

La simulation numérique révèle que la hauteur du son obtenu lorsque tous les trous de l'instrument ont été débouchés est proche de celle obtenue tous trous bouchés lorsque l'on joue sur le second régime (donc environ une octave au-dessus de la note la plus grave). Ainsi, du point de vue des hauteurs, le second régime prend directement la suite du premier, comme pour les instruments modernes (voir la figure 2).

Une seconde simulation, effectuée en prenant en compte la totalité du cubitus *a priori* utilisable, prouve que, dans ce cas, les tessitures des deux régimes ne se rejoignent plus. Le facteur de cette flûte a donc délibérément coupé l'os pour obtenir la continuité mélodique de l'instrument. Pourquoi l'aurait-il fait, sinon pour faciliter le jeu de mélodies ? La facture des flûtes est déjà bien maîtrisée dans cette région pyrénéenne durant le Paléolithique supérieur : les flûtes droites ont peu changé depuis.

Une autre flûte d'Isturitz, à laquelle manque l'embouchure, présente aussi quatre trous. La distance entre le premier trou et la sorte de pavillon correspondant à l'élargissement naturel plus ou moins tronconique de la partie proximale du cubitus est plus grande que sur l'exemplaire quasi complet. La partie tubulaire utilisable entre le dernier trou et l'extrémité du côté de l'embouchure était *a priori* d'une dizaine de centimètres de long. La simulation numérique nous révèle que, pour que les deux régimes s'enchaînent parfaitement, l'os a été probablement tronqué à 6,2 centimètres du centre du dernier trou.

À Isturitz, Cro-Magnon a ajusté la longueur de ses flûtes et la position des trous. Il a aussi adapté la perce des trous aux irrégularités internes du tube osseux. Sur la flûte la plus complète, les trous sont plus ou moins ovales : ils ont été obtenus par un raclage à l'outil de silex, qui engendre des bords aigus. La cuvette qui en résulte permet à l'instrumentiste de varier l'obturation des trous en glissant les doigts, et donc de moduler les fréquences produites.

D'autres fragments de flûtes présentent des trous plus petits et dont l'espacement est très différent de ce que montre l'exemplaire le plus complet. Ces trous, régularisés par rotation d'un outil en pierre, sont de courtes cheminées coniques ou à section arrondie. À partir du Périgordien, certains fragments présentent des trous arrière parfois très éloignés des autres : s'agit-il de trous de registre, dont l'ouverture favorise l'émission du registre supérieur ? Cette variété indique une facture très diversifiée. On trouve enfin, par exemple dans le Magdalénien du Roc de Marcamps, en Gironde, des tubes osseux très courts et munis d'une fenêtre et d'une embouchure rappelant celle des flûtes à bec : ce seraient des embouchures adaptables à un instrument végétal ou, pour certains, plus courts, de simples sifflets.

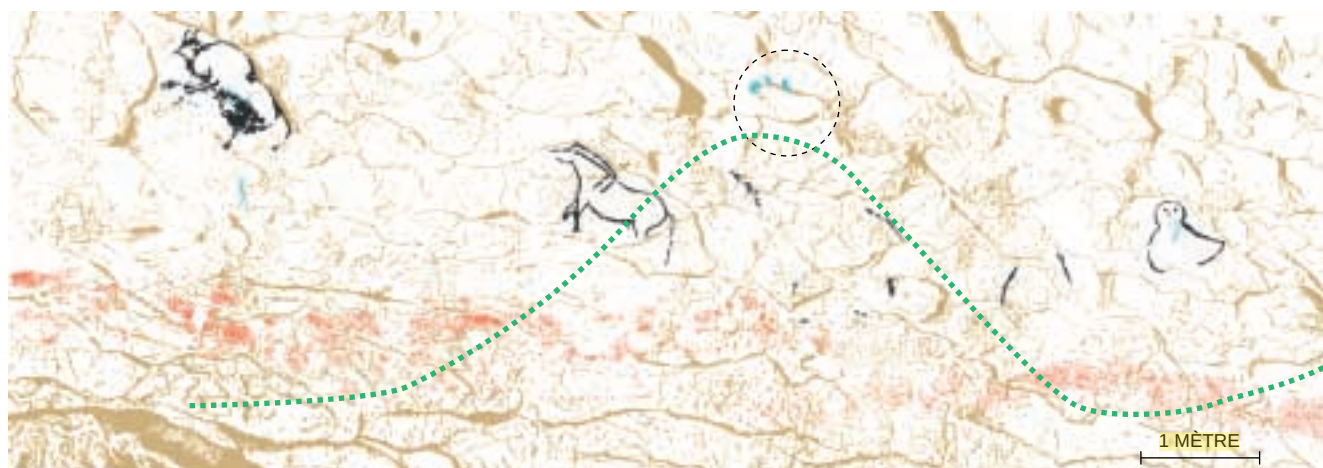
Le son dans les grottes

Nos ancêtres du Paléolithique ont laissé de nombreuses traces de leur passage dans des grottes, lieux naturellement résonnants et qui abritent

des structures de calcite sonores à la percussion. La coïncidence de résonances, caractérisées par nos mesures, avec des marques préhistoriques témoignent qu'ils ont aussi remarqué et utilisé l'acoustique particulière de ces lieux : ils ont en quelque sorte usé des grottes comme d'instruments sonores.

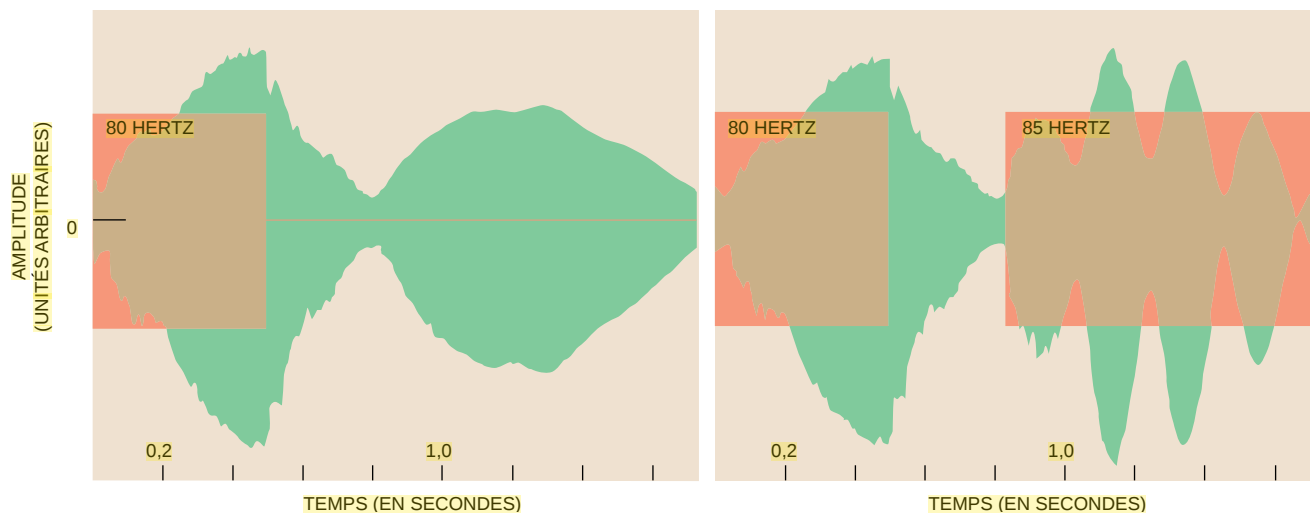
En grotte, où le bruit de fond est extrêmement faible, on perçoit aisément le moindre son. À partir d'emplacements particuliers, la voix chantée ou la simple parole engendrent des phénomènes de résonance, font « sonner la galerie ». Afin de caractériser objectivement ces phénomènes acoustiques, nous avons mesuré systématiquement les réponses aux émissions d'une source sonore de spectre uniforme entre 50 et 300 hertz, couvrant les fréquences fondamentales de la voix masculine et le domaine de résonance des galeries.

La mesure du son reçu au point d'émission caractérise en partie ce qu'un locuteur ou un chanteur entend de sa propre voix. Nous avons aussi cartographié le transfert acoustique entre deux points, en séparant l'émetteur du récepteur. Ce faisant, nous avons placé le haut-parleur et le microphone en tenant compte de la position imposée à l'homme par la morphologie du lieu : ici debout, là baissé, ailleurs accroupi. Nos mesures n'ont bien entendu de sens que si le volume de la galerie est resté inchangé depuis sa fréquentation par Cro-Magnon et si elles sont référencées rigoureusement au plan de la grotte. Ces études paléoa-



3. LA PAROI NORD DE LA GALERIE JEANNEL, dans la grotte du Portel, en Ariège, est ornée de plusieurs dessins noirs et de traits gravés (en bleu). Un maximum de résonance à 95 hertz (courbe verte) correspond au centre de la zone décorée, juste devant une excroissance rocheuse qui forme une tête de félin naturelle (dans le cercle

en pointillés) et qui est rehaussée de pseudo-griffures gravées. En face, sur la paroi Sud, ce maximum de résonance coïncide avec le centre d'un balcon ocré dominant d'un mètre le panneau décoré. Les traces rouges sur le bas de la paroi ont probablement été laissées par le frottement d'individus adossés enduits d'ocre.



4. LA SIMULATION ACOUSTIQUE explique le phénomène de «dialogue» perçu sous deux fortes ponctuations rouges, dans la galerie Régnault de la grotte du Portel, en Ariège. Lorsqu'on émet brièvement un signal à 80 hertz (en rouge, signal envoyé par le haut-parleur), deux résonances aux fréquences proches de cette valeur sont excitées dans la galerie et un battement lent est pro-

duit (à gauche, en vert, signal reçu par le microphone). Lorsqu'on superpose à ce battement lent une nouvelle émission à une fréquence de 85 hertz, le son perçu est alors modulé beaucoup plus rapidement (à droite) : la «réponse» de la galerie est déformée par le nouveau signal et en fonction de celui-ci. Cette légère variation de fréquence est produite naturellement par la voix humaine.

coustiques requièrent donc une sauvegarde absolue de l'espace des cavernes. Les grottes Cosquer et Chauvet, dernièrement découvertes, entrent désormais dans cette perspective.

Les grottes sont constituées de galeries, de salles plus ou moins vastes, d'étroits boyaux, de niches. Comme tout lieu fermé, la galerie d'une grotte présente des caractéristiques acoustiques communes à tout son volume (durée d'extinction des sons, fréquence de résonance) et d'autres spécifiques de l'endroit où l'on se place (amplitude de la résonance). Si une niche possède une fréquence de résonance propre, on détecte cette fréquence dans toute la galerie, mais avec une amplitude plus grande dans ou près de la niche. Lorsqu'une galerie a des parois parallèles, verticales ou non, une résonance apparaît, plus ou moins marquée suivant la configuration de la paroi, à une longueur d'onde double de la largeur du couloir.

Comment savoir si les hommes préhistoriques qui sont venus en ces lieux ont perçu ou utilisé les phénomènes acoustiques que nous détectons ? La correspondance entre des lieux de plus forte résonance acoustique naturelle et des emplacements choisis par les préhistoriques pour peindre, dessiner ou graver figures et signes en est un indice.

De nombreuses peintures ou gravures occupent, bien sûr, des lieux parfaitement muets et, à l'inverse, des lieux

résonnants n'offrent aucune figure. Les singularités de paroi servent souvent de cadre à l'intégration de la figure : un dessin devient relief grâce à l'arrondi d'une fissure ou à une excroissance rocheuse. Nous avons toutefois repéré des associations entre résonances et parois ornées qui ne semblent pas fortuites. Ainsi, dans la grotte du Portel, en Ariège, l'extrémité Ouest de la galerie Jeannel offre un panneau comprenant de droite à gauche une chouette, divers signes, un félin, un cheval, un bison (voir la figure 3). Le maximum de résonance, à 95 hertz, se situe au centre du panneau, juste devant la tête du félin naturel. À droite comme à gauche, c'est-à-dire face à la chouette et au bison, l'amplitude de la résonance maximale, à la même fréquence, est nettement plus faible.

La galerie qui répond

La partie étroite de la galerie Régnault de la même grotte est le siège d'une autre correspondance, entre un phénomène acoustique remarquable et deux ponctuations rouges situées au plafond. Lorsque, placé à croupetons sous ces points, en raison de l'exiguïté des lieux, on y parle (la voix se calant sur la résonance de la galerie), on a l'impression d'engager un curieux dialogue avec la galerie : le son semble revenir, mais transformé.

Nos mesures acoustiques expliquent le phénomène, que nous avons reproduit (voir la figure 4). En cet

endroit, on observe quatre fréquences de résonance très voisines (80, 81, 83, 84 hertz). En envoyant un premier son d'une demi-seconde centré sur 80 hertz, on excite les résonances à 80 et 81 hertz. Le son résultant à la fréquence moyenne des résonances excitées et s'atténue en battant très lentement : son amplitude enfle, puis décroît, puis augmente à nouveau au bout d'une seconde environ, donnant l'impression d'un écho qui serait à la fois très intense et très distant. Puis, pendant la réception de ce pseudo-écho, on émet un son centré sur la fréquence de 85 hertz : les deux sons se mélangent. La différence de fréquence provoque un autre battement, plus rapide (cinq fois par seconde).

Une émission vocale, chantée ou parlée, à une fréquence proche de 80 hertz possède un spectre large de quelques hertz et excite donc plusieurs résonances de la galerie. Si la voix continue à émettre à une hauteur légèrement différente pendant la réception du pseudo-écho, sur le plan perceptif, tout se passe comme si celui-ci était transformé par le nouveau son, d'où la sensation impressionnante de «dialogue», de «réponse variable» de la galerie. La légère variation de la fréquence d'émission, dont le locuteur n'a pas forcément conscience en raison de la fluctuation naturelle de la hauteur de la voix, est à l'origine du phénomène.

Une autre galerie de la même grotte, le Boyau, offre un autre exemple d'association entre des ponctuations sur