

qui perturbe le sommeil. Les nuits sont raccourcies et la fatigue s'accumule.

Les spationautes vivent isolés, dans un espace réduit, sans sortie possible. Durant toute leur mission, ils côtoient un groupe restreint de compagnons qui ont souvent une culture différente de la leur. Cet isolement est parfois cause d'anxiété, d'insomnie, de dépression ou de tension entre les divers membres de l'équipage. Le stress peut perturber les spationautes autant que l'apesanteur, voire davantage. Quelle est la responsabilité respective du stress et de l'apesanteur dans les modifications physiologiques observées par les médecins ? La question est à l'étude.

Enfin, le vol spatial expose les spationautes à des rayonnements ionisants. En orbite terrestre basse et modérément inclinée, un spationaute reçoit dix fois plus de rayonnements qu'à la surface de la Terre. Un séjour d'un an sur la Lune exposerait à une dose encore sept fois supérieure. Les expulsions soudaines de particules par le Soleil, comme celles d'août 1972, libèrent en moins d'une journée une dose jusqu'à 1 000 fois supérieure à la dose annuelle reçue sur la Terre. De tels événements sont heureusement rares, et les véhicules spatiaux sont équipés de chambres protégées contre les rayonnements. Les spationautes s'y réfugient en cas d'alerte.

Le risque de cancer qui découle de l'irradiation par les rayons cosmiques est difficilement quantifiable. Les radiologistes estiment néanmoins qu'avec des protections appropriées et des médications préventives les risques peuvent être ramenés dans des limites acceptables.

Le retour sur la Terre

Lorsque les spationautes retrouvent la Terre et sa gravité, leur corps s'adapte et subit de nouveaux changements. L'organisme retrouve ses capacités initiales après un certain temps : nous savons aujourd'hui que la plupart des systèmes du corps humain s'adaptent de façon réversible, du moins pour les intervalles de temps pour lesquels nous disposons de données.

Une fois au sol, mais aussi pendant la descente, les spationautes ressentent fortement la gravité. C'est un choc : au début, ils ont le sentiment d'être écrasés par trois fois leur poids.



5. CHAQUE JOUR, les spationautes font plusieurs heures d'exercices physiques. On voit ici Terence Henricks s'entraînant à bord de la navette spatiale Atlantis, en 1991. Mario Runco, équipé de capteurs médicaux, attend son tour. Même si ces exercices ralentissent quelquefois l'atrophie des muscles qui, sur la Terre, assurent la station debout, leur efficacité n'est pas encore clairement démontrée.

Lorsqu'ils bougent la tête, les objets environnants semblent être en mouvement, et ils se maintiennent debout avec difficulté, que leurs yeux soient ouverts ou non.

Rien n'indique qu'une personne ayant vécu et travaillé dans l'espace pendant des périodes prolongées ne puisse ensuite retrouver une vie normale sur la Terre : les futurs occupants de la Station spatiale internationale et ceux qui partiront pour des missions interplanétaires peuvent être tranquilles. La Station spatiale internationale, dont l'assemblage commencera en 1999, permettra la poursuite des études de médecine spatiale. Une fois achevée, dans cinq ans, la station disposera d'un espace de travail de près de 1 300 mètres cubes (cinq fois plus que les stations Mir ou Skylab) et embarquera des équipements d'étude de la physiologie humaine. L'Institut américain de recherches biomédicales spatiales

est chargé d'étudier les risques des vols prolongés dans l'espace.

Nombre des changements qui se produisent chez des spationautes pendant les vols dans l'espace ou à leur retour ressemblent à des modifications observées chez des personnes malades sur la Terre. Par exemple, après l'atterrissage, la plupart des spationautes ne supportent plus de rester dix minutes en position debout et immobile ; ils se sentent mal et sont proches de l'évanouissement. Certaines personnes âgées et les malades alités pendant une durée prolongée ressentent ce malaise orthostatique. Comme l'alitement est également accompagné d'une perte musculaire et osseuse, on l'utilise pour simuler les effets du vol spatial lors de l'entraînement des spationautes.

D'autres modifications dues au vieillissement ressemblent à celles qui sont produites par un séjour dans l'espace. Nous avons vu que la perte osseuse au cours d'un vol est analogue à l'ostéoporose. L'immunodéficience, les troubles du sommeil et les troubles de coordination motrice atteignent aussi bien les spationautes que les personnes âgées. Les causes ne sont peut-être pas identiques, mais les similarités sont si frappantes que les centres de recherches spatiales collaborent aujourd'hui avec les laboratoires d'étude du vieillissement. En octobre 1999, ils étudieront les réactions physiologiques de John Glenn, qui fut l'un des premiers spationautes américains, qui repartira pour l'espace.

Ronald WHITE est codirecteur de l'Institut américain de recherches biomédicales et spatiales.

Proceedings of a Conference on Correlations of Aging and Space Effects on Biosystems, sous la direction de R.L. Sprott et C.A. Combs, in *Experimental Gerontology*, vol. 26, n° 2-3, pp. 121-309, 1991.

James R. LACKNER, *Orientation and Movement in Unusual Force Environments*, in *Psychological Science*, vol. 4, n° 3, pp. 134-142, mai 1993.

A.E. NICOGLOSSIAN, C.L. HUNTOON et S.L. POOL, *Space Physiology and Medicine*, troisième édition, Lea & Febiger, 1993.

Applied Physiology in Space, numéro spécial du *Journal of Applied Physiology*, vol. 81, n° 1, pp. 3-207, juillet 1996.

Son et musique au Paléolithique

MICHEL DAUVOIS • XAVIER BOUTILLON • BENOÎT FABRE • MARC-PIERRE VERGE

L'étude de quelques instruments sonores fabriqués par les hommes du Paléolithique et l'exploration acoustique de leurs grottes ornées montrent qu'ils utilisaient des phénomènes acoustiques et jouaient de la musique.

La naissance de l'art est attestée au Paléolithique par les grottes ornées, les gravures et les statuettes de plus de 30 000 ans qui nous sont parvenues. Ces peintres, graveurs et sculpteurs étaient-ils aussi musiciens ?

Malgré le caractère éphémère des productions sonores, quelques témoignages matériels en ont été conservés. Dans les lieux qu'ils ont habités, les hommes du Paléolithique ont laissé des instruments émetteurs de signal, telles les phalanges sifflantes, ou de musique, comme la flûte. Nous avons « joué » ces instruments, ou des répliques à l'identique, et nous avons réalisé des simulations numériques afin de retrouver les sons produits par nos ancêtres et de comprendre leurs choix acoustiques.

L'intensité, la dynamique et le rythme, constituant en grande partie la musique, ne peuvent être abordés qu'au travers d'observations ethnographiques ou d'expérimentations. Ainsi, la connaissance, la pratique du chant, d'un instrument comme la flûte permettent de se rapprocher des moyens de nos ancêtres : la voix, l'oreille, le souffle, le doigté, le mouvement. Nos mesures physiques, limitées à la description objective de la fréquence et, parfois, du timbre, suffisent toutefois à prouver que les hommes du Paléolithique possédaient déjà certaines connaissances acoustiques.

Par ailleurs, les hommes de Cro-Magnon ont remarqué des particularités sonores des grottes qu'ils ont ornées. Certaines sont indiquées par des signes picturaux ou coïncident avec des œuvres pariétales, qui prennent un sens grâce à nos mesures acoustiques.

Les phalanges de renne sifflantes

Parmi les nombreux ossements, reliefs alimentaires des hommes du Paléolithique, Néandertaliens ou Cro-Magnons, on trouve quelques phalanges de renne percées qui font d'excellents sifflets, produisant un son clair et puissant. Ces phalanges portent toujours l'empreinte de morsures animales, que recoupent des traces de boucherie. Les plus anciennes ont environ 100 000 ans, et la tradition a perduré jusqu'à l'aube du XX^e siècle, par exemple chez les Indiens du Mackenzie, au Nord-Ouest du Canada.

Les phalanges sifflantes du Paléolithique témoignent de relations étroites entre l'homme et des car-

nassiers, notamment le loup. Cet animal paraît avoir été le commensal de l'homme bien avant de devenir son compagnon.

Quand un groupe de loups chasse à courre un cervidé, l'animal de tête tente de mordre les pattes arrière, le flanc et, d'un bond, de heurter brutalement de l'épaule l'animal poursuivi pour le faire trébucher. La mise à mort se fait alors en évitant les redoutables sabots aux bords tranchants. Quand une meute a tué une proie, elle s'acharne volontiers, afin d'en consommer jusqu'au moindre lambeau de chair. De la sorte, les os portent de graves lésions et sont éventuellement troués.

Les Néandertaliens et les Cro-Magnons, dépeçant des carcasses de rennes ainsi tués et plus ou moins dévorés par des loups, ont récupéré des phalanges mordues et trouées par les carnassiers. Après désarticulation et décarnisation, le trou est régularisé, éventuellement agrandi, la moelle occupant la cavité est extraite : le sifflet est prêt.

Une telle transformation requiert que le trou occupe une position précise, sur la face postérieure de la première phalange, proche de l'épiphyse supérieure (l'extrémité renflée de l'os). Quand cette zone est mordue par un loup, l'os peut y être troué alors qu'il ne porte autour que des traces profondes de morsures, à cause de la morphologie dentaire spécifique à cet animal et de la structure des phalanges de renne : elles sont naturellement creuses, et la paroi osseuse est moins épaisse à cet endroit. Quelques rares secondes phalanges de renne, possédant les mêmes caractéristiques,



1. LES PHALANGES DE RENNE SIFFLANTES sont les plus anciens instruments sonores. Ces instruments, dont le trou était percé par des carnivores (à gauche, on observe des traces de morsures sur une phalange aurignacienne, d'environ 30 000 ans avant notre ère, trouvée à la Croze à Gondran, en Dordogne), ne sifflent fortement que lorsque le trou est agrandi et régularisé par l'homme (à droite, phalange solutréenne, de 18 000 ans avant notre ère, de Laugerie-Haute, en Dordogne).

ont, de la même façon, été transformées en sifflets.

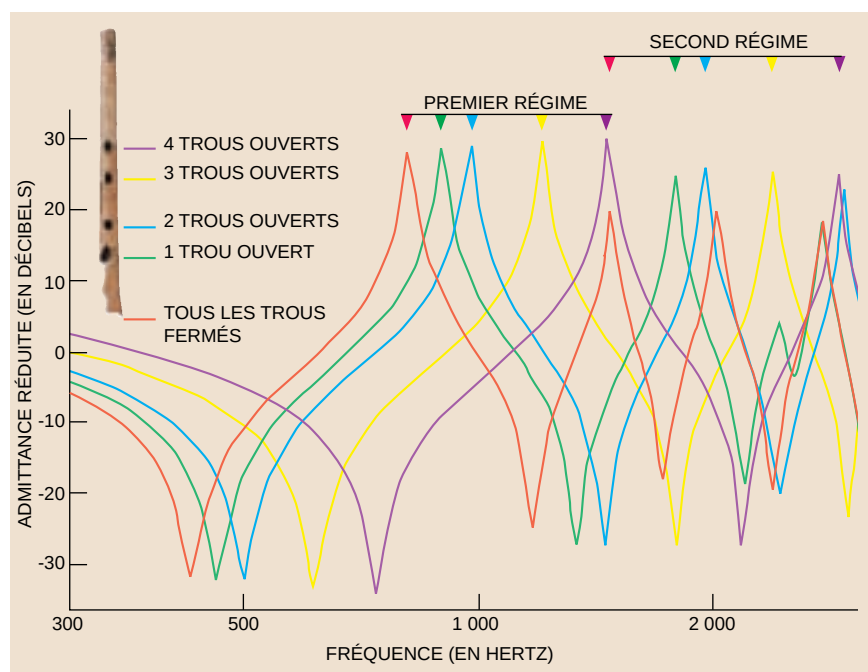
Cet «instrument à vent», pour primitif qu'il soit, présente un bon compromis entre les impératifs anatomiques et physiologiques de l'instrumentiste et un jeu potentiellement varié. La surface de l'épiphyse supérieure de la première phalange est en effet divisée par une dépression centrale dont le prolongement sur la face supérieure forme un canal qui facilite le positionnement correct des lèvres de l'instrumentiste et donne un confort de jeu en favorisant l'orientation du jet d'air vers l'arête du trou (l'air contenu dans la phalange est excité par l'insufflation d'un filet d'air qui oscille sur le bord du trou servant de biseau).

La plus basse fréquence de résonance d'un volume ouvert sur l'extérieur par un trou résulte de la compression périodique de l'air qui y est contenu : cette résonance ne faisant pas intervenir de propagation d'onde interne est connue sous le nom de résonance de Helmholtz. Des résonances associées à la propagation

d'ondes longitudinales dans la cavité allongée apparaissent à des fréquences plus élevées : ce sont les modes de résonance de l'embryon de tuyau que constitue la phalange. À fréquence encore plus élevée, une résonance transversale apparaît. La position des lèvres et la pression du souffle déterminent quelle résonance est excitée préférentiellement et permettent d'en moduler la fréquence : par exemple, celle-ci diminue lorsque l'on approche les lèvres du trou. On peut aussi souffler latéralement à la phalange, comme dans une flûte traversière, ou par le nez.

En soufflant dans des phalanges archéologiques ou dans des répliques, on produit des sons variés en hauteur, en intensité et en modes de jeu : sifflement continu, roulements, modulations... L'écart entre les sons obtenus avoisinent parfois l'octave.

L'analyse des sons fait apparaître deux composantes principales : la composante purement harmonique et le bruit de souffle, associé à la turbulence. Ce bruit à large bande est modulé par les diverses résonances



2. CETTE FLÛTE EN OS (à droite, vue sous trois côtés ; la longueur réelle est de 21 centimètres), découverte à Isturitz, dans les Pyrénées-Atlantiques, a été fabriquée par Cro-Magnon au Périgordien, environ 25 000 ans avant notre ère, dans un os de vautour. Quatre trous ovalaires ont été percés par raclage de l'os à l'outil de silex. Leurs bords sont polis par un long usage. L'instrument porte aussi un décor finement incisé. L'os n'a pas été utilisé sur toute sa longueur (en pointillés). Le calcul de l'admittance d'entrée (rapport entre le débit et la pression, qui montre les résonances et les antirésonances successives de l'instrument) pour les différents doigtés révèle que la longueur de la flûte a été ajustée pour que le premier régime tous trous ouverts (premier pic de la courbe violette) corresponde à la même note que le second régime tous trous fermés (second pic de la courbe rouge). Cette continuité mélodique, que l'on retrouve sur les instruments actuels, témoigne d'une tradition élaborée de facture des instruments de musique au Paléolithique.



L. Hamon/RMN, M. Dauvois

Les rhombes

Au cours du Solutréen, environ 19 000 ans avant notre ère en Europe occidentale et un peu plus tôt en Europe centrale, apparaît un instrument à air, à son de sillage : le rhombe. Il est connu en Australie, en Afrique noire ou chez les Indiens d'Amérique du Sud, où il est un instrument sacré et secret exprimant la voix des esprits et des ancêtres.

Un rhombe est un objet allongé et à silhouette de feuille, mince et relativement léger, percé d'un trou. Au Paléolithique, il est en bois de renne ou en ivoire de mammouth. On passe un lien dans le trou, et on imprime à l'objet un double mouvement de rotation, sur lui-même et autour de l'expérimentateur. De cette double rotation naît le vrombissement caractéristique. Une épaisseur qui dépasserait environ le quart de la largeur empêcherait la rotation de l'objet autour de son axe longitudinal.

Le mouvement de giration autour de l'homme ne peut être uniforme, en raison du moment d'inertie du bras lors du geste : l'accélération est plus forte quand le rhombe est à gauche, puis derrière l'opérateur si celui-ci est droitier. Cela



se traduit, à chaque tour, par une montée en fréquence suivie d'une descente correspondant à la décélération. Les grands rhombes ont une voix plus grave que les petits ; si la vitesse de rotation augmente, la fréquence croît.

Une des pièces les plus significatives est le rhombe d'environ 10 000 ans avant notre ère, de la grotte de la Roche, à Lalinde, en Dordogne (voir la figure). Trop fragile pour être utilisée, la pièce originale a été reproduite en bois de renne par l'un d'entre nous (M. Dauvois), y compris la décoration géométrique gravée et l'ocrage. Expérimenté en plein air et en grotte, ce rhombe donne un son de sillage dont l'analyse en fréquence, en amplitude et en temps est proche de celle des sons produits par les instruments étudiés par les ethnologues.

La fréquence fondamentale du son évolue de 35 à 205 hertz lors d'un tour complet, tandis que le bruit de sillage est compris entre 1 600 et 25 000 hertz. En outre, chaque rotation du rhombe sur lui-même s'accompagne d'un bref claquement sur tout le spectre.

Le gisement de la grotte d'Isturitz, dans les Pyrénées-Atlantiques, a fourni la plus grande concentration connue de flûtes, dans une succession de couches stratigraphiques s'étendant de l'Aurignacien ancien au Magdalénien, soit environ de 35 000 à 10 000 avant notre ère. Les seules couches du Périgordien (de 27 000 à 20 000 ans avant notre ère) en ont livré plus des deux tiers. Avec des pièces de ce gisement, conservées au Musée des Antiquités nationales, Dominique Buisson a remonté une flûte droite presque complète.

Nous nous sommes intéressés à la facture de cet instrument. D'abord, l'élargissement tronconique de l'extrémité proche de l'articulation avec l'humérus forme une sorte de pavillon qui participe au rayonnement acoustique du son à la sortie de l'instrument ; l'embouchure se situe de l'autre côté, dans la partie la plus circulaire de l'os. Par ailleurs, le cubitus n'a pas été utilisé sur toute sa longueur. Quels critères ont guidé le choix de la position de l'embouchure et de celles des trous ? L'instrument original étant trop fragile pour être joué, nous avons procédé à une simulation numérique, en calculant la propagation du son, les pertes acoustiques internes, le rayonnement à partir des trous et de l'embouchure, et la couverture de cette dernière par les lèvres de l'instrumentiste, estimée expérimentalement avec un instrument de dimensions voisines.

Lorsque l'on souffle dans une flûte, la fréquence de la note produite est la fréquence fondamentale de résonance de la colonne d'air contenue dans le tube, ouvert aux deux extrémités. En soufflant plus fort, ou en embouchant différemment l'instrument, on peut émettre une note à une fréquence voisine du double de la fréquence fondamentale : on joue l'instrument sur son second régime, environ une octave au-dessus du premier. Dans le cas présent, un troisième régime ne peut être atteint qu'occasionnellement. Quand on perce un trou dont le diamètre est du même ordre que la section du tube, tout se passe comme si l'on coupait la flûte à l'endroit du trou. Ainsi, en débouchant successivement les trous, on obtient des notes de plus en plus aiguës (correspondant aux fréquences de résonance d'un tube de plus en plus court).

acoustiques de la phalange ; ainsi, à une fréquence légèrement inférieure à celle du premier mode longitudinal apparaît une antirésonance de la phalange sifflante : aucun son n'est émis à cette fréquence. En raison des dimensions des phalanges de renne, les sons fondamentaux émis se situent toujours entre 1 800 et 3 600 hertz, dans la bande de plus grande sensibilité de l'oreille (les secondes phalanges, environ un tiers plus courtes que les premières, émettent les sons les plus aigus).

Quelles sont les possibilités de cet instrument ? Les sons très élevés qu'il produit émergent violemment sur l'ensemble des sons naturels et humains. Ils peuvent constituer des signaux de communication lors de chasses en groupe. William Pruitt, de l'Université de Manitoba, a par ailleurs observé l'étrange réaction de hardes de rennes au signal sonore émis avec une phalange moderne ou avec une phalange indienne du début

du siècle, au bord d'un lac en forêt finlandaise. À la curiosité a succédé un comportement de confiance : les rennes se sont couchés sur la neige ou sur la glace à la suite de coups de sifflet prolongés et espacés les uns des autres de plusieurs minutes.

Les flûtes en os

Après avoir utilisé les propriétés des phalanges sifflantes, les hommes préhistoriques ont fabriqué des flûtes. Les premières furent peut-être des tubes de roseau ou d'autres végétaux, mais seules les flûtes en os ont été conservées dans les sites archéologiques. L'os le plus rectiligne, le plus régulièrement creux, de section quasi circulaire, est le cubitus des grands rapaces diurnes adultes, du vautour en particulier. En Europe occidentale, Cro-Magnon a donc le plus souvent choisi cet os pour ses flûtes, le sectionnant et y perceant des trous, et ce dès le début du Paléolithique supérieur (il y a environ 35 000 ans).

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.

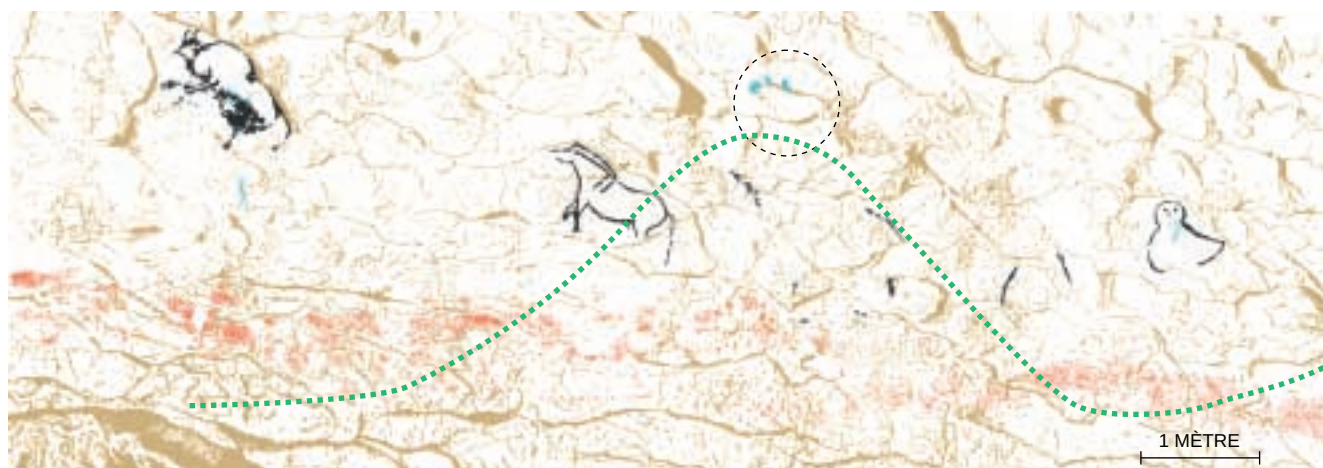
Le son dans les grottes

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 ocre 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