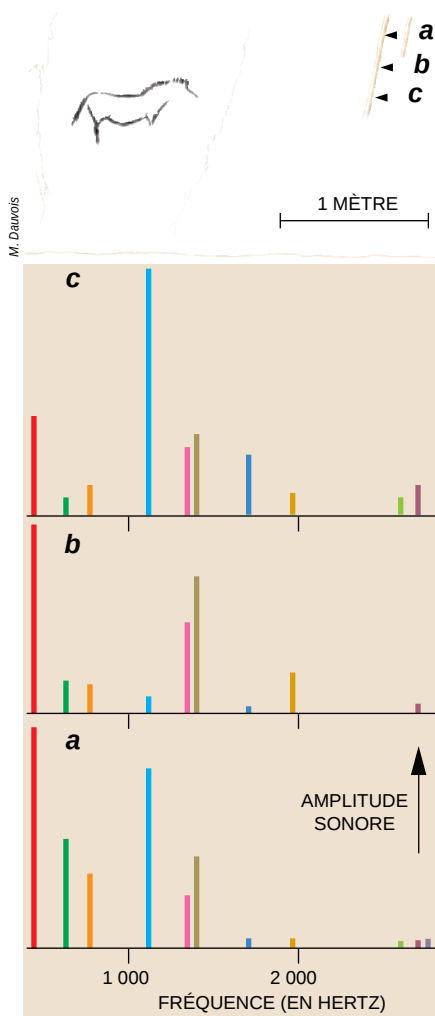




que l'on entend dans la Salle des peintures du réseau Clastres, en Ariège, et que l'analyse spectrale met particulièrement bien en évidence (voir la figure 6).

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.

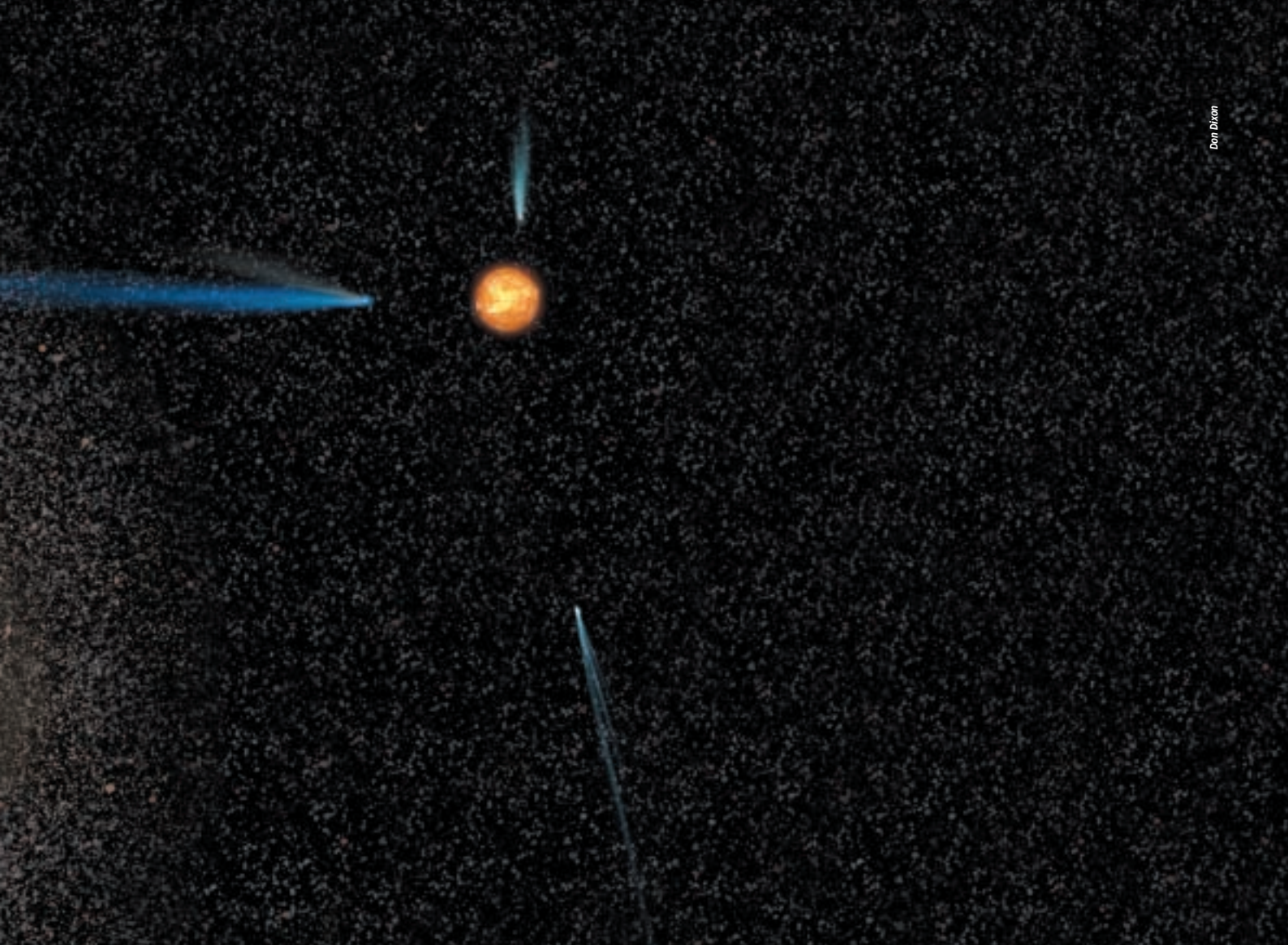
Ce nuage est la « Sibérie du Système solaire », une vaste région frontalière froide, peuplée par les exilées de l'em-

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



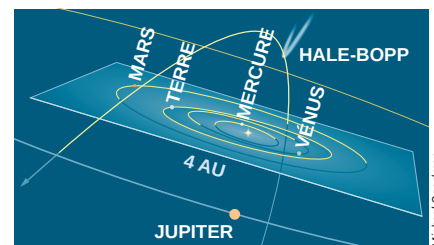
1. L'ÉTOILE GLIESE 710 (à droite) traversera le nuage de Oort dans 1,4 million d'années. Elle déviera alors des comètes qui dorment à grande distance du Soleil, réveillant certaines d'entre elles et les catapultant vers les planètes du Système solaire. De tels événements, résultant de petits mouvements 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

forment un nuage sphérique, autour du système planétaire, qui s'étend à mi-chemin des étoiles les plus proches.

Oort montra que les comètes de ce nuage sont si faiblement liées au Soleil que des étoiles qui passent à proximité modifient aléatoirement leurs orbites. Une dizaine d'étoiles passent à moins de quatre années-lumière du Soleil tous les millions d'années (l'année-lumière est la distance parcourue par la lumière en un an, soit 63 240 unités astronomiques). Ces approches sont suffisantes pour perturber les orbites cométaires, pour modifier aléatoirement leur inclinaison par rapport à l'écliptique et pour envoyer un flot constant de comètes dans le Système solaire interne sur des orbites très elliptiques (voir la figure 1). En entrant dans le système planétaire pour la première fois, les comètes sont déviées par les planètes, de sorte qu'elles gagnent ou perdent de l'énergie orbitale. Certaines s'échappent du Système solaire, d'autres deviennent des comètes périodiques qui composent la distribution uniforme. Pour Oort, le nuage qui porte aujourd'hui son nom est «un jardin doucement ratissé par les perturbations stellaires.»

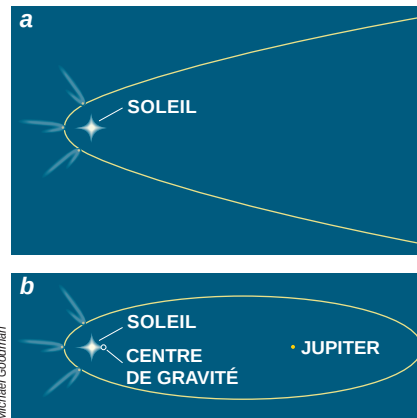
À l'issue de ses calculs, Oort observa que quelques comètes pouvaient provenir de l'espace interstellaire, mais il supposa que ces exceptions n'en étaient pas réellement : leurs orbites différaient, parce qu'elles étaient trop imprécisément connues ou que leur mouvement était perturbé par l'éjection de gaz et de poussières, quand les comètes approchaient du Soleil. Ces forces non gravitationnelles peuvent donner l'impression que les orbites sont hyperboliques, alors qu'elles sont en réalité elliptiques.

Secouées, pas remuées

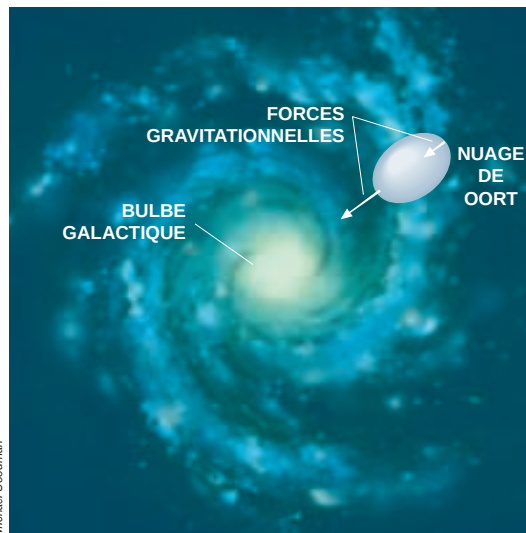
La perspicacité de Oort était remarquable : non seulement ces idées étaient exactes, mais il les obtint alors qu'il ne disposait que de 19 orbites bien mesurées. Aujourd'hui, les astronomes ont 15 fois plus de données. Ils savent que les comètes à longue période qui arrivent dans la région planétaire pour la première fois proviennent d'une distance moyenne de 44 000 unités astronomiques. Ces orbites ont une période moyenne de 3,3 millions d'années.

Les astronomes ont également compris que les perturbations stel-

lares sont parfois très vigoureuses : certaines étoiles passent si près du Soleil qu'elles traversent le nuage de Oort, perturbant violemment les orbites cométaires. En moyenne, une étoile passe à moins de 10 000 unités astronomiques du Soleil tous les 36 millions d'années, et à moins de 3 000 unités



3. LES COMÈTES À LONGUE PÉRIODE sont si faiblement liées au Soleil que les planètes perturbent considérablement leur mouvement. En général, les astronomes ne voient les comètes que lorsqu'elles passent près du Soleil. Lorsqu'ils calculent leur trajectoire, ils ont souvent l'impression que les comètes décrivent une trajectoire hyperbolique, ouverte (a). Un calcul plus précis, qui tient compte des planètes (en particulier de Jupiter, la planète la plus massive), montre que les orbites sont en réalité elliptiques (b). L'orbite change de forme à chaque passage dans le Système solaire interne.



4. DES FORCES DE MARÉE déforment le nuage de Oort. Ces forces résultent d'une décroissance de la force de gravitation avec la distance. Le bulbe central de notre Galaxie – une concentration d'étoiles au centre de la structure spirale de la Voie lactée – tire plus sur le côté proche du nuage de Oort (il n'est pas à l'échelle sur ce schéma) que sur le côté éloigné. Le plan galactique exerce une force similaire dans une direction différente. Les marées galactiques sont analogues aux marées océaniques, dues à la Lune, qui attire plus le côté de la Terre le plus proche d'elle que le côté opposé.

astronomiques tous les 400 millions d'années. Les comètes proches de la trajectoire de l'étoile sont éjectées dans l'espace interstellaire, et les comètes qui restent dans le nuage sont puissamment perturbées.

Bien que les rencontres avec des étoiles n'aient pas d'effets directs sur les planètes – la distance la plus proche entre le Soleil et une étoile, au cours de toute l'histoire du Système solaire, est estimée à 900 unités astronomiques –, elles pourraient avoir des conséquences indirectes dévastatrices. En 1981, Jack Hills, du Laboratoire de Los Alamos, a calculé que le passage d'une étoile à proximité du Système solaire aurait pu causer des extinctions d'espèces sur la Terre, en déclenchant une «pluie» de comètes. En 1985, j'ai repris ce problème avec mon collègue Piet Hut. Selon nos simulations numériques, la fréquence des passages cométaires, durant une pluie cométaire, serait 300 fois supérieure à la normale. Les pluies cométaires dureraient deux à trois millions d'années.

Récemment Kenneth Farley et ses collègues de l'Institut de technologie de Californie ont retrouvé des indices d'une telle pluie cométaire. En utilisant l'hélium 3 comme traceur de la matière extraterrestre, ils ont analysé l'accumulation de poussières interplanétaires dans les sédiments océaniques au cours

du temps. Cette accumulation reflète le nombre de comètes qui traversent la région planétaire, car chaque comète perd de la poussière sur son chemin. K. Farley a découvert que la fréquence des passages cométaires s'est brusquement accrue à la fin de l'Éocène, il y a 36 millions d'années, et a diminué lentement pendant deux ou trois millions d'années, conformément aux prédictions des modèles de pluies cométaires. La fin de l'Éocène correspond à une extinction biologique modérée, et plusieurs cratères d'impact ont été datés de cette époque. Les géologues ont également trouvé d'autres traces d'impacts dans les sédiments terrestres, comme des couches d'iridium et des microtectites (des roches terrestres fondues et dispersées par l'impact des comètes).

La Terre est-elle menacée par une averse de comètes ? Apparemment, non. Avec des collègues, nous avons utilisé les positions et les vitesses des étoiles, mesurées

par le satellite *Hipparcos* pour déterminer les trajectoires des étoiles dans le voisinage du Système solaire. Nous avons ainsi calculé qu'une étoile est passée près du Soleil au cours du dernier million d'années. Le prochain passage proche d'une étoile se produira dans 1,4 million d'années : la petite

étoile Gliese 710 traversera le nuage de Oort, à environ 70 000 unités astronomiques du Soleil. À cette distance, Gliese 710 pourrait augmenter de 50 pour cent la fréquence des passages cométaires dans le Système solaire interne : il y aura quelques gouttes de pluie, mais pas une averse.

Toutefois, les passages d'étoiles à proximité du Soleil ne sont pas les seules perturbations du nuage de Oort. D'une part, le nuage est suffisamment grand pour qu'il ressente les forces de marée engendrées par le disque de la Voie Lactée et, dans une moindre mesure, par le bulbe galactique. Ces

Comètes et nébuleuse solaire

Les comètes, composées à 80 pour cent d'eau, contiennent des molécules très volatiles comme le monoxyde de carbone (CO) ou le sulfure d'hydrogène (H_2S). Elles n'ont pu se condenser qu'à des températures très basses, au plus quelques dizaines de degrés au-dessus du zéro absolu ($-273,15^\circ C$). Les astronomes se demandent si elles ont piégé intacts les grains du nuage protosolaire ou si leur matière a perdu la mémoire de ses origines interstellaires en subissant des transformations profondes dans la nébuleuse solaire, suite à son échauffement. Ces deux hypothèses extrêmes prédisent des compositions différentes et se réfèrent à des schémas de formation du Système solaire différents.

La proportion du deutérium (D), l'un des isotopes de l'hydrogène, fournit des indices sur l'origine des glaces cométaires. L'eau deutérée (HDO) a été découverte pour la première fois dans la comète de Halley, à l'aide de la sonde *Giotto*. Elle a été directement détectée à partir du sol dans les deux comètes brillantes qui ont illuminé notre ciel en 1996 et 1997 : la comète Hyakutake, qui est passé à seulement 15 millions de kilomètres de la Terre en mars 1996, et l'exceptionnelle comète Hale-Bopp, dont l'activité fut dix fois supérieure à celle de la comète de Halley, en mars et en avril 1997. La quantité de deutérium par rapport à l'hydrogène dans l'eau cométaire est dix fois supérieure à celle de l'hydrogène moléculaire (H_2) de la nébuleuse solaire. Un tel enrichissement s'explique par une chimie interstellaire à basse température. Des enrichissements similaires sont d'ailleurs observés dans le milieu interstellaire. Les modèles chimiques prédisent alors des enrichissements supérieurs dans l'acide cyanhydrique HCN. C'est ce qui est effectivement observé dans Hale-Bopp : des observations dans le domaine radio ont permis la détection de l'acide cyanhydrique deutéré DCN.

Les analogies entre la composition des glaces cométaires et celle des glaces interstellaires plaident également pour la première hypothèse. Les grains interstellaires dans les régions de formation d'étoiles sont constitués d'un cœur de silicates recouvert d'un manteau de glaces et de composés organiques plus ou moins volatils. Le télescope spatial infrarouge ISO, de l'Agence spatiale européenne, identifie une dizaine de composés simples dans les glaces interstellaires, comme l'eau, le monoxyde et le dioxyde de carbone, le méthane et le méthanol, dont les proportions par rapport à l'eau sont analogues aux proportions mesurées dans les comètes.

Par ailleurs, plus d'une dizaine de nouvelles molécules, la plupart organiques, ont été découvertes dans

les atmosphères cométaires par des observations dans le domaine radio et infrarouge et, au total, une vingtaine de molécules sont maintenant identifiées dans les comètes. À cette liste, il convient d'ajouter une trentaine d'atomes, de radicaux ou d'ions. La plupart des molécules proviennent des glaces du noyau cométaire chauffé par le Soleil.

La proportion de ces molécules par rapport à l'eau, le composant majoritaire des comètes, varie entre quelques dix millièmes et quelques pour cent. Ces molécules, dont certaines comprennent jusqu'à huit atomes, sont observées en quantité dans la phase gazeuse de certaines régions chaudes du milieu interstellaire à proximité des étoiles jeunes ou en formation, où les glaces présentes dans les grains ont été relâchées dans le milieu ambiant. À l'exception de quelques molécules soufrées, qui sont sujettes à une chimie complexe dans le milieu interstellaire, la composition gazeuse des comètes et celle des régions chaudes du milieu interstellaire sont très similaires.

La composition des grains de poussières des atmosphères cométaires, la phase réfractaire du noyau (dont la température de sublimation est bien supérieure à celle de la phase volatile), est moins bien connue. Les mesures *in situ* des sondes *Giotto* et *Vega* ont révélé deux grandes catégories de grains dans la comète de Halley : des grains organiques, dénommés CHON, très riches en carbone, hydrogène, oxygène et azote, et des grains minéraux constitués de silicates et de métaux. Cette double structure s'apparente à celle des grains interstellaires.

Les grains CHON contiennent des hydrocarbures aromatiques polycycliques, abondants dans le milieu interstellaire. Toutefois, la nature des silicates cométaires, révélée récemment par le satellite ISO dans la comète Hale-Bopp, soulève des interrogations. Une fraction de ces silicates est constituée d'olivine cristalline, riche en magnésium, que l'on rencontre dans les volcans terrestres. Des silicates de même nature sont aussi observés dans les disques circumstellaires de certains systèmes planétaires en formation. Or, les silicates cristallins se forment à des températures supérieures à $1\ 000^\circ C$. Ainsi, les comètes auraient incorporé à la fois des matériaux synthétisés dans le milieu interstellaire froid, et d'autres provenant de la nébuleuse interne, plus chaude. Comment? Le mystère demeure.

Dominique BOCKELÉE-MORVAN
Observatoire de Paris, Section de Meudon

marées se produisent, parce que le Soleil et une comète du nuage sont à des distances légèrement différentes du plan médian du disque ou du centre galactique. L'attraction gravitationnelle sur ces deux corps diffère donc légèrement, d'où l'effet de marée (voir la figure 4). Les marées contribuent à alimenter la région planétaire en nouvelles comètes à longue période.

D'autre part, des nuages moléculaires géants, dans la Galaxie, peuvent perturber le nuage de Oort. Ces nuages massifs d'hydrogène froid, les lieux de naissance des étoiles et des systèmes planétaires, sont 100 000 fois à un million de fois plus massifs que le Soleil. Lorsque le Système solaire s'approche d'un de ces nuages, les perturbations gravitationnelles arrachent des comètes à leurs orbites et les catapultent dans l'espace interstellaire. Ces rencontres sont peu fréquentes : environ une fois tous les 300 à 500 millions d'années. Au cours de l'histoire du Système solaire, l'effet cumulé des nuages moléculaires est équivalent à l'effet de tous les passages proches d'étoiles.

Un cœur dense

Trois grandes questions préoccupent aujourd'hui les astronomes qui étudient le nuage de Oort. D'abord, quelle est la structure du nuage ? En 1987, Scott Tremaine, à Princeton, Martin Duncan, dans l'Ontario, et Thomas Quinn, à Washington, ont étudié comment des perturbations stellaires et des nuages moléculaires répartissent les comètes dans le nuage de Oort. En raison des perturbations, les comètes périphériques du nuage sont rapidement perdues, soit dans l'espace interstellaire, soit dans le Système solaire interne. Cependant, un cœur dense de comètes, au plus profond du nuage de Oort, semble alimenter lentement la zone périphérique du nuage.

Les astronomes ont également montré que, lorsque les comètes tombent du nuage de Oort dans le Système solaire interne, leurs inclinaisons orbitales sont conservées. C'est pourquoi les astronomes pensent aujourd'hui que c'est de la ceinture de Kuiper, et non du nuage de Oort, qu'émanent les comètes joviennes de faible inclinaison. Le nuage de Oort, lui, est la source la plus probable de comètes d'incli-

naison supérieure et de période intermédiaire, comme celles de Halley et de Swift-Tuttle. Elles furent sans doute jadis des comètes à longue période, que les planètes ont ramenées sur des orbites de période plus courte.

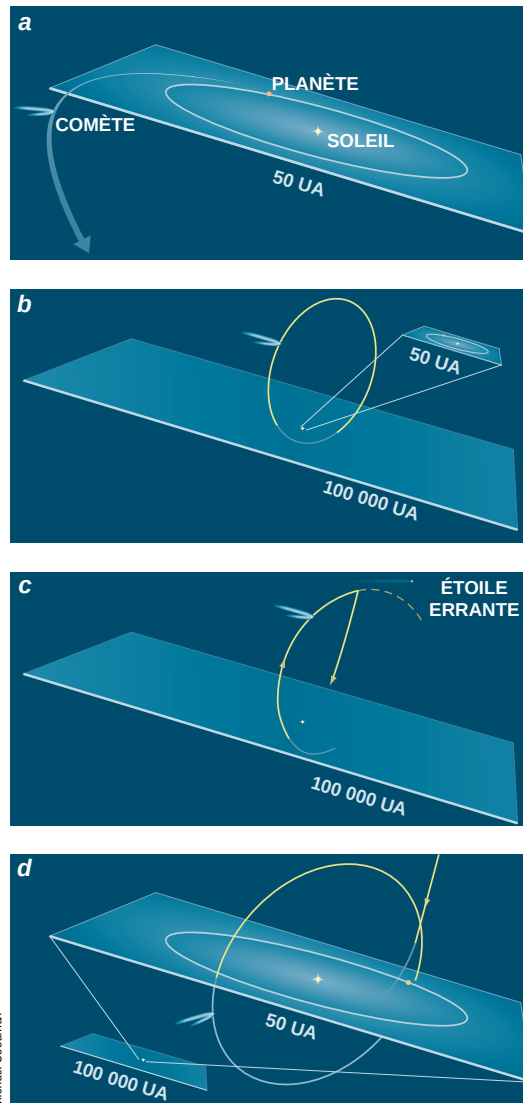
Deuxièmement, combien le nuage de Oort comprend-il de comètes ? Les astronomes fondent leurs estimations sur la fréquence à laquelle les comètes s'échappent vers le Système solaire interne. Pour expliquer le nombre observé de comètes à longue période,

ils supposent que le nuage contient six mille milliards de comètes, qui sont sans doute les corps célestes les plus nombreux du Système solaire. Seul un sixième de ces comètes est dans le nuage externe, dynamiquement actif, décrit initialement par Oort. Le reste occupe le cœur dense de ce nuage. Ainsi, en estimant la masse moyenne d'une comète à 40 milliards de tonnes, la masse totale de la matière cométaire dans le nuage de Oort serait 40 fois la masse de la Terre.

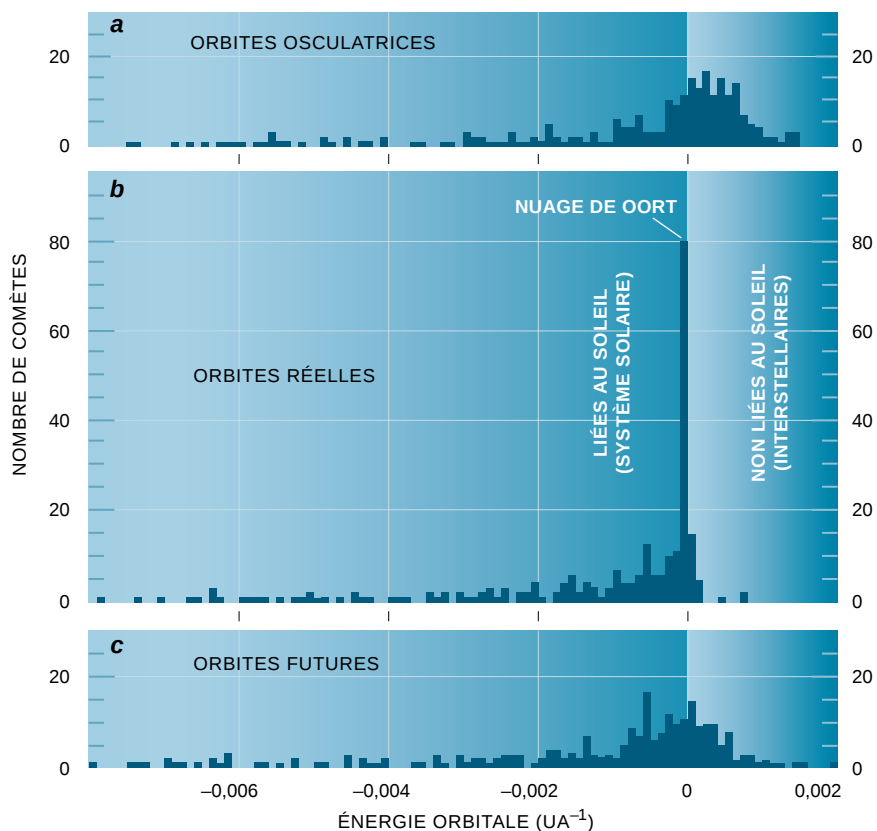
Troisièmement, d'où viennent les comètes du nuage de Oort ? Elles n'ont pas pu se former là où elles résident aujourd'hui, car, à ces distances, la matière est trop éparse pour se condenser. La capture de comètes par le Soleil n'étant pas un mécanisme très efficace, elles n'ont pu naître dans l'espace interstellaire. Le seul lieu de gestation possible est le système planétaire. Selon Oort, les comètes furent créées dans la ceinture des astéroïdes (entre les orbites de Mars et de Jupiter) et éjectées par les planètes géantes pendant la formation du Système solaire. Toutefois, les comètes sont des corps glacés, comme de grosses boules de neige sale, et la ceinture des astéroïdes était trop chaude pour que des glaces puissent se condenser.

En 1951, un an après la publication de l'article de Oort, Gerard Kuiper proposa que les comètes se condensent plus loin du Soleil, parmi les planètes géantes (la ceinture de Kuiper, située dans le plan de l'écliptique au-delà des planètes géantes, porte son nom, car il suggéra que certaines comètes se forment au-delà des orbites planétaires les plus lointaines). Les comètes naquirent probablement à travers toute la zone des planètes géantes, mais les astronomes supposèrent d'abord que les comètes proches de Jupiter et de Saturne, les deux planètes les plus massives, auraient été éjectées dans l'espace interstellaire plutôt que dans le nuage de Oort ; Uranus et Neptune, moins massives, auraient plus difficilement éjecté des comètes sur des trajectoires d'échappement.

Des études dynamiques plus récentes font douter de cette théorie : Jupiter et, surtout, Saturne



5. L'HISTOIRE D'UNE COMÈTE À LONGUE PÉRIODE commence avec sa formation près des planètes et son éjection par les planètes sur une orbite plus longue (a). Là, la comète est soumise aux forces gravitationnelles d'étoiles errantes et de nuages moléculaires géants, ainsi qu'aux forces de marée du disque et du bulbe galactiques. Ces forces inclinent aléatoirement le plan orbital de la comète et allongent progressivement son orbite (b). À une distance supérieure à 20 000 unités astronomiques (20 000 fois la distance Terre-Soleil), diverses influences extérieures renvoient parfois la comète vers les planètes (c). Dès que la comète revient dans le Système solaire interne, les planètes peuvent la guider sur une nouvelle orbite, de sorte qu'elle apparaît régulièrement (d).



6. L'ÉNERGIE ORBITALE des comètes à longue période connues révèle le nuage de Oort. Les astronomes calculent d'abord les orbites osculatrices des comètes, c'est-à-dire les orbites qu'elles suivraient si leurs mouvements étaient entièrement déterminés par l'attraction gravitationnelle du Soleil (l'énergie orbitale est inversement proportionnelle au demi-grand axe de l'orbite et s'exprime en inverse de l'unité astronomique, UA⁻¹). Un tiers de ces orbites a une énergie positive, associée à une orbite hyperbolique : les objets correspondants semblent avoir une origine interstellaire (a). Toutefois, quand on prend en compte l'influence des planètes, on calcule que l'énergie de la plupart des comètes est légèrement négative : les comètes ont une orbite elliptique et elles semblent provenir des confins du Système solaire (b). Quelques comètes conservent une énergie positive, après ces corrections, mais leur origine interstellaire apparente résulte probablement d'erreurs d'observation. Sous l'action conjointe des planètes et du Soleil, certaines comètes retournent vers le nuage de Oort, d'autres quittent le Système solaire et d'autres encore reviendront visiter le Système solaire interne (c).

envoient une proportion notable de leurs comètes dans le nuage de Oort. Bien que cette proportion soit peut-être inférieure à celle qui a été envoyée par Uranus et par Neptune, elle peut avoir été compensée par la quantité de matière supérieure initialement présente dans les zones des planètes plus massives.

Si les comètes du nuage de Oort ont été formées à des distances variées du Soleil, les températures de leur formation ont différé. Ainsi s'expliquerait en partie la diversité de composition observée parmi les comètes. En effet, des travaux récents ont indiqué que le nuage de Oort contient même des astéroïdes de la région des planètes intérieures. Ces objets, constitués de roches plutôt que de glaces, représenteraient deux à trois pour cent de la population totale du nuage de Oort.

Ces idées sont toutes fondées sur la présence des planètes géantes, qui catapultent les comètes vers l'extérieur et modifient leurs orbites lorsqu'elles reviennent dans la région planétaire. Si d'autres étoiles possèdent des planètes géantes, comme le suggèrent les observations de ces dernières années, elles ont peut-être également des nuages de Oort. Si ces étoiles et leur cortège de comètes passent près du Soleil, les nuages pourraient s'interpénétrer. Même ainsi, les collisions entre comètes seront rares, parce que la distance moyenne entre comètes est d'au moins une unité astronomique.

Les nuages de Oort autour des étoiles autres que le Soleil laissent peut-être échapper des comètes dans le milieu interstellaire. Des comètes interstellaires qui passeraient près du Soleil seraient facilement reconnaissables en

raison de leur vitesse bien supérieure à celle des comètes de notre nuage de Oort. Aucune comète interstellaire de ce type n'a encore été détectée, mais ce n'est guère surprenant : le Système solaire est une cible minuscule dans l'immensité de l'espace interstellaire, et la probabilité qu'une comète interstellaire soit passée dans le Système solaire interne au cours des derniers siècles est au mieux de un demi.

Le nuage de Oort continue à fasciner les astronomes. Grâce à la mécanique céleste, la nature a préservé dans ce lointain réservoir un échantillon du matériau qui a formé le Système solaire. En étudiant la dynamique de ce réservoir et la composition chimique des comètes qui en sortent, les astronomes comprennent mieux l'origine du Système solaire.

Plusieurs missions spatiales d'étude des comètes sont en préparation. La sonde *Stardust*, qui sera lancée l'an prochain, traversera la chevelure de la comète Wild 2, recueillera des échantillons de poussière cométaire et les rapportera sur Terre. Quelques années plus tard, l'engin *CONTOUR* survolera trois comètes et comparera leurs compositions. La mission *Deep Space 4/Champlion* enverra un orbiteur et un module d'atterrissage sur la comète Tempel 1, et la mission *Rosetta* fera de même pour la comète Wirtanen. Le prochain millénaire sera celui de l'étude des comètes.

Paul WEISSMAN est astronome au Laboratoire pour la propulsion spatiale (JPL), à Pasadena (Californie).

Donald K. YEOMANS, *Comets : A Chronological History of Observation, Science, Myth and Folklore*, John Wiley & Sons, 1991.

Comets in the Post-Halley Era, sous la direction de Ray L. Newburn, Jr., Marcia Neugebauer et Jürgen Rahe, Kluwer Academic Publishers, 1991.

Julio A. FERNANDEZ, *Dynamics of Comets : Recent Developments and New Challenges*, in *Asteroids, Comets, Meteors 1993 : Proceedings of the 160th Symposium of the International Astronomical Union*, sous la direction de A. Milani, M. Di Martino et A. Cellino, Kluwer Academic Publishers, 1994.

Completing the Inventory of the Solar System, sous la direction de Terrence W. Rettig et Joseph M. Hahn, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 107, 1996.

