

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.»

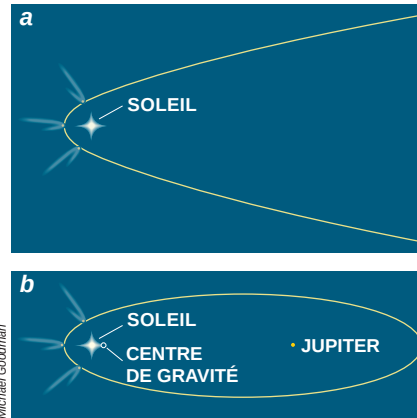
À l'issue de ses calculs, Oort observa que quelques comètes pouvaient provenir de l'espace interstellaire, mais il supposa que ces exceptions n'en étaient pas réellement : leurs orbites différaient, parce qu'elles étaient trop imprécisément connues ou que leur mouvement était perturbé par l'éjection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

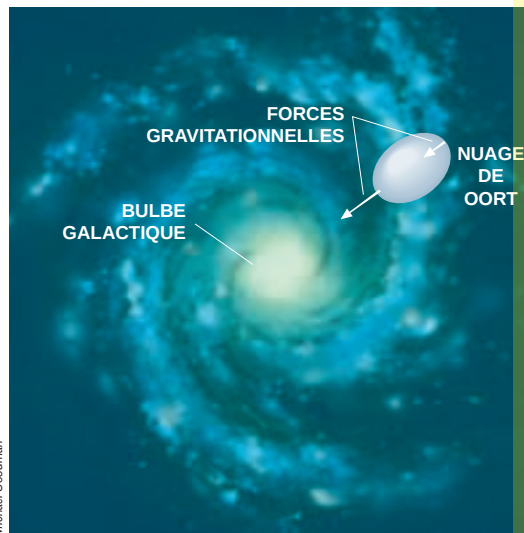
La perspicacité de Oort était remarquable : non seulement ces idées étaient exactes, mais il les obtint alors qu'il ne disposait que de 19 orbites bien mesurées. Aujourd'hui, les astronomes ont 15 fois plus de données. Ils savent que les comètes à longue période qui arrivent dans la région planétaire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