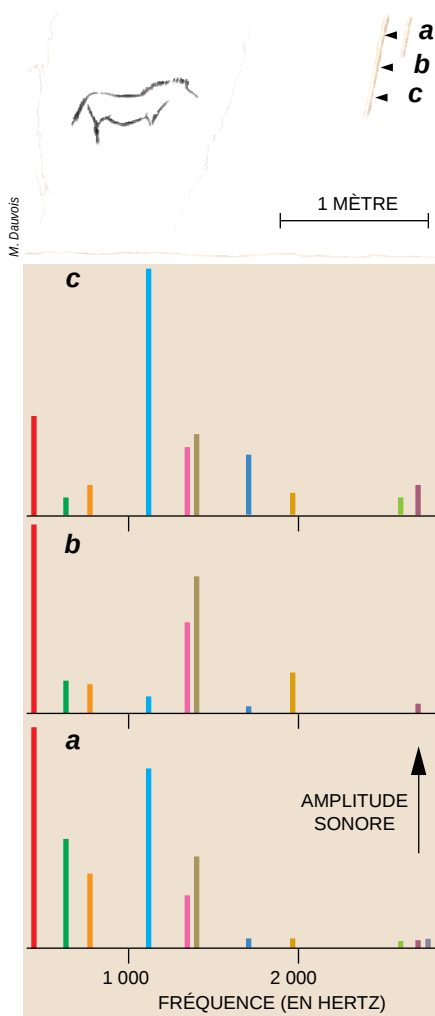




que l'on entend dans la Salle des peintures du réseau Clastres, en Ariège, et que l'analyse spectrale met particulièrement bien en évidence (voir la figure 6).

Dans la grotte du Portel, on pourrait qualifier les concrétions d'«instrument lithophonique», composé de plusieurs ensembles de draperies et de colonnes. Certaines draperies sont entaillées dans leur partie la plus sonore par des chocs répétés, et certaines de ces cassures ont reçu un discret marquage ocré, dont l'ancienneté est attestée par le fin voile de calcite qui les recouvre. Il en est de même à la grotte de Cougnac, dans le Lot.

Des traits gravés peuvent également marquer les draperies sonores, comme par exemple dans la galerie latérale de la grotte de Font-de-Gaume, en Dordogne. Enfin, ces instruments naturels sont presque toujours associés à des figures. C'est au réseau Clastres que cette association est la plus singulière : un cheval et un mustélidé sont dessinés dans le



6. DES DRAPERIES DE CALCITE forment des lithophones naturels dans les grottes : elles résonnent quand on les frappe. celui de la Salle des peintures du réseau Clastres, en Ariège, près duquel Cro-Magnon a dessiné un cheval (à gauche, en haut), comprend deux draperies de calcite qui émettent des sons différents selon le point de frappe. L'émission des mêmes fréquences avec des intensités différentes (graphe pour la draperie de gauche) fait fortement varier la note perçue. Il permet donc de jouer des mélodies. Dans la grotte du Portel, en Ariège (à droite), des draperies sont entaillées dans leurs parties les plus sonores par les coups portés par Cro-Magnon (flèches vertes). La finesse du voile de calcite qui recouvre ces entailles et la griffade d'ours (flèche blanche) prouve que la morphologie du lieu n'a pas varié depuis plus de 100 000 ans, époque à laquelle ont disparu les ours des cavernes (ou de Deniger) qui ont laissé cette empreinte.

voisinage immédiat de deux petites draperies particulièrement sonores, sur une paroi gigantesque où il n'y a par ailleurs aucun autre témoin paléolithique. Une association de même ordre existe à la grotte des Fieux, dans le Lot, où le lithophone est proche d'un bloc gravé de bouquetins et d'abondantes cupules.

Notre appareil auditif est identique à celui de Cro-Magnon, mais la manière dont nous identifions et interprétons les sons, dont nous leur

donnons ou non une importance, un caractère remarquable, est avant tout liée à nos traditions et à nos apprentissages : nous ne rejouerons jamais la musique des peintres de Lascaux. Mais nous avons fait un grand pas dans la connaissance de cette période : comme ce fut le cas plus tard dans d'autres cultures, leurs compétences acoustiques, tant en grotte que dans la facture des flûtes, se sont certainement développées à partir de la pratique musicale.

Michel DAUVOIS est préhistorien à l'Institut de paléontologie humaine, MNHN, CNRS. Xavier BOUTILLON, Benoît FABRE, Marc-Pierre VERGE sont acousticiens au Laboratoire d'acoustique musicale de l'Université Paris 6 et du CNRS.

I. REZNIKOFF et M. DAUVOIS, *La dimension sonore des grottes ornées*, in *Bulletin de la Société préhistorique française*, 1988.

M. DAUVOIS, *Son et musique paléolithiques*, in *Les dossiers d'archéologie*, n° 142, 1989.

M. DAUVOIS et X. BOUTILLON, *Études acoustiques au réseau Clastres, Salle des peintures et lithophones naturels*, in *Préhistoire ariégeoise*, t. XLV, 1990.

D. BUISSON, *Les flûtes paléolithiques d'Is-sur-tiz (Pyrénées-Atlantiques)*, in *Bulletin de la Société préhistorique française*, 1990.

M. DAUVOIS, *Les témoins sonores paléolithiques, extérieur et souterrain*. «Sons originels», *préhistoire de la musique*, in *Études et recherches archéologiques de l'Université de Liège*, n° 61, 1994.

M. DAUVOIS et X. BOUTILLON, *Caractérisation acoustique des grottes ornées paléolithiques et de leurs lithophones naturels*, La pluridisciplinarité en archéologie musicale, 4^e Rencontre internationale d'archéologie musicale de l'ICTM, Saint-Germain-en-Laye, 1990, éditions de la Maison des sciences de l'homme, Paris, vol. 1, 1994.

Le nuage de Oort

PAUL WEISSMAN

Aux confins du Système solaire, des comètes formant un vaste nuage sont attirées presque autant par le Soleil que par les autres étoiles. Les astronomes étudient la dynamique de ce nuage afin de comprendre l'origine du Système solaire.

Le Système solaire ne s'arrête pas à l'orbite de Pluton : l'influence gravitationnelle du Soleil s'exerce aussi sur des corps 3 000 fois plus éloignés, à mi-chemin des étoiles les plus proches. Là, un gigantesque réservoir de comètes a échappé au regroupement qui constitua le Système solaire : c'est le nuage de Oort.

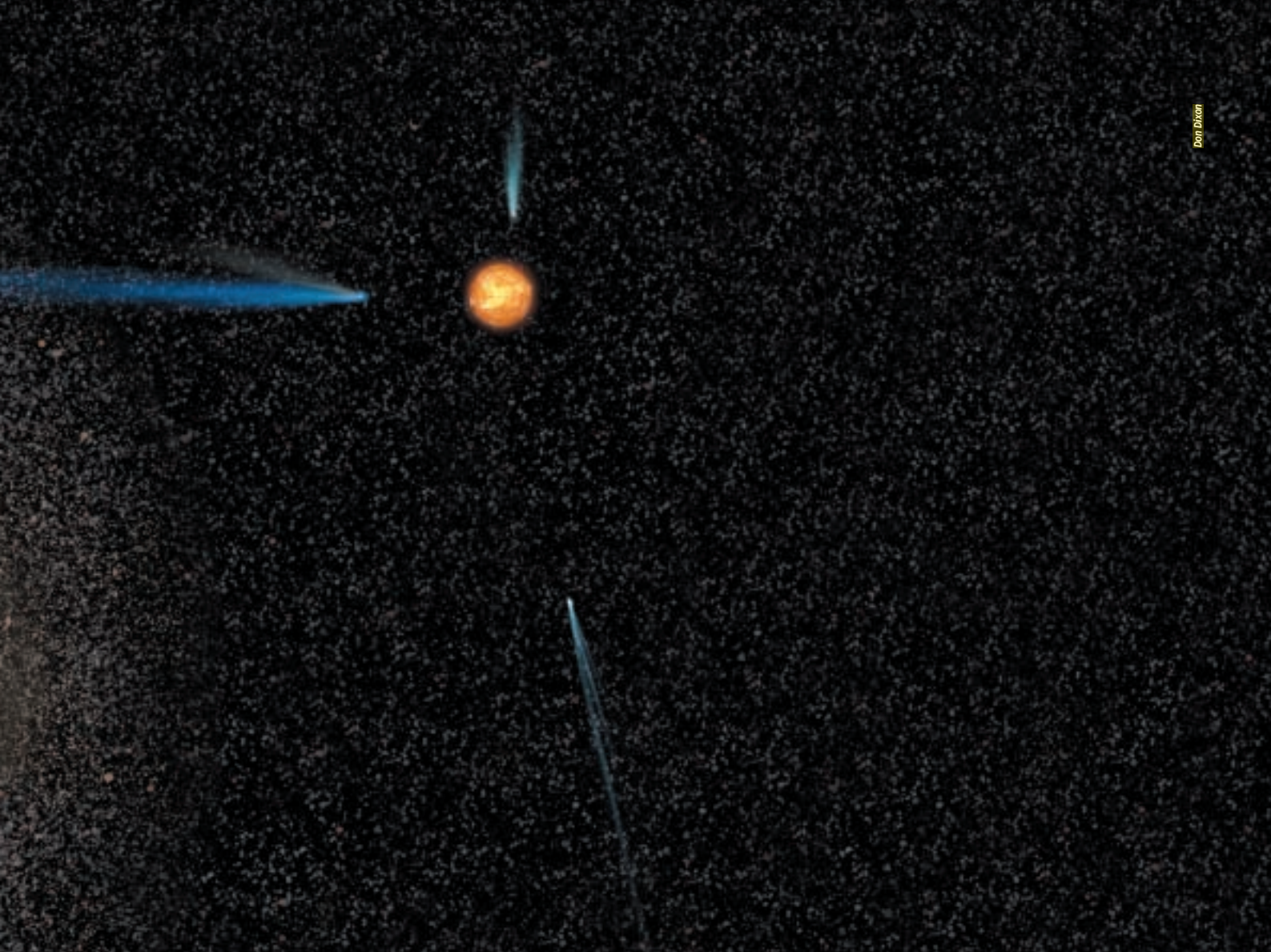
Ce nuage est la « Sibérie du Système solaire », une vaste région frontalière froide, peuplée par les exilées de l'em-

pire solaire du milieu et marginalement sous la domination de l'autorité centrale. Les températures diurnes atteignent à peine quatre kelvins (-269°C), et plusieurs dizaines de millions de kilomètres séparent les comètes les unes des autres. Dans ces régions, le Soleil, bien qu'il reste l'étoile la plus brillante du ciel, n'illumine guère plus que Vénus dans notre ciel nocturne.

Les astronomes n'ont jamais « vu » le nuage de Oort, pas plus que les phy-

siciens n'ont vu un électron : on déduit l'existence et les propriétés du nuage de Oort tout comme on détermine les propriétés de l'électron, d'après leurs effets physiques. Dans le cas du nuage de Oort, ces effets sont un train constant de comètes à période longue, qui traversent le système planétaire.

Au IV^e siècle avant notre ère, Aristote considérait les comètes comme des nuages de gaz lumineux, dans la haute atmosphère terrestre. Puis, au



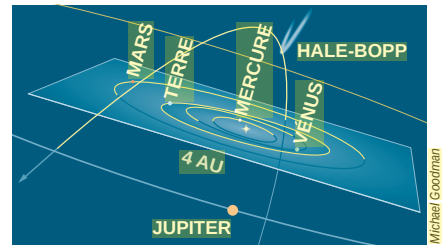
1. L'ÉTOILE GLIESE 710 (à droite) traversera le nuage de Oort dans 1,4 million d'années. Elle déviera alors des comètes qui dorment à grande distance du Soleil, réveillant certaines d'entre elles et les catapultant vers les planètes du Système solaire. De tels événements, résultant de petits mouvements stellaires dans notre Galaxie, se produisent en moyenne tous les millions d'années. Dans cette vue d'artiste, l'étoile paraît plus grosse que le Soleil, car elle est située plus près de l'observateur ; les comètes lointaines ne sont pas à l'échelle.

1^{er} siècle de notre ère, le philosophe romain Sénèque supposa que les comètes étaient des corps célestes qui se déplacent sur leurs propres trajectoires dans le firmament. Quinze siècles s'écoulèrent avant que son hypothèse ne soit confirmée par l'astronome danois Tycho Brahe, qui compara les observations de la comète de 1577 effectuées en plusieurs points de l'Europe. Si la comète avait été très proche de nous, sa position aurait

légèrement varié par rapport aux étoiles, selon le lieu d'observation. Tycho Brahe ne détecta aucune variation de la position de la comète et il en conclut que la comète se trouvait au-delà de la Lune.

La distance réelle des comètes ne fut établie que lorsqu'on connut leurs orbites. En 1705, l'astronome anglais Edmond Halley dressa le premier catalogue de 24 comètes. En se fondant sur les observations imprécises de son

temps, Halley ne put ajuster que des paraboles approximatives à chaque trajectoire de comète. Néanmoins, il remarqua que les orbites pouvaient être des ellipses très allongées autour du Soleil : «Ainsi leur nombre serait limité et, peut-être, pas très élevé. De surcroît, l'espace entre le Soleil et les étoiles fixes est si considérable qu'une comète aurait assez de place pour tourner autour du Soleil, avec une très longue période de révolution.»



2. LA COMÈTE HALE-BOPP (à gauche), qui passa près de la Terre en mars 1997, est une comète à longue période. Sa visite précédente dans le Système solaire interne date de 4 200 ans ; en raison de l'influence gravitationnelle de Jupiter, elle réapparaîtra dans 2 600 ans. Entre-temps, elle partira jusqu'à 370 fois la distance de la Terre au Soleil. Comme la plupart des comètes à longue période, la comète Hale-Bopp a une orbite très inclinée par rapport à l'orbite terrestre (ci-dessus).

Cette description de comètes circulant sur des orbites qui s'étendent entre les étoiles anticipait la découverte du nuage de Oort, deux siècles et demi plus tard. Halley observa également que les comètes de 1531, 1607 et 1682 avaient des orbites très semblables et des passages espacés d'environ 76 ans : ces comètes, apparemment différentes, n'étaient-elles pas une seule et même comète qui revenait à intervalles réguliers ? L'objet en question est effectivement unique : c'est la comète de Halley, qui a visité la région des planètes intérieures en 1986.

Depuis l'époque de Halley, les astronomes ont divisé les comètes en deux catégories selon leur période de révolution autour du Soleil (ou, ce qui revient au même, selon leur distance moyenne par rapport au Soleil). Les comètes à longue période, comme les comètes brillantes récentes Hyakutake et Hale-Bopp, ont des périodes orbitales supérieures à 200 ans ; les comètes à courte période sont celles dont les périodes sont inférieures à 200 ans. Au cours de la dernière décennie, les astronomes ont encore subdivisé les comètes à courte période en deux sous-groupes : les comètes de la famille de Jupiter, telles que les comètes Encke et Tempel 2, dont les périodes sont inférieures à 20 ans, et les comètes à période intermédiaire, comme celle de Halley, dont les périodes sont comprises entre 20 et 200 ans.

Ces définitions semblent arbitraires, mais elles traduisent des différences réelles : les comètes à longue période et à période intermédiaire arrivent dans la région planétaire aléatoirement de toutes les directions, tandis que les

comètes joviennes (de la famille de Jupiter) ont des orbites dont le plan est proche de l'écliptique (le plan de l'orbite terrestre, qui est aussi celui des autres planètes, à quelques degrés près). Les comètes à périodes longue et intermédiaire émaneraient du nuage de Oort, tandis que les comètes joviennes proviendraient de la ceinture de Kuiper, une région de l'écliptique au-delà de l'orbite de Neptune (voir *La ceinture de Kuiper*, par Jane Luu et David Jewitt, *Pour la Science*, juillet 1996).

Les régions infernales au-delà de Pluton

À l'aube du XX^e siècle, on connaissait suffisamment d'orbites de comètes à période longue pour en étudier la distribution statistique (voir la figure 6). Un problème surgit. Un tiers de toutes les orbites «osculatrices» – c'est-à-dire les orbites qu'elles suivraient si elles étaient soumises uniquement à l'attraction du Soleil – semblent hyperboliques. Or, les orbites hyperboliques ne sont pas périodiques : elles viennent de l'espace interstellaire et y repartent, contrairement aux orbites elliptiques, qui sont fermées et périodiques. Cette observation fit penser à certains astronomes que les comètes étaient soustraites à l'espace interstellaire par des rencontres avec les planètes du Système solaire.

Afin de tester cette hypothèse, les astronomes remontèrent le temps : ils extrapolèrent les orbites des comètes à longue période vers le passé et trouvèrent qu'en raison de l'influence gravitationnelle des planètes les orbites oscultrices n'étaient pas les orbites originelles des comètes (voir la figure 3).

Quand on prend en compte les effets des planètes suffisamment loin dans le passé et en considérant que le foyer des orbites est le centre de gravité du Système solaire (légèrement décalé par rapport au Soleil), presque toutes les orbites deviennent elliptiques. Les comètes, loin d'être des vagabonds interstellaires, sont liées au Système solaire.

De surcroît, même si l'énergie de deux tiers des orbites semblait distribuée uniformément, l'énergie orbitale d'un tiers des orbites était étroitement concentrée (l'énergie orbitale est inversement proportionnelle au demi-grand axe de l'orbite). Cette accumulation correspond à des orbites qui s'étendent très loin du Soleil, jusqu'à au moins 20 000 unités astronomiques (l'unité astronomique, ou UA, est la distance moyenne de la Terre au Soleil, soit 150 millions de kilomètres environ). Les périodes de ces orbites sont supérieures à un million d'années.

Pourquoi tant de comètes provenaient-elles de si loin ? Vers la fin des années 1940, l'astronome hollandais Adrianus van Woerkom montra que la répartition uniforme de leurs orbites s'expliquait par des perturbations planétaires qui dispersent aléatoirement les comètes sur des orbites plus grandes et plus petites. Comment expliquer alors la proportion supérieure de comètes ayant une période voisine de un million d'années ?

En 1950, ce problème intéressa l'astronome hollandais Jan Oort, déjà célèbre pour avoir détecté, 30 ans plus tôt, la rotation de notre Galaxie. Il remarqua que les comètes à longue période sont initialement les comètes de périodes voisines de un million d'années ; elles