

stratégie «charger et foncer» (*scoop and run*), consistant à évacuer un patient à risque de décompensation le plus vite possible vers un centre de référence, avec un traitement correctif léger lors de la prise en charge? Ou devait-on choisir la stratégie inverse, *stay and play* (littéralement «rester et jouer»), plus interventionniste, et déplaçant des moyens médicaux au plus près du patient afin de le stabiliser avant un hypothétique transport?

Dans le cas présenté, la décision a été prise de garder l'astronaute en vol: un traitement anticoagulant permettant de limiter l'extension du caillot a été commencé à bord avec la petite réserve de la pharmacie. Grâce aux ravitaillements par cargo spatial vers la station, le traitement a été maintenu jusqu'à la fin de la mission, et aucune complication n'a été détectée lors de la surveillance échographique régulière. Les médecins des vols ont donc opté pour un compromis entre les deux stratégies pré-hospitalières. Cependant, plus l'éloignement de la Terre sera grand, plus la méthode *stay and play* deviendra la seule option possible. Le ravitaillement médicamenteux ou le renfort humain sera compliqué, voire impossible, en cas de mission sur le sol martien.

L'IMPESANTEUR SIMULÉE

La médecine spatiale reste un champ de recherche très ouvert, dont les problématiques évoluent avec la perspective de missions lointaines ou d'une ouverture au tourisme. Pour approfondir nos connaissances dans ce domaine, l'ISS demeure, bien sûr, un laboratoire clé consacré à la science en impesanteur. Mais d'autres approches permettent de simuler (au moins en partie) ces conditions si particulières: les vols paraboliques en avion (*voir l'encadré page 52*) ou les études en immersion sèche. Ces dernières sont notamment réalisées au Medes, l'Institut de médecine et physiologie spatiale, à Toulouse, un établissement de référence en physiologie et médecine aérospatiale. L'immersion sèche reproduit les effets de l'impesanteur en immergeant un sujet (isolé de l'eau par une grande toile imperméable) dans une grande baignoire. Cette configuration mime les effets de l'impesanteur en supprimant les points d'appuis, afin d'étudier par exemple les nombreux effets musculaires ou cardiaques associés.

La médecine terrestre bénéficie aussi de cette activité de recherche. Par exemple, le laboratoire Comete, de l'université de Caen, ou le Caps (Cognition, action et plasticité sensorimotrice), de l'université de Bourgogne, pour ne citer qu'eux, orientent une partie de leurs recherches vers la médecine spatiale. En effet, le handicap moteur, l'alitement prolongé des patients hospitalisés, ou encore les pathologies de l'oreille interne par exemple présentent des



La présence humaine dans l'espace profond est un défi autrement plus complexe



analogies avec les modifications physiologiques induites par l'absence de pesanteur.

Le champ de la télémedecine bénéficie également de l'activité spatiale. À titre d'exemple, en 2017, lors de la mission *Proxima*, l'astronaute Thomas Pesquet a participé à la mise en service d'un échographe téléopéré (*Echo*). Depuis le sol, un médecin peut à présent téléguider une sonde d'échographie présente à bord de l'ISS. Sur Terre, grâce à cette technologie, un expert intervient directement auprès d'un patient à distance et contrôle en temps réel la qualité des images recueillies, améliorant la performance diagnostique de l'examen. Citons aussi le maillot de corps développé par l'Agence spatiale canadienne, nommé «biomonitor», qui enregistre les signes vitaux de l'astronaute sans être invasif. Les nouvelles technologies comme la réalité augmentée, l'intelligence artificielle pour le support décisionnel, ou l'impression 3D pour le matériel médical offrent également des perspectives intéressantes d'assistance au soin en milieu isolé.

Jusqu'à présent, une collaboration étroite entre programmeurs de mission, ingénieurs, chercheurs, instructeurs d'astronautes et médecins du spatial a permis de minimiser les risques médicaux au sein des stations orbitales et d'établir des standards de sécurité élevés pour les astronautes. La présence humaine dans l'espace profond est un défi autrement plus complexe. Aux questions techniques viendront invariablement s'ajouter des interrogations éthiques en cas de pathologie grave nécessitant des ressources au-delà de celles disponibles. Dans une petite station sur la Lune ou sur Mars sans ravitaillement ni renfort ou évacuation immédiate possible, la probabilité de survie serait alors très faible. Néanmoins, certaines avancées technologiques fourniront peut-être des solutions pour accroître la sécurité lors de ces missions qui repoussent les limites de l'exploration. D'ambitieux projets de recherche vont jusqu'à envisager la piste de l'hibernation humaine. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Komorowski *et al.*,
On the challenges of anesthesia and surgery during interplanetary spaceflight,
Anesthesiology, 2021.

J. Hinkelbein *et al.*,
Cardiopulmonary resuscitation (CPR) during spaceflight-a guideline for CPR in microgravity from the German Society of Aerospace Medicine (DGLRM) and the European Society of Aerospace Medicine – Space Medicine Group (ESAM-SMG), *Scandinavian journal of trauma, resuscitation and emergency medicine*, 2020.

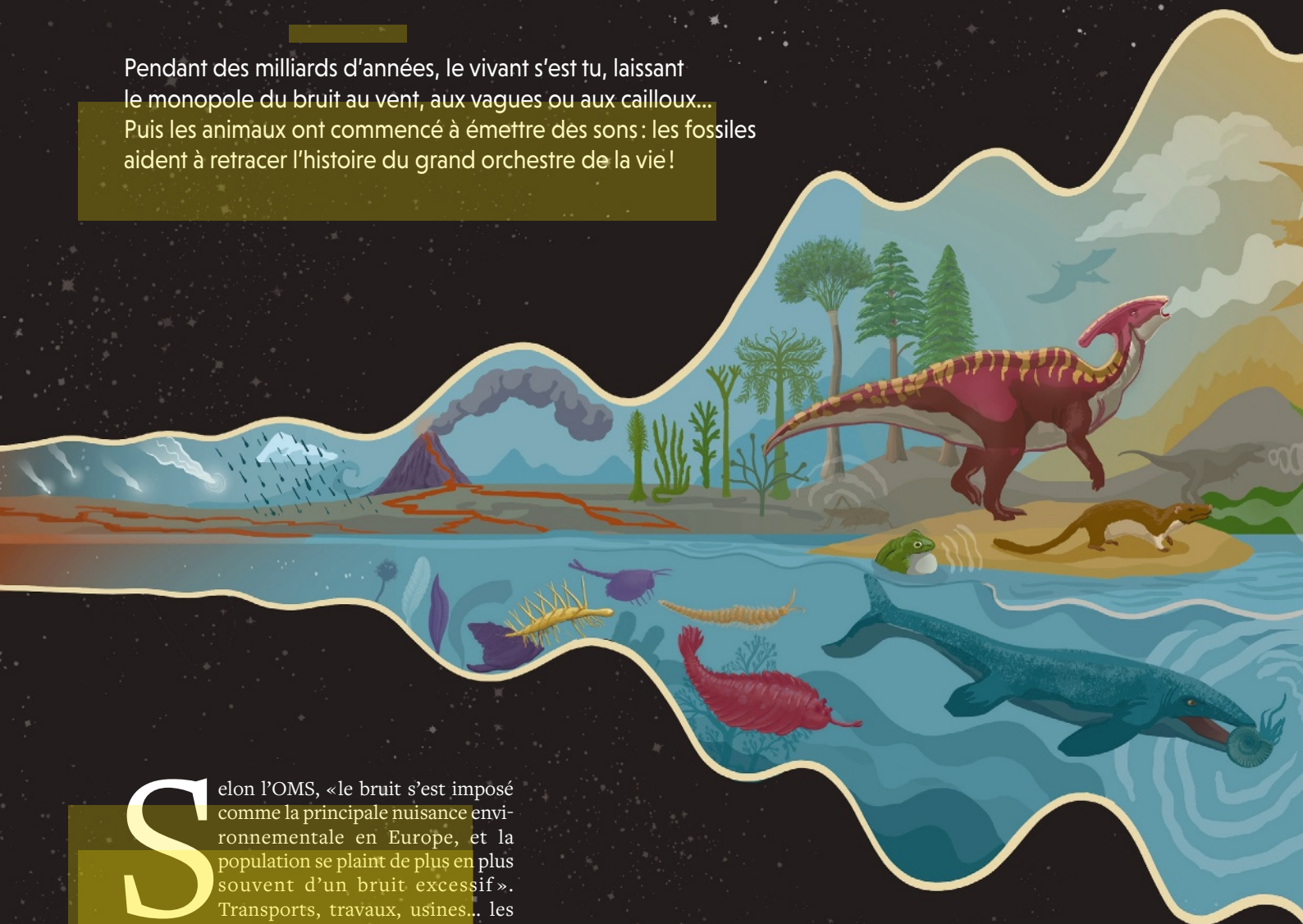
M. A. Custaud *et al.* (éd.),
L'Humain et l'Espace,
Books on Demand, 2020.

N. Pattyn et P. F. Migeotte,
Vivre dans l'espace,
Pour la Science, n° 422, 2012.

L'éveil des sons

Michael Habib

Pendant des milliards d'années, le vivant s'est tu, laissant le monopole du bruit au vent, aux vagues ou aux cailloux... Puis les animaux ont commencé à émettre des sons : les fossiles aident à retracer l'histoire du grand orchestre de la vie !



Selon l'OMS, «le bruit s'est imposé comme la principale nuisance environnementale en Europe, et la population se plaint de plus en plus souvent d'un bruit excessif». Transports, travaux, usines... les sources de bruit sont omniprésentes sur la Terre, où résonne une cacophonie d'origine humaine. Notre espèce est à n'en point douter l'une des plus émettrices de sons par les machines qu'elle a inventées. Pour preuve, lors du confinement du début 2020, quand plusieurs milliards d'individus ont été sommés de rester chez eux, la nature a, un peu, repris ses droits, et les témoignages émerveillés se sont succédé pour décrire, par exemple, le plaisir d'entendre à nouveau les oiseaux ou les grenouilles. C'est que des insectes aux baleines, beaucoup d'espèces animales produisent des sons et l'on pourrait croire qu'il en a toujours été ainsi. Il n'en est rien : pendant la majeure

partie de son histoire, notre planète n'a laissé entendre que le vent, la pluie, les vagues... le vivant restait silencieux.

Jé suis paléontologue, et mon travail consiste à comprendre la vie des animaux disparus. À ce titre, je suis également consultant pour des expositions, des films et des jeux. Parmi les sujets que je suis amené à traiter, les plus fréquents ont trait aux sons des animaux. Qu'il s'agisse d'une étude universitaire ou d'un *blockbuster*, le son est essentiel pour donner vie à des mondes disparus ou imaginaires.

De récentes études sur l'évolution de l'acoustique animale ont révélé comment sont

La musique a été un moteur de l'évolution, tant émettre et percevoir des sons apporte de nombreux avantages.



L'ESSENTIEL

> Pendant des milliards d'années, les animaux sont restés silencieux, incapables de produire le moindre son.

> Cela change avec les premiers arthropodes, marins ou terrestres, capables, par exemple, de stridulation, pour la famille des sauterelles, et de cymbalisation, pour celle des cigales.

> Les vertébrés, comme les reptiles et les mammifères, ne sont pas en reste et se dotent d'un larynx dont

les chauves-souris et les cétacés font un usage particulier : l'écholocalisation.

> Autre cas à part dans l'évolution des sons, les oiseaux, quant à eux, acquièrent en plus une syrinx, adaptée à l'émission de chants complexes.

> Dernière étape dans cette histoire du son, notre espèce a développé le langage articulé, pilier indispensable à l'émergence de toute notre civilisation.

L'AUTEUR



MICHAEL HABIB

est paléontologue, spécialiste de l'anatomie et du mouvement des ptérosaures, des oiseaux et des dinosaures à plumes, ainsi que biomécanicien au Muséum d'histoire naturelle de Los Angeles.

apparus nos paysages sonores actuels. Plus précisément, les fossiles documentent l'apparition des principaux types de structures de production et de détection du son chez les ancêtres des espèces actuelles. Et, parfois, grâce à des modélisations, les scientifiques recréent les anciens sons eux-mêmes. Désormais, nous avons une idée de l'aube du vacarme.

DU MONDE DU SILENCE À MARIAH CAREY

Les archives fossiles indiquent que la vie sur Terre a commencé il y a 3,7 milliards d'années. Mais les premiers organismes, les microbes et, beaucoup plus tard, des animaux à corps mou, étaient muets. Ce n'est qu'au cours de l'explosion évolutive du Cambrien, il y a entre 541 et 485,4 millions d'années, que les animaux ont commencé à faire du bruit, du fait de comportements liés à la locomotion et à la prédation. Mais ces sons restaient limités au milieu sous-marin... Aucun son animal ne résonnait sur la terre ferme. Plus de 200 millions d'années se sont écoulées avant que le bourdonnement des insectes ne commence à remplir l'air, donnant naissance à un monde acoustique entièrement nouveau.

Le plus ancien insecte putatif connu (on n'en a qu'une mandibule, découverte en Écosse), date d'environ 400 millions d'années, et l'on ignore s'il était muet, voire sourd. Quand les insectes ont-ils commencé à émettre ou entendre des sons? Difficile de répondre, mais les archives fossiles fournissent une date minimale: une espèce de la famille des Tettigoniidae (celle des sauterelles) datant d'environ 250 millions d'années présente l'anatomie productrice de sons caractéristique de ce groupe: leur stridulation résulte du frottement de «râpes» situées sur les ailes. Ces structures sont si bien conservées dans certains fossiles que l'on sait reconstituer les sons qu'émettaient ces créatures. C'est ce qu'a fait en 2012 une équipe dirigée par Jun-Jie Gu,

aujourd'hui à l'université agricole du Sichuan, en Chine, en montrant qu'*Archaboilus musicus* (un Tettigoniidae) émettait il y a 165 millions d'années des sons à une fréquence de 6,4 kilohertz, soit environ un sol de la septième octave, note que seuls de rares chanteurs, notamment Mariah Carey peuvent atteindre.

Les plus anciens fossiles connus de cigales datent également de cette époque. Ces insectes produisent des sons parfois exceptionnelle-

On peut reconstituer les sons émis par les créatures aux fossiles les mieux conservés

ment forts grâce à la cymbalisation, qui consiste en des déformations rapides d'une membrane (un peu comme le couvercle d'un bidon) par des muscles, le son étant ensuite amplifié dans une caisse de résonance (voir l'encadré page ci-contre).

Pour ces premiers insectes, les avantages à sortir du monde du silence étaient nombreux: communiquer à distance, entendre des prédateurs et peut-être même attirer des proies en imitant les sons d'un partenaire potentiel de l'animal cible, comme le fait *Chlorobalius leucoviridis* (un Tettigoniidae australien) pour attirer des cigales mâles en imitant le chant des femelles. En offrant également un nouveau

moyen d'attirer les partenaires, le son donna lieu à un nouveau type de bataille évolutive, celle privilégiant celui qui ferait le plus de bruit.

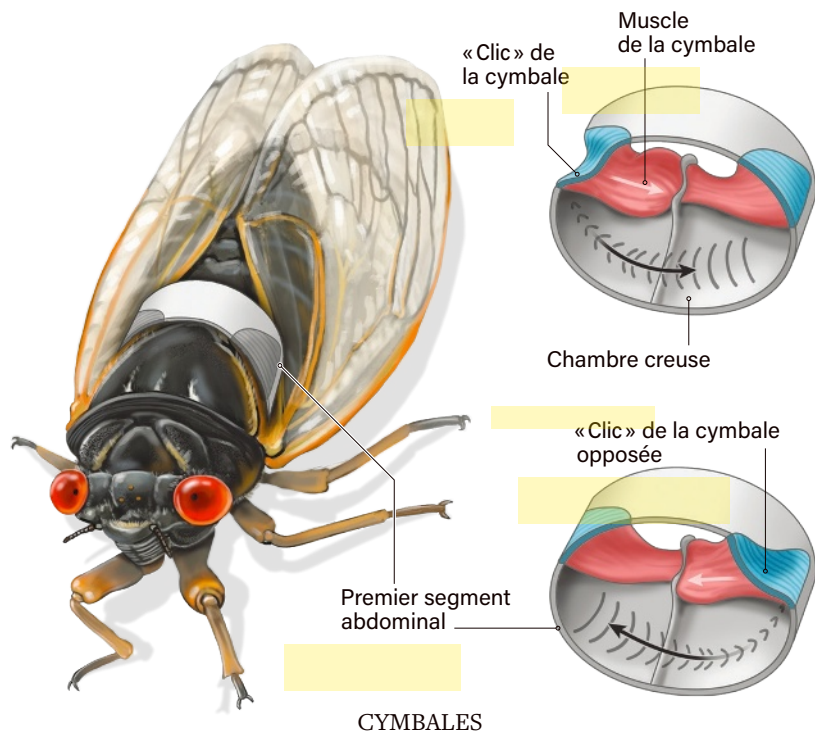
LES PREMIÈRES « BOÎTES VOCALES »

Les vertébrés ont probablement commencé à expérimenter le son, sous une forme limitée, à peu près au même moment où les insectes se sont fait entendre. Les amphibiens, les reptiles et les mammifères d'aujourd'hui possèdent tous un larynx (voir l'encadré page suivante), une « boîte vocale » située au sommet des voies respiratoires. De cette présence dans des groupes aussi éloignés, on déduit qu'ils l'ont héritée de leur dernier ancêtre commun. En d'autres termes, le larynx serait presque aussi vieux que les vertébrés terrestres eux-mêmes, et remonterait donc à environ 300 millions d'années. Cependant, il a probablement fallu des millions d'années pour que des sons dignes de ce nom, spécialisés ou puissants, se développent chez ces animaux, le temps qu'un larynx suffisamment performant se mette en place.

On sait peu de chose sur les premiers stades de la vocalisation des vertébrés, notamment parce que le larynx est constitué de cartilage, qui se conserve généralement mal. Une chose est néanmoins sûre, à partir de 230 millions d'années environ, au cours du Mésozoïque (cette ère, qui réunit le Trias, le Jurassique et le Crétacé, s'étend entre 252,2 et 66 millions d'années), les vertébrés ont acquis un large éventail de capacités vocales. C'est à ce moment-là que le monde est devenu vraiment bruyant. Les grenouilles, avec leur riche répertoire de cris et de chants, sont apparues durant cette période. Les mammifères ont également fait leurs débuts à cette époque, et ont probablement fait entendre très tôt leurs grognements et sifflements caractéristiques. Nous n'avons pas beaucoup de témoignages directs de l'appareil de production du son chez les premiers mammifères, mais nous disposons d'un riche registre fossile de leurs... oreilles.

L'oreille des mammifères est unique, avec ses trois petits osselets (le marteau, l'enclume et l'étrier) dans l'oreille moyenne, dont les deux derniers sont dérivés d'os associés à la mâchoire chez la plupart des autres vertébrés. Ces oreilles spéciales sont très efficaces pour entendre les sons à haute fréquence, ce qui aurait pu aider les mammifères à repérer des proies parmi les insectes bourdonnants. Ces mammifères étaient peut-être aussi capables de produire des sons à haute fréquence, afin de communiquer dans une gamme de fréquences que peu d'autres animaux pouvaient détecter.

Les dinosaures sont parmi les animaux du Mésozoïque les plus doués pour l'acoustique. En 1981, David Weishampel a été le premier à reconstituer la vocalisation d'un animal fossile,



Les insectes comme les cigales « chantent » en utilisant des cymbales, des structures ressemblant à des membranes de tambours déformées par les contractions rapides de muscles spécifiques. S'ensuit une série de cliquetis (plusieurs centaines par seconde) qui sont amplifiés dans l'abdomen doté d'une chambre de résonance dans ses premiers segments. Les archives fossiles montrent que ces organes sonores existent depuis au moins 250 millions d'années.

en l'occurrence le dinosaure herbivore à bec de canard *Parasaurolophus*. Cette créature avait sur la tête une crête géante reliée à ses voies respiratoires qui faisait office de chambre de résonance. En prenant en compte la taille et la forme de la crête, le paléontologue a pu estimer le répertoire sonore du *Parasaurolophus* et le reproduire avec un modèle : les sons ressemblaient à ceux d'un didgeridoo !

LE KLAXON DU T. REX

Depuis l'avènement des outils numériques, toujours plus performants, ce type d'analyse approfondie a été mené sur un nombre beaucoup plus important de spécimens. Depuis 2008, Lawrence Witmer, de l'université de l'Ohio, et son équipe utilisent des scanners, ainsi que des modèles de mécanique des fluides, pour étudier la production de sons chez diverses espèces de dinosaures. Ils ont découvert que le crâne de plusieurs d'entre elles contenait des chambres complexes où la circulation de l'air contribuait à la régulation de la température du corps, mais vraisemblablement aussi à l'émission d'un large éventail de sons, ressemblant notamment à ceux des klaxons, des soufflets et des trompettes.

La reconstitution des vocalisations des dinosaures, comme celles entendues dans les films de la franchise *Jurassic Park*, est

depuis longtemps prisée par l'industrie cinématographique. Mais Julia Clarke, de l'université du Texas, à Austin, et ses collègues ont montré que les sons des dinosaures prédateurs, au premier rang desquels le *Tyrannosaurus rex*, s'apparentaient davantage au répertoire des oiseaux qu'au rugissement des mammifères. Les sons du *T. rex* étaient-ils ceux d'une oie géante? D'un point de vue biomécanique, le «klaxon» est un son produit en grande partie par le nez plutôt que par la bouche et commençant par la vibration de structures situées profondément dans la poitrine. À l'échelle du tyrannosaure, cela devient une trompette de guerre baryton-basse équivalente en puissance à toute la section des cuivres d'un orchestre philharmonique!

Cependant, certains de ces reptiles géants étaient probablement un peu moins bruyants qu'on ne l'imagine. Les brachiosaures à long cou, qui jouent de la trompette comme des éléphants dans le premier *Jurassic Park*, sorti

en 1993, étaient en réalité probablement presque aphones. Tout au plus étaient-ils capables de siffler. Chez tous les tétrapodes (le groupe des premiers vertébrés terrestres et leurs descendants), les vocalisations primaires du larynx sont contrôlées principalement par le nerf laryngé récurrent. Ce nerf présente toujours la même configuration étrange: asymétrique, dans sa partie droite, il descend le long du cou, contourne les gros vaisseaux sanguins de la partie supérieure et moyenne de la poitrine, puis remonte le cou jusqu'au larynx, tandis qu'à gauche il commence dans le thorax et remonte vers la trachée. En conséquence, les signaux nerveux de la voix doivent parcourir environ deux fois la longueur du cou.

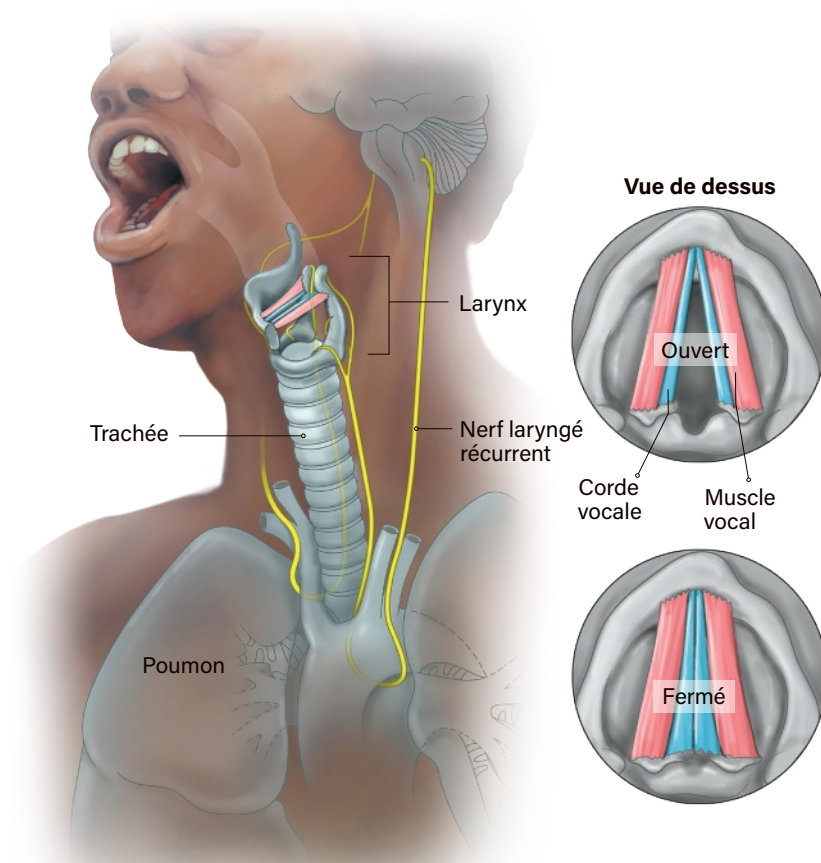
UN « MONUMENT D'INEFFICACITÉ »!

Pour les animaux à cou court, notamment les humains, le retard qui en résulte est insignifiant, mais pour ceux à long cou... Déjà, pour une girafe, le nerf laryngé récurrent atteint 4,6 mètres de longueur. Alors pour un sauropode comme le brachiosaure, au cou d'environ 8 mètres (2 à 3 fois plus long que celui d'une girafe), le très long temps de transmission neuronale aurait empêché tout contrôle correct du mouvement rapide des cordes vocales lors de vocalisations complexes. En 2011, le nerf laryngé récurrent des sauropodes fut qualifié de «monument d'inefficacité». La prochaine fois que vous regarderez *Jurassic Park*, n'hésitez pas à corriger la bande-son...

Selon toute vraisemblance, de nombreux dinosaures étaient d'impressionnants chanteurs. Un groupe en particulier a développé des vocalisations parmi les plus sophistiquées du règne animal, et, du reste, les membres de ce groupe vivent encore parmi nous: il s'agit des oiseaux. Les premiers représentants ont été identifiés dans des gisements fossiles vieux d'environ 150 millions d'années, mais leurs capacités vocales uniques ont vraisemblablement évolué un peu plus tard.

Elles sont le fait d'une structure vocale spéciale, la syrinx (voir l'encadré page 62), qui assure la quasi-totalité des vocalises aviaires, le larynx des oiseaux étant réduit. Ce dernier est situé en haut de la voie aérienne principale, tandis que la syrinx se trouve en bas, où la trachée se ramifie vers les poumons en deux bronches. Cette disposition anatomique présente plusieurs avantages. L'un des plus fondamentaux, décrit en 2019 par Tobias Riede, de l'université du Midwest, en Arizona, et ses collègues, est qu'il améliore considérablement l'efficacité de la résonance. En d'autres termes, la syrinx produit plus de son pour le même coût énergétique.

Autre avantage, cet organe est en mesure d'utiliser différemment les flux d'air provenant



LARYNX

Les mammifères, reptiles et amphibiens actuels ont tous un larynx, une «boîte vocale» qui produit une grande variété de sons grâce aux cordes vocales. Cet organe est principalement contrôlé par le nerf laryngé récurrent. Le larynx étant composé de cartilage, il est rarement conservé dans les fossiles, mais sa présence chez tous les vertébrés terrestres vivants suggère qu'ils en ont hérité de leur dernier ancêtre commun, il y a quelque 300 millions d'années.