grotte de Lascaux a vu une grande partie de ses sols détruits, rendant impossible la contextualisation de nombre de ses vestiges. Cependant, la grotte bénéficie d'une reconstitution 3D complète, retravaillée pour proposer plusieurs états : actuel, de la découverte (en 1940), et lors des incursions paléolithiques (projet MicroPaGO, dir. D. Lacanette).

Afin d'analyser l'appréhension du milieu souterrain par les Préhistoriques, nous avons choisi de mettre en place des outils de simulations numériques d'acoustique et d'éclairage. Encore peu utilisés dans l'analyse du contexte karstique, ces outils ont nécessité une approche fondamentalement innovante et rigoureuse avec l'enregistrement d'un maximum de paramètres physiques pour chacune des grottes étudiées. Des expérimentations ont été réalisées afin de reproduire des exemples d'éclairages préhistoriques et d'en mesurer les spectres et éclairagements, tandis que pour connaître les facteurs de réflexion des parois et les coefficients d'absorption acoustique des matériaux en jeu, des mesures sur échantillons, et/ou dans des grottes ont été mises en place.

Ces paramètres ont ensuite été intégrés aux logiciels *Phanie* et *Icare*, permettant respectivement de simuler des éclairages et des sons dans un modèle 3D. Nous avons ainsi pu, par exemple, éprouver la complémentarité entre les lampes à graisse et les torches selon les situations : à Cussac, l'exploration de vastes espaces a pu davantage bénéficier de la forte puissance et de la mobilité des torches tandis qu'à Lascaux, où les parois sont plus réfléchissantes et les espaces moins étendus, l'utilisation de lampes à graisse semble plus efficace. Il a également été possible de montrer l'intérêt de l'écholocation dans ce contexte, ou encore d'analyser les qualités acoustiques de la grotte de Cussac qui semble être un lieu particulièrement adapté à la parole, avec une faible réverbérance mais une excellente intelligibilité. Ces quelques exemples, non exhaustifs, nous ont permis de valider l'intérêt des simulations numériques dans la compréhension de la perception, de l'appréhension et de l'occupation de l'espace souterrain par les sociétés préhistoriques.

Mots clés : Grottes ornées paléolithiques, Dispositif pariétal, Écholocation, Acoustique, Éclairage, Simulations numériques

Abstract

Decorated caves are extremely stable environments that have required Prehistoric People to select and/or to adapt their underground activities to the characteristics of the chosen site. Understanding their perception of the site then becomes a key element in interpreting its Palaeolithic occupation. Numerical simulations have emerged as the ideal tool to explore the question of the Palaeolithic perception of decorated caves. In fact, not only do they make it possible to reproduce phenomena that could not have been preserved, such as sound or light, but they also produce reproducible results from fully calibrated data. It is also possible to use 3D models reproducing a morphology considered to represent the one known by the Palaeolithic, although physically long lost.

We decided to investigate the ways in which Palaeolithic People invested the subterranean world in the decorated caves of Cussac and Lascaux (Dordogne), whose archaeological contexts are complementary. In Cussac cave, we only have a portion of the 3D model, and it only reproduces the current morphology, but the presence of a multidisciplinary team (PCR Cussac, dir. J. Jaubert) and the attention paid to its preservation have enabled us to obtain data for the archaeological context, while the Lascaux cave has seen a large part of its grounds destroyed, making it impossible to contextualise many of its artefacts. However, the cave benefits from a complete 3D reconstruction, reworked to offer several states: current, of the discovery (in 1940), and during the Palaeolithic incursions (MicroPaGO project, dir. D. Lacanette).

In order to analyse how the Prehistoric People understood the underground environment, we have chosen to set up numerical simulation tools for acoustics and lighting. These tools, still little used in the analysis of the karstic context, required a fundamentally innovative and rigorous approach with the recording of a maximum of physical parameters for each of the caves. Experiments were carried out in order to reproduce examples of prehistoric lighting and to measure its spectra and illuminances. To find out the wall reflection factors or the acoustic absorption coefficient of the materials involved, measurements on samples and/or in caves were carried out.

These parameters were incorporated into *Phanie* and *Icare*, two software which enable the simulation of lighting and sound in a 3D model, respectively. For example, we were able to test the complementarity between grease lamps and torches depending on the situation: in Cussac, the exploration of large spaces benefited more from the high power and mobility of the torches, while in Lascaux, where the walls are more reflective and the spaces are smaller, the use of grease lamps seemed more efficient. It was also possible to show the interest of echolocation in this context, or to analyse the acoustic qualities of the Cussac cave which seems to be a place particularly suited to speech, with low reverberation but excellent intelligibility. Without any claim of exhaustivity, these examples have enabled us to validate the interest of numerical simulations in understanding the perception, apprehension and occupation of underground space by prehistoric societies.

Keywords: Palaeolithic decorated caves, Parietal arrangement, Echolocation, Acoustic, Lighting, Numerical simulations