

Y A-T-IL DE L'EAU PARTOUT DANS L'UNIVERS ?

ANNY-CHANTAL LEVASSEUR-REGOURD
Professeur UPMC (Université Paris 6) / LATMOS-IPSL

LES PORTEUSES D'EAU

“La nébulosité, dont les comètes sont presque toujours environnées, paraît être formée de vapeurs que la chaleur solaire élève de leur surface. On conçoit, en effet, que la grande chaleur qu'elles éprouvent vers leur périhélie doit raréfier les matières condensées par le froid qu'elles éprouvaient à leur aphélie.”

Pierre Simon, marquis de Laplace,
Exposition du système du monde, livre V, 1796

PREMIÈRES MISES EN ÉVIDENCE DE L'EAU COMETAIRE

Les belles comètes ont de tout temps frappé les imaginations, même si leurs propriétés sont longtemps restées accessibles. L'étude de leurs orbites, initialisée par Edmund Halley au XVII^e siècle, a montré qu'elles décrivent autour du Soleil des ellipses, susceptibles d'être très allongées et fortement inclinées par rapport à l'écliptique. Les progrès de l'astrophysique ont, au milieu du XX^e siècle, permis de concevoir qu'elles sont essentiellement constituées d'un noyau solide de glaces et de poussières. Lorsqu'il se rapproche du Soleil, des glaces se vaporisent partiellement sur son côté ensoleillé ; pour la glace d'eau dans le vide interplanétaire, la sublimation se produit à une température supérieure à -70° , atteinte dès que la distance au Soleil est inférieure à quelque 3 unités astronomiques (ua). Ce sont d'ailleurs les faibles modifications orbitales non gravitationnelles, induites par l'éjection de matière du côté ensoleillé des noyaux, qui ont permis à l'astronome américain Fred Whipple de prédire leur existence en 1950 et de les qualifier d'énormes boules de neige sale.



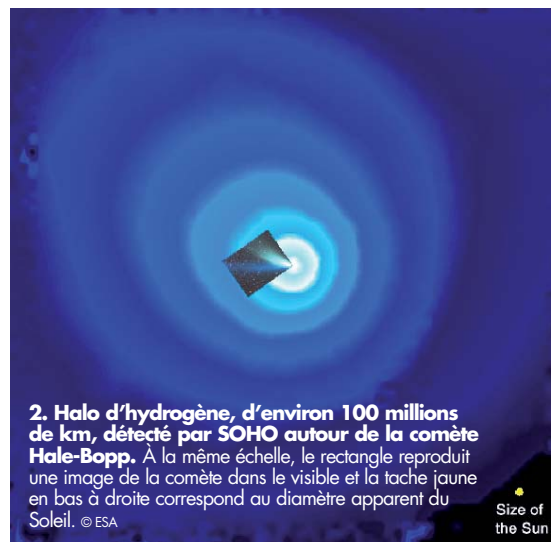
Hale-Bopp en avril 1997. Alors que cette comète spectaculaire passait au voisinage de son périhélie, environ 300 tonnes d'eau s'échappaient par seconde de son noyau.

La vapeur d'eau, et plus généralement l'ensemble des gaz et poussières éjectés, constitue une vaste chevelure lumineuse (encore appelée coma) approximativement sphérique, qui enveloppe le noyau et le rend invisible à l'observateur terrestre. Les poussières, lentement repoussées par la pression du rayonnement solaire, forment une queue de poussières qui a l'aspect d'un panache blanchâtre et tourne sa concavité vers l'arrière de l'orbite. Les molécules gazeuses, rapidement photo-ionisées par le rayonnement solaire énergétique, sont repoussées par le vent solaire pour former une queue de plasma bleutée, susceptible de s'étirer sur des millions de kilomètres (fig. 1).

E. Kolmhofer, H. Raab, Johannes-Kepler-Observatory, Linz, Austria

La présence d'eau dans les comètes a été indirectement établie au tout début des années 1970. Ainsi, au Service d'aéronomie du CNRS, Jacques Blamont a pu, après avoir obtenu de la Nasa la possibilité d'orienter le satellite OGO-5 (Orbiting Geophysical Observatory 5) en direction de la comète C/1969 Y1 Bennett (1), mettre en évidence une émission intense de la raie Lyman- α de l'hydrogène dans un vaste halo qui s'étend sur des millions de kilomètres autour de la chevelure. Ce halo d'hydrogène provient des molécules d'eau (H_2O) photo-dissociées peu après leur éjection du noyau, en hydrogène atomique (H) et hydroxyle (OH). Ce phénomène, commun à toutes les comètes, est détectable en orbite circumterrestre, là où le rayonnement ultraviolet à 121,6 nm, la longueur d'onde de la raie Lyman- α de l'hydrogène, n'est pas bloqué par l'atmosphère.

Le taux de production en eau des comètes se déduit de telles observations. Il varie de quelque 3 kg/s pour une comète peu active à environ 300 t/s pour une comète extrêmement active comme C/1995 O1 Hale-Bopp. Des images spectaculaires du halo d'hydrogène de cette belle comète ont été obtenues par le satellite SOHO (SOlar and Heliospheric Observatory), alors qu'elle passait dans le Système solaire interne en 1996-1997 (fig. 2). Les taux de production en eau impliquent qu'une comète brillante, dont le noyau a une taille d'environ 10 km,

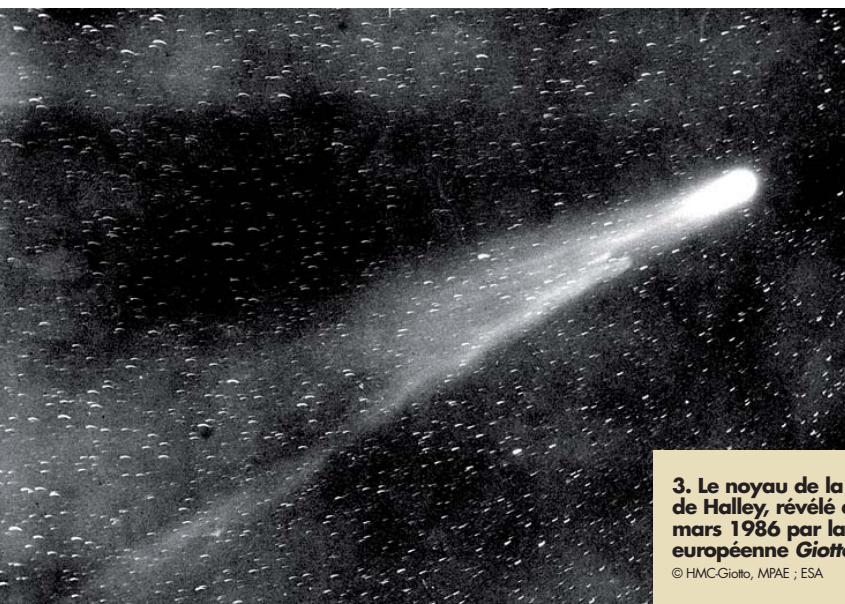


2. Halo d'hydrogène, d'environ 100 millions de km, détecté par SOHO autour de la comète Hale-Bopp. À la même échelle, le rectangle reproduit une image de la comète dans le visible et la tache jaune en bas à droite correspond au diamètre apparent du Soleil. © ESA

Size of the Sun

À LA POURSUITE DE L'EAU DANS LES COMÈTES

Le retour de la célèbre comète de Halley, en 1985-1986, a marqué le début de l'exploration locale des comètes, avec les premières missions de survol, en particulier celle de *Giotto*, la sonde spatiale de l'Esa (European Space Agency) qui n'est alors passée qu'à 600 km du noyau. Les images de la caméra embarquée (fig. 3) ont révélé un objet irrégulier et noirâtre de quelque 18 km de long, d'où s'échappaient des gaz entraînant dans leur sillage des poussières de silicates et polymères organiques très sombres. Des comparaisons entre les données de la sonde optique et de l'analyseur d'impact nous ont d'ailleurs permis d'établir que ces poussières étaient extrêmement poreuses. Pour en revenir à l'eau, il s'est avéré que c'était bien le composant gazeux majoritaire dans la chevelure ; les deux composants les plus abondants après l'eau étaient le monoxyde de carbone (CO) avec une abondance relative à l'eau de l'ordre de 23 % en masse, et le dioxyde de carbone (CO_2) avec une



3. Le noyau de la comète de Halley, révélé en mars 1986 par la sonde européenne Giotto.

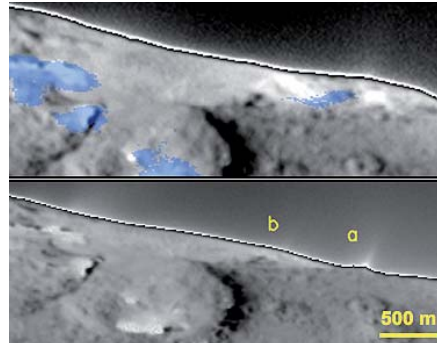
© HMC-Giotto, MPAE ; ESA

perd en moyenne une couche de 1 m d'épaisseur à chacun de ses passages dans le Système solaire interne. Il résulte de cette usure qu'un noyau doit disparaître après quelques milliers de passages à son périhélie, et même moins s'il subit des fragmentations. Les comètes aujourd'hui observables se sont accrétées à partir de glaces et de poussières lentement formées dans le milieu interstellaire, au-delà de la "ligne des glaces" dans le Système solaire primitif, et sont restées stockées loin du Soleil pendant des milliards d'années. Ce n'est que dans les années 1980 que la détection directe de molécules d'eau cométaire, rapidement photo-dissociées et présentant essentiellement des bandes de fluorescence dans l'infrarouge, a été possible. Pour les identifier sans ambiguïté par spectroscopie, il a fallu en effet attendre des observations de la comète 1P/Halley dans l'infrarouge proche (au voisinage de 2,6 μ m) depuis le KAO (Kuiper Airborne Observatory), une plateforme aéroportée de la Nasa.



abondance relative de l'ordre de 6%. Le résultat le plus remarquable fut apporté par les analyses indépendantes de deux spectromètres de masse, qui révélèrent que le rapport D/H du deutérium à l'hydrogène dans l'eau de la comète était de l'ordre de 0,32 millième ; cette valeur est deux fois supérieure à celle mesurée dans les océans terrestres et correspond à un enrichissement d'un facteur 15 par rapport au nuage protosolaire. Un tel rapport est compatible avec la formation de la glace d'eau dans un nuage interstellaire froid, encore qu'il semble peu probable que ce matériau n'ait pas été altéré dans la nébuleuse protosolaire. Des valeurs comparables, quoi que moins précises, ont été obtenues à partir d'observations spectroscopiques à distance de deux comètes fort actives à la fin du XX^e siècle, à savoir C/1995 O1 Hale-Bopp dont il a déjà été question et C/1996 B2 Hyakutake ; ces deux comètes proviennent très probablement, tout comme Halley, du nuage de Oort. En revanche, le rapport n'est pas encore connu pour les comètes à courte période et faible inclinaison, qui ne se sont pas initialement formées dans la même région que la comète de Halley (voir aussi, à ce propos, l'article de T. Encrenaz).

Depuis le début des années 2000, de nouvelles missions spatiales ont fait progresser notre connaissance des noyaux cométaires. La mission américaine Deep Impact vers la



4. Séquence de deux gros plans du noyau de Tempel 1, immédiatement avant la chute de l'impacteur. Sur le cliché du haut, les plaques de glace sont surlignées en bleu ; sur le cliché du bas, alors que le noyau a tourné autour de son axe, des jets de vapeur et de poussière sont détectables au voisinage des plages de glace qui arrivent sur l'horizon.
Farnham et al

comète 9P/Tempel 1 a en particulier permis d'obtenir en 2005 des images mettant en évidence des glaces en surface (fig. 4). Des jets deviennent visibles sur l'horizon quand ces zones s'en rapprochent, sous l'effet de la rotation du noyau. Après la chute de l'impacteur, induisant une excavation d'une partie de la surface de Tempel 1, un panache de vapeur et de poussières s'est développé ; l'analyse des spectres enregistrés par le spectrographe infrarouge embarqué suggère que, en dessous d'un mètre de profondeur, là où l'isolation thermique est suffisante, de la glace d'eau est largement présente, sous forme de petites particules d'une taille de l'ordre du micromètre.

Au-delà de ces observations, il convient de remarquer que la définition même du mot comète présente quelque ambiguïté. À l'origine, le mot désignait un astre identifiable par sa chevelure diffuse et ses queues allongées. Pourtant, un objet aussi spectaculaire (fig. 5) que celui qui a été découvert en janvier 2010 par le système de détection automatique LINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research) n'a rien d'une comète, puisqu'il s'agit probablement d'un astéroïde d'une taille de l'ordre de 150 mètres ayant subi un impact violent qui a induit la formation d'une longue queue de poussières.

Depuis le début des années 2000, de nouvelles missions spatiales ont fait progresser notre connaissance des noyaux cométaires.

5. Image de l'objet P/2010 A2 (découvert par LINEAR le 6 janvier 2010) obtenue à la fin janvier par le télescope orbital Hubble. Malgré son aspect cométaire, la traînée résulte probablement de la collision entre deux astéroïdes. © crédits Nasa-ESA / D. Jewitt



6. La lumière zodiacale depuis le Paranal au Chili. Cette lumière provient de la diffusion de la lumière solaire sur les petites particules de poussières présentes dans le nuage interplanétaire, en grande partie repeuplé par les poussières éjectées des comètes. Leur concentration est maximale en direction du Soleil et de l'écliptique.

L'hypothèse de l'apport d'eau par les comètes dans le Système solaire interne a été confortée en 2009.

Aujourd'hui, le mot comète peut aussi désigner un noyau de glaces et de matériaux réfractaires, formé à l'origine du Système solaire à une distance au proto-Soleil supérieure à 4 ou 5 ua, là où des glaces interstellaires avaient pu subsister. En effet, des astéroïdes lointains ou même des objets de Kuiper sont susceptibles de devenir actifs et de s'entourer

d'une atmosphère passagère en se rapprochant du Soleil ; ce fut le cas pour Chiron, catalogué comme astéroïde lors de sa découverte en 1977, et désormais désigné comme la comète 95P/Chiron. À l'inverse, il existe des objets qui, telle la comète 107P/Wilson-Harrington après 1949, ne présentent plus aucune activité, parce que leur noyau est protégé du

rayonnement solaire par des poussières isolantes ou parce qu'il a totalement perdu ses glaces. Il existe même quelques comètes aux orbites quasi-circulaires dans la ceinture principale d'astéroïdes, telle 176P/Elst-Pizarro ; il est peut-être intéressant, à ce niveau, de remarquer que le rapport D/H d'objets situés dans la partie externe de la ceinture principale d'astéroïdes semble très voisin de celui des océans terrestres.

Finalement, l'hypothèse de l'apport d'eau par les comètes dans le Système solaire interne a été en quelque sorte confortée en 2009, avec la mission LCROSS (Lunar CRater Observation and Sensing Satellite). L'analyse spectrale des panaches induits par deux impacteurs le 9 octobre 2009 dans un cratère situé au voisinage du pôle Sud de la Lune a mis en évidence la présence d'eau et d'autres composés volatils, probablement apportés, dans ces régions toujours dans l'ombre, par des collisions de comètes ou autres petits corps glacés.

SCÉNARIO PROBABLE D'APPORT D'EAU PAR DES OBJETS DE TYPE COMÉTAIRE

Même s'il est délicat de généraliser à l'ensemble des objets cométaires les propriétés déduites des études de quelques rares comètes, les études menées jusqu'à présent permettent de proposer des hypothèses quant à l'évolution initiale des comètes et à leur rôle possible dans l'apport d'eau dans le Système solaire interne.

Les comètes, nous l'avons déjà évoqué, se sont condensées lors de la formation du Système solaire, à plus de 4 ua du Soleil, là où la température était assez basse pour que les glaces d'eau puissent subsister. Les comètes à courte période doivent essentiellement provenir de la ceinture de Kuiper qui s'étend au-delà de l'orbite de Neptune jusqu'à quelque 55 UA du Soleil ; l'existence de cette zone annulaire, suggérée indépendamment vers 1950 par Kenneth Edgeworth et Gerard Kuiper, a été confirmée en 1992, avec la détection directe du premier objet de Kuiper (à l'exception de Pluton) par David Jewitt. Les comètes à très longue période semblent provenir d'un vaste halo d'objets gravitant à quelque 40 000 ua du Soleil, appelé nuage de Oort en l'honneur de Jan Oort, l'astronome néerlandais qui proposa son existence en 1950 en étudiant les distances à l'aphélie et les inclinaisons des comètes à très longue période. Les perturbations gravitationnelles de planètes ou d'étoiles relativement proches sont ultérieurement susceptibles de décrocher certains noyaux de la ceinture de Kuiper ou du nuage de Oort ; ils peuvent alors plonger dans le Système solaire interne et devenir actifs en se rapprochant du Soleil. Les données relatives à la datation des cratères lunaires et l'élégant modèle

développé à l'observatoire de Nice vers 2005 suggèrent que le Système solaire a connu, après l'accrétion des planètes et petits corps, une phase de relative quiescence, avant que ne se déclenche, il y a environ 4 milliards d'années, une phase dite de **grand bombardement tardif**. Les quatre planètes géantes avaient pu se former, avec un disque massif de corps plus petits, entre 5 et 15 ua du Soleil. Sous l'effet des perturbations mutuelles de Jupiter et Saturne, Uranus et Neptune ont été susceptibles de migrer vers leurs orbites actuelles. Il en aurait résulté un important dépeuplement de ce disque, des petits corps étant éjectés du Système solaire, ou dispersés à ses confins extrêmes pour former le nuage de Oort, ou encore précipités dans le Système solaire interne, avec des flux peut-être des dizaines de milliers de fois plus élevés qu'aujourd'hui.

À cette époque, dans le jeune Système solaire fantastiquement agité, de très nombreuses comètes ont pu percuter les planètes telluriques, contribuant ainsi à l'apport d'eau dans leurs atmosphères primitives. Les poussières éjectées par les comètes ont dû constituer un formidable nuage interplanétaire dans le Système solaire interne. Autant dire que le discret phénomène lumineux, aujourd'hui connu sous le nom de lumière zodiacale (fig. 6), aurait été phénoménalement plus spectaculaire... s'il y avait eu des yeux pour l'admirer. Mais le fait remarquable est qu'une vie primitive existait déjà sur Terre à la fin du grand bombardement tardif, une vie exigeant la présence d'eau et de molécules carbonées complexes (lire à ce propos l'article de F. Raulin).

Il n'est d'ailleurs pas impossible que des molécules organiques d'origine cométaire soient parvenues indirectement, par le biais des poussières présentes dans un nuage interplanétaire, à la surface de la Terre ou d'autres planètes telluriques. Nous comprenons en effet aujourd'hui que ces molécules sont susceptibles de subsister dans le milieu interplanétaire et que leur structure poreuse, propice au transfert de chaleur, permet la survie d'une proportion significative d'entre elles dans leur traversée de l'atmosphère. Autant dire que l'étude des comètes permet d'appréhender les origines du Système solaire et de contribuer à l'étude des origines de la vie sur Terre.

EN SAVOIR PLUS...

Dans les prochains mois, en novembre 2010, Deep Impact, dans le cadre d'une nouvelle mission appelé EPOXI, effectuera des observations rapprochées de la comète 103P/Hartley 2. En 2011, Stardust survolera 9P/Tempel 1 ; cette nouvelle mission, appelée NEXT, lui permettra d'étudier les changements de morphologie du noyau

après une révolution complète autour du Soleil et de détecter peut-être le cratère produit par l'impact de 2005. Afin de mieux déchiffrer, telle une pierre de Rosette, nos origines, l'ambitieuse mission européenne Rosetta doit effectuer un rendez-vous de longue durée avec une comète, au cours duquel pourront – entre autres – être étudiés l'évolution du taux de production en eau et le rapport D/H de la glace du noyau. L'objectif est de rejoindre la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko à son aphélie et de sélectionner un site optimal pour déposer un mini-laboratoire sur son noyau, avant de continuer à étudier la chevelure interne, alors que la comète se rapproche du Soleil sur son orbite allongée. Pour qu'une sonde parvienne à naviguer de conserve avec une comète, elle doit l'approcher avec une vitesse relative négligeable, ce qui est techniquement faisable à l'aphélie d'une comète peu inclinée sur l'écliptique, typiquement une comète à courte période de la famille de Jupiter, telle Churyumov-Gerasimenko. Après le lancement réussi en mars 2004 depuis la



Guyane française, Rosetta a utilisé trois fois l'assistance gravitationnelle de la Terre et une fois celle de Mars pour monter jusqu'à son orbite finale, tout en survolant pendant sa phase de croisière deux astéroïdes assez exceptionnels, Steins en septembre 2008 et très prochainement (le 10 juillet 2010) Lutetia, avant son rendez-vous avec la comète en 2014.

Nous n'en sommes qu'aux débuts de l'exploration et de l'étude de ces petits corps glacés à la formidable diversité. Les prochaines découvertes nous permettront de mieux encore appréhender nos origines, concevoir l'évolution primitive du Système solaire et méditer sur celle des systèmes planétaires. Comme l'écrivait Armand Delsemme dans les années 1980, sensiblement avant que les premières exoplanètes ne soient découvertes : « *La multiplicité des étoiles simples suggère non seulement la multiplicité des systèmes planétaires, mais la multiplicité des planètes rocheuses qui ont reçu une couche superficielle tardive d'eau et de matières organiques, à la recherche d'un environnement favorable à l'éclosion de la vie. De là à dire qu'il y a multiplicité des formes de la vie dans l'Univers, il n'y a qu'un pas, que nous en pouvons pas encore franchir dans l'état actuel de notre ignorance...* »

A.-C. Levasseur-Regourd ■

(1) – Les comètes de période orbitale inférieure à deux siècles, observées au moins sur deux de leurs orbites, sont désignées par un nombre indiquant l'ordre de la détermination, suivi d'un "P" et d'un nom, par le passé celui de l'astronome qui a le premier calculé leur orbite, plus récemment celui des personnes qui les ont découvertes ou de l'instrument qui a révélé leur existence. Pour les autres comètes, la dénomination débute par un "C", suivi du millésime de l'année de la découverte, puis d'une lettre et d'un nombre permettant de retrouver la quinzaine de jours de la découverte et l'ordre dans cet intervalle, et enfin du ou des noms des découvreurs indépendants.

RÉFÉRENCES

Crovisier J. et Encrenaz T., *Les Comètes, témoins de la naissance du Système solaire*, Belin-CNRS, 1995.
 Delsemme, A., "Après le retour de la comète de Halley, la chimie et l'origine des comètes", In *Bulletin de la classe des sciences*, 5, LXXIV, 395-422, Académie royale de Belgique, Bruxelles, 1988.
 Festou M.C., Keller H.U., Weaver, H.A. (dir.), *Comets II*, University of Arizona Press, Tucson, 2004.
 Levasseur-Regourd A.-C. et de La Cotardière P., *Les Comètes et les astéroïdes*, Le Seuil, coll. "Points sciences", 1997.
 Levasseur-Regourd A.-C., Brahic A., Encrenaz T., Forget F., Ollivier M., Vauclair S., *Système solaire et planètes*, Ellipses, 2009.