

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.

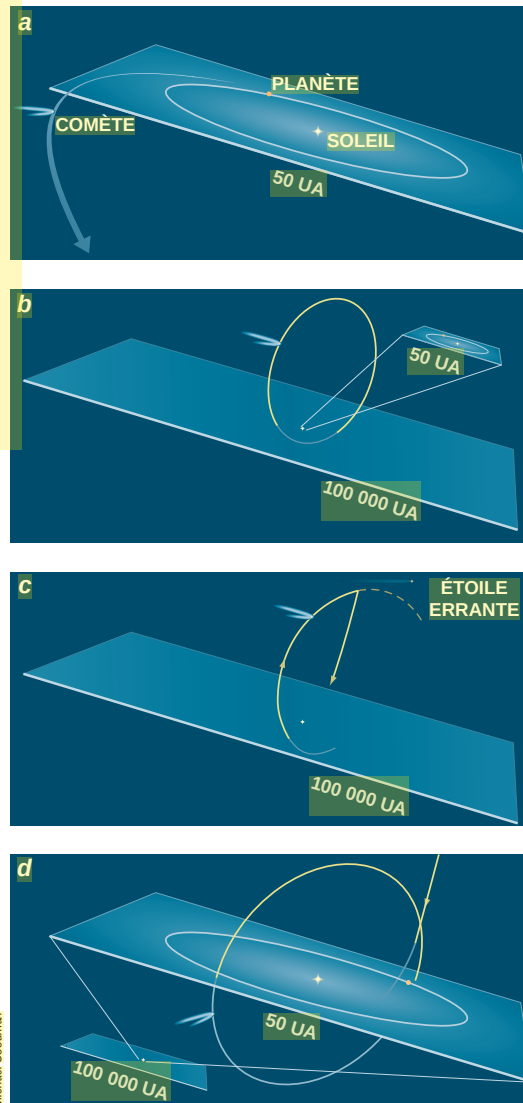
Deuxièmement, combien le nuage de Oort comprend-il de comètes ? Les astronomes fondent leurs estimations sur la fréquence à laquelle les comètes s'échappent vers le Système solaire interne. Pour expliquer le nombre observé de comètes à longue période,

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.

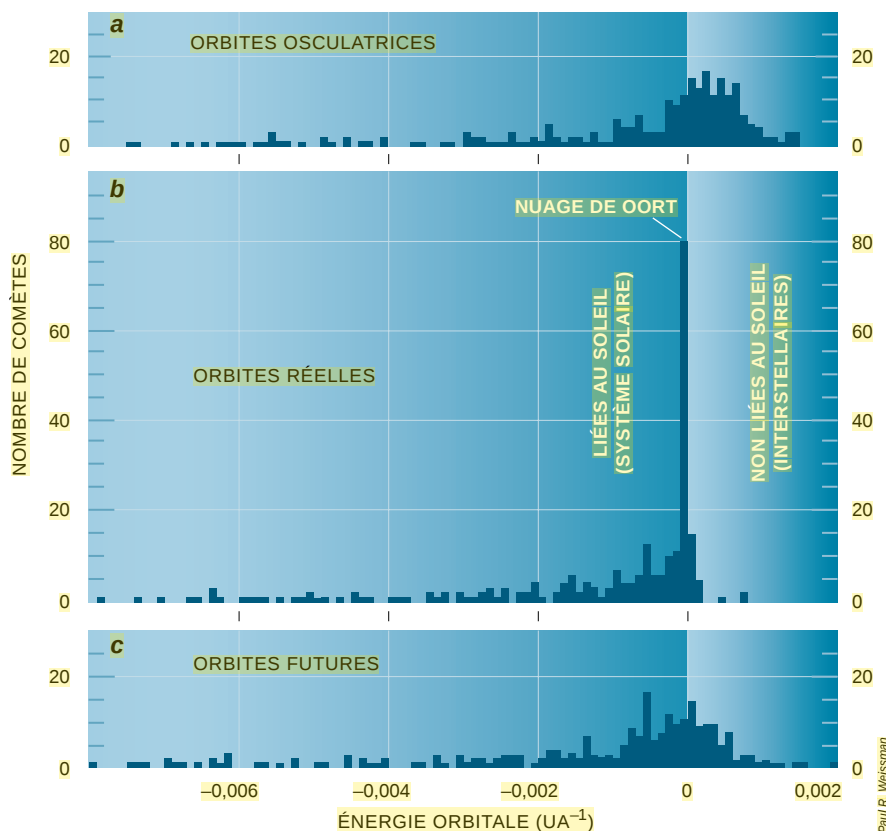
Troisièmement, d'où viennent les comètes du nuage de Oort ? Elles n'ont pas pu se former là où elles résident aujourd'hui, car, à ces distances, la matière est trop éparse pour se condenser. La capture de comètes par le Soleil n'étant pas un mécanisme très efficace, elles n'ont pu naître dans l'espace 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.