

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