

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.



NASA Marshall Space Flight Center

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 carnivores. 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.

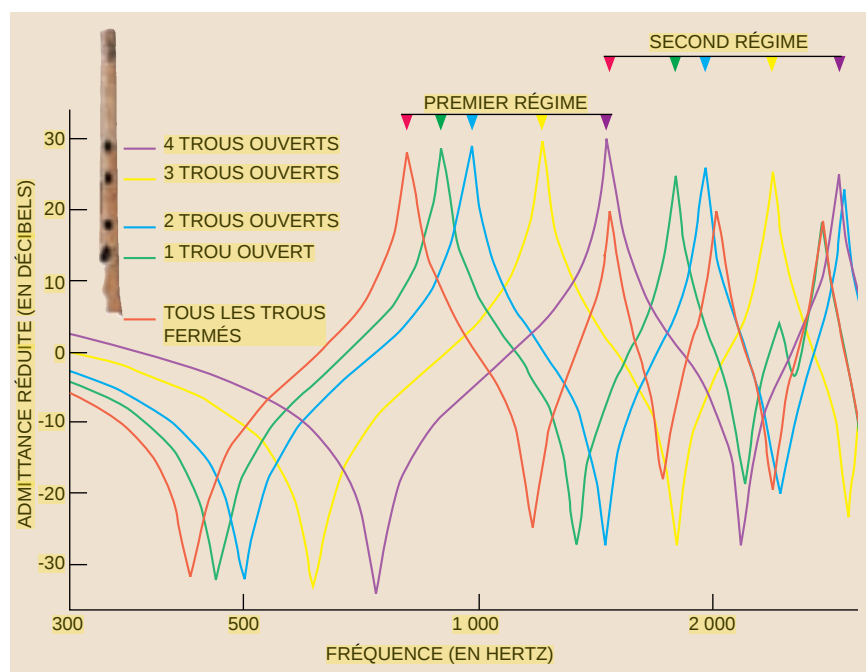
Cet «instrument à vent», pour primitif qu'il soit, présente un bon compromis entre les impératifs anatomiques et physiologiques de l'instrumentiste et un jeu potentiellement varié. La surface de l'épiphyse supérieure de la première phalange est en effet divisée par une dépression centrale dont le prolongement 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