

Michael Goodman

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 osculatrices 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.»

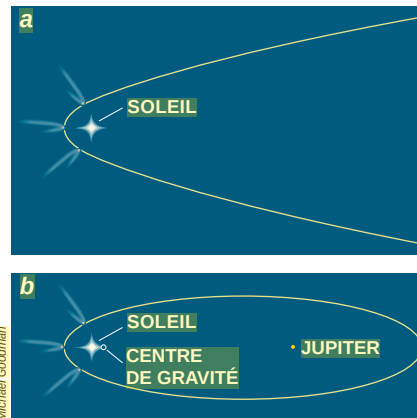
À l'issue de ses calculs, Oort observa que quelques comètes pouvaient provenir de l'espace interstellaire, mais il supposa que ces exceptions n'en étaient pas réellement : leurs orbites différaient, parce qu'elles étaient trop imprécisément connues ou que leur mouvement était perturbé par l'éjection 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

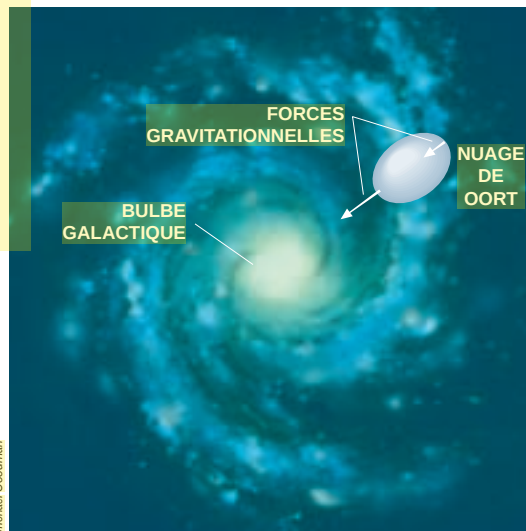
La perspicacité de Oort était remarquable : non seulement ces idées étaient exactes, mais il les obtint alors qu'il ne disposait que de 19 orbites bien mesurées. Aujourd'hui, les astronomes ont 15 fois plus de données. Ils savent que les comètes à longue période qui arrivent dans la région planétaire 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