

Les noyaux des comètes

Nicolas Biver, LESIA (Observatoire de Paris)

Les comètes sont au départ constituées d'un noyau cométaire, petit corps irrégulier du système solaire et renfermant des glaces, en orbite autour du Soleil. Sur une partie plus ou moins importante de son orbite, le noyau cométaire est inactif et se présente comme un astéroïde reflétant faiblement la lumière du Soleil. Sa dimension typique est de l'ordre du kilomètre. Cependant des objets de plusieurs centaines de kilomètres de diamètre comme les objets trans-neptuniens (jusqu'à Pluton ou Éris de 2 300 km de diamètre environ) pourraient devenir un jour des comètes si l'évolution de leur orbite les amenait plus près du Soleil.

Les noyaux cométaires sont des vestiges de la formation du système solaire. On estime qu'ils se sont formés assez tôt, dans le premier million d'années après l'allumage du Soleil au sein de la nébuleuse proto-planétaire. Au delà d'une distance de 3 à 5 UA du Soleil, là où Jupiter s'est formé, la température était suffisamment basse pour que l'eau se condense en glace. Les planétésimaux qui s'y sont formés renferment donc une grande quantité de glace mais aussi sans doute des matériaux issus des régions internes plus chaudes (silicates, matériaux réfractaires) ainsi que des régions extérieures plus froides. Les molécules qui proviennent des régions extérieures ont probablement été moins modifiées dans la nébuleuse proto-planétaire et révèlent davantage la composition initiale d'origine interstellaire. L'étude actuelle des comètes vise à connaître plus précisément l'origine des matériaux qui les composent.

Saturne, migrant d'abord vers le Soleil ("Grand Tack") puis s'en éloignant, vont déjà mélanger les objets riches en glace avec ceux formés plus près, pauvres en éléments volatils.

Pendant la centaine de millions d'années suivante, quand les planètes géantes finissent d'évoluer, une grande partie des planétésimaux glacés qui subsistaient dans leur voisinage vont être éjectés à grande distance dans toutes les directions de l'espace. Ces objets, pour ceux n'étant pas définitivement expulsés du système solaire, vont former le **nuage de Oort**, à une distance actuellement estimée de 30 000 à 50 000 ua du Soleil, à la limite de son influence gravitationnelle. Il s'agit d'une enveloppe sphérique autour du Soleil contenant de l'ordre de 10^{12} noyaux cométaires de plus de 5 km. Il est probable que ce « nuage » comporte aussi une partie interne à 10 000 ou 20 000 ua, stable à l'échelle du système solaire (4,6 milliards d'années) et qui aurait pu ré-alimenter sa composante externe plus sujette aux perturbations gravitationnelles extérieures. La majeure partie des noyaux cométaires qui le composent sont restés inaltérés là-bas depuis 4,5 milliards d'années. À l'occasion d'une perturbation due au passage d'une étoile voisine, lorsque le Soleil traverse une zone plus dense de la Voie Lactée (nuage moléculaire) ou suite aux effets de marée de la Galaxie, certains objets peuvent être précipités vers le Soleil et donner naissance à une comète, s'ils passent suffisamment près du Soleil. Ces comètes se caractérisent par une orbite d'inclinaison quelconque. Lorsqu'elles arrivent directement du nuage de Oort (et c'est ainsi que Jan H. Oort a proposé son existence dans les années cinquante), leur orbite est quasiment parabolique (excentricité proche de 1,000) avec une période de l'ordre de 1 à 10 millions d'années (aphélie dans le nuage de Oort). Très peu (environ 5 %) retournent dans le nuage de Oort du fait des perturbations gravitationnelles près

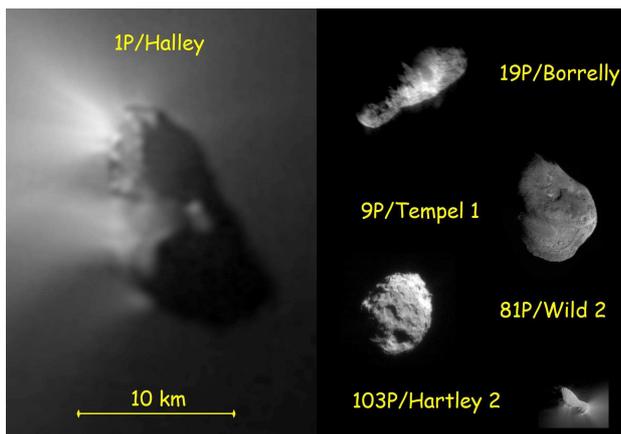


Fig.1. Noyaux cométaires imagés par des sondes spatiales, à la même échelle (© ESA, NASA)

Après la formation des planètes géantes, les trajectoires des planétésimaux (noyaux cométaires pour ceux renfermant de la glace) vont être perturbées à plusieurs reprises. Dans le cadre des derniers modèles d'évolution du système solaire, Jupiter et

du périhélie. Soit elles sont définitivement expulsées hors du système solaire, soit leur orbite est raccourcie. Après quelques passages au périhélie, elles peuvent finir sur une orbite elliptique bien plus courte sous forme de comète périodique (période < 300 ans environ) du **type de Halley**.

Les objets situés au-delà de Neptune après la formation des planètes vont demeurer dans le plan de l'écliptique (orbites peu inclinées) et former la **ceinture de Kuiper**. Il est probable que près de 800 à 900 millions d'années après la naissance du système solaire, l'arrivée en résonance orbitale 2:1 de Jupiter et Saturne a significativement modifié le système solaire externe : Uranus et Neptune sont repoussées deux fois plus loin du Soleil et balayent la ceinture de Kuiper massive, initialement située entre 15 et 35 UA du Soleil, en lui faisant perdre plus de 99 % de sa masse (« modèle de Nice »). C'est de cette époque que daterait le bombardement tardif (LHB) qui a laissé des traces sur toutes les planètes, notamment sur la Lune où le bombardement intense par des astéroïdes ou noyaux cométaires a donné naissance aux grands bassins lunaires. Les objets restant dans la ceinture de Kuiper, notamment ceux sur des orbites devenues plus excentriques, vont alimenter une autre famille

de comètes. Après perturbations successives de Neptune à Jupiter, certains de ces objets voient leur orbite raccourcie (tout restant dans un plan proche de l'écliptique) jusqu'à amener leur périhélie suffisamment près du Soleil (1 à 2 UA) – leur aphélie étant alors ramené au niveau de Jupiter – pour apparaître sous forme de comètes dites de la « **famille de Jupiter** ». La ceinture de Kuiper a été mise en évidence à partir de 1992 et on y a découvert actuellement près d'un millier d'objets de plus de 100 km (les plus petits étant indétectables directement). Les principaux objets sont Pluton et Charon, Éris, Haumea, Makemake, Quaoar... de plus de 1 000 km de diamètre. D'autres objets appelés Centaures sont sur des orbites intermédiaires entre Jupiter et Neptune, et près de 10 % montrent une activité cométaire.

Enfin une dernière catégorie d'objets catalogués comme comètes vient d'être mise à jour : des petits objets au sein de la ceinture principale d'astéroïdes qui montrent une activité de type cométaire de manière épisodique les "Main Belt Comets". Leur origine pose problème car il est peu probable que des objets glacés aient pu survivre 4.5 milliards d'années à moins de 4 UA du Soleil.

Réservoir Origine / distance	Type d'orbite intermédiaire / demi grand-axe (a) / période (P) / périhélie (q) / aphélie (Q)	Type d'orbite finale / a, Q, q, P	Nouveau classement / inclinaison orbite	Nombre d'objets recensés / observés
Nuage de Oort $r_h = 20\ 000$ à $50\ 000$ ua	Longue période (dynamiquement neuve) $a \approx 20\ 000$ ua, $P > 1$ million années		Comètes "isotropes" Inclinaison quelconque	> 400
		Longue période (dynamiquement ancienne) $40\ \text{ua} \leq a \leq 10\ 000\ \text{ua}$		> 400
		Famille de Halley $a \leq 40$ ua $20 \leq P \leq 200$ ans		68
Ceinture de Kuiper (disque dispersé) $r_h = 30$ à 55 ua	Centaures $Q < 40$ ua, $q > 5$ ua		Comètes "écliptiques" Inclinaison faible	19
		Famille de Jupiter $Q \leq 5$ ua ; $P < 20$ ans		461
		Type Encke $Q < 4,5$ ua ; $q < 1$ ua		1
Ceinture d'astéroïdes ? $r_h = 2,5$ à 4 ua		Comètes de la ceinture principale d'astéroïdes $Q < 4,5$ ua ; $q > 2,5$ ua	Dans la ceinture d'astéroïdes	8

Tableau 1: Types orbitaux de comètes (au 1^{er} février 2013).

Propriétés physiques, dimension, rotation, structure

A priori, tous les noyaux cométaires comportent une partie de glace (glace d'eau au moins) dans leur

composition pour les rendre « actifs » lorsqu'ils sont exposés au soleil. Cependant les noyaux dont le pouvoir réflecteur dans le visible a été mesuré, montrent un albédo très faible de l'ordre de 3 à 4 % avec peu de glace en surface. Les tailles sont très

variées mais même s'il existe des objets glacés de plus de 1 000 km qui dégagent (Pluton, Triton avec une atmosphère transitoire et probablement d'autres satellites des planètes géantes) et qu'il y en a probablement aussi dans le nuage de Oort, la plus grosse comète officiellement mesurée et répertoriée est 95P/Chiron (tableau 2) et la majeure partie des comètes actives observées doivent avoir un diamètre inférieur à 100 km. Les plus petits objets sont irréguliers et mesurent moins du kilomètre. Certaines mini comètes comme celles du type SOHO qui ne survivent pas à leur passage près du Soleil ou des débris de plus grosses comètes comme les fragments observés de la comète 73P/Schwassman-Wachmann 3 en 2006 ne doivent même pas mesurer 10 m (figure 3).

Les périodes de rotation observées sont très variées, de moins de 6 h à plusieurs jours, et sont parfois complexes (période de précession comparable à la rotation), voire chaotiques. De plus, du fait de l'activité de la comète, on a observé une variation au cours du temps de la période de rotation pour certaines comètes.

Quant à la structure interne, elle est sans doute très variée, à l'image de la diversité des terrains de surface observés (figure 1). Les densités estimées sur certains objets (9P/Tempel 1) sont de l'ordre de 0,4. Un bon nombre de ces objets ont donc une densité faible, bien inférieure à la glace d'eau (≈ 1) et aux objets rocheux (2 à 3) : ils sont poreux avec beaucoup de vide à petite échelle. C'est ce qui fait des noyaux cométaires des objets très fragiles qui se brisent en morceaux facilement comme D/1993 F2 (Shoemaker-Levy 9) en 1992 sous les effets de marées dus à un passage proche de Jupiter (cohésion estimée très faible) ou du fait de la simple activité de la comète comme on en voit des exemples plusieurs fois par décennie. Les objets plus gros (100 km ou plus) ou fragments de plus gros objets ont par contre une masse et une gravité qui ont pu initialement modifier la structure interne par différenciation : migration d'espèces ou des vides du fait de la gravité ou de la chaleur interne d'origine radioactive (désintégration de ^{26}Al après accréation).

<i>Nom comète</i>	<i>Dimensions</i>	<i>Période rotation</i>	<i>Fraction active</i>	<i>Orbite</i>
<i>C/1996 B2 (Hyakutake)</i>	$\approx 3\text{ km}$	6,27 h	$\approx 100\%$	Longue période, $P = 75\ 000\ \text{ans}$, $q = 0,23\ \text{ua}$
<i>C/1995 O1 (Hale-Bopp)</i>	$\approx 50 \times 90\ \text{km}$	11,35 h	$\approx 20\%$	Longue période, $P = 4\ 200\ \text{ans}$, $q = 0,91\ \text{ua}$, $i = 89^\circ$
<i>109P/Swift-Tuttle</i>	$\approx 26\ \text{km}$	69 h	$\approx 6\%$	Halley-Family, $P = 135\ \text{ans}$, $q = 0,96\ \text{ua}$
<i>1P/Halley</i>	$15,3\ \text{km} \times 7,4\ \text{km} \times 7,2\ \text{km}$	53 et 178 h	20 %	$P = 76\ \text{ans}$, $q = 0,59\ \text{UA}$
<i>8P/Tuttle</i>	$5,0\ \text{km} + 3,0\ \text{km}$ (binaire en contact)	11,444 h	$\approx 6\%$	Halley Family $P = 13,5\ \text{ans}$, $q = 1,03\ \text{ua}$
<i>95P/Chiron</i>	180 km	5,918 h		Centaure, $P = 51\ \text{ans}$, $q = 8,47\ \text{ua}$
<i>10P/Tempel 2</i>	$8\ \text{km} \times 4\ \text{km} \times 4\ \text{km}$	8,95 h + 0,004 h/P aug à chaque orbite	$\approx 10\%$	Jupiter Family $P = 5,5\ \text{ans}$, $q = 1.48\ \text{ua}$
<i>19P/Borrelly</i>	$8,0\ \text{km} \times 3,2\ \text{km} \times 3,2\ \text{km}$	25 h	12 %	Jupiter Family $P = 6,9\ \text{ans}$, $q = 1,35\ \text{ua}$
<i>9P/Tempel 1</i>	$7,6\ \text{km} \times 4,9\ \text{km}$	40,76 h - 0.25 h/P	5 %	Jupiter Family $P = 5,5\ \text{ans}$, $q = 1,51\ \text{ua}$
<i>81P/Wild 2</i>	$5,5\ \text{km} \times 4\ \text{km} \times 3,3\ \text{km}$	$\approx 13,5\ \text{h}$	10 %	Jupiter Family $P = 6,4\ \text{ans}$, $q = 1,59\ \text{ua}$ Centaure av 1974
<i>67P/Churyumov-Gerasimenko</i>	$\approx 4\ \text{km} \times 3\ \text{km}$	12,3 h	10 %	Jupiter Family $P = 6,6\ \text{ans}$, $q = 1,29\ \text{ua}$
<i>103P/Hartley 2</i>	$2,0\ \text{km} \times 0,4\ \text{km}$	18 h et 27 h + 2 h/P	$> 100\%1$	Jupiter Family $P = 6,5\ \text{ans}$, $q = 1,03\ \text{ua}$
<i>45P/Honda-Mrkos-Pajdusakova</i>	$\approx 0,7\ \text{à}\ 1,6\ \text{km}$?	11 %	Jupiter Family $P = 5,3\ \text{ans}$, $q = 0,53\ \text{ua}$
<i>73P/Schwassmann-Wachmann 3</i>	Noyau C : $1,6\ \text{km} \times 0,9\ \text{km}$ Noyau B : 0,4 km	$\approx 15\ \text{h} ?$	30 % $> 100\%$	Jupiter Family $P = 5,4\ \text{ans}$, $q = 0,94\ \text{ua}$

Tableau 2. Caractéristiques de quelques noyaux cométaires.

¹ Car une partie du gaz est émise par des grains dans la chevelure.

L'activité des comètes

Dégazage, formation de la coma et évolution héliocentrique

Ce qui fait le trait caractéristique d'une comète c'est l'émission de gaz à partir du noyau et la formation d'une chevelure. Mais une majorité du temps, le noyau cométaire reste nu et inactif car sa température ne permet pas aux glaces de passer à l'état gazeux. Dans le vide les glaces chauffées passent directement à l'état gazeux (sublimation), à des températures qui vont dépendre du type de molécule et de la manière dont elle est piégée ou mélangée aux autres espèces moléculaires ou matériaux réfractaires. La glace d'eau étant l'espèce majoritaire c'est en grande partie sa sublimation qui gouverne l'activité de la comète. À moins de 2,5 ua du Soleil environ, la température moyenne de la surface du noyau cométaire peut atteindre les 180 K nécessaires à la sublimation de l'eau dans le vide. Au-delà le taux de sublimation de la glace d'eau va chuter très vite, tandis qu'en se rapprochant du Soleil on attend un taux de sublimation proportionnel au chauffage solaire (en $1/r_h^2$).

En pratique, les comportements sont beaucoup moins simples. On a observé des températures très variées à la surface des noyaux cométaires (180 à 330 K à 1,5 ua du Soleil). Les petits grains de la chevelure, suivant la quantité de glace qu'ils renferment mais aussi en fonction de leur taille, peuvent atteindre des températures d'équilibre encore plus élevées et libérer plus facilement la vapeur d'eau. D'autre part la glace d'eau est bien souvent recouverte d'une couche de poussières qui l'isole du chauffage solaire. Les observations montrent en général que c'est entre 3 et 1,5 ua que les comètes passent au régime d'activité dominée par la sublimation de l'eau.

Au-delà de 3 ua du Soleil, on observe encore de la vapeur d'eau dans la chevelure des comètes mais souvent en partie du fait de la sublimation de grains de glace. D'autres molécules abondantes dans les glaces cométaires (CO_2 et CO) sont bien plus volatiles que l'eau et peuvent théoriquement se sublimer jusqu'à respectivement 10 et 100 ua du Soleil. La sublimation de CO a gouverné l'activité de la comète Hale-Bopp sans doute jusqu'à plus de 25 UA du Soleil et l'observation a effectivement montré qu'entre 4 et 14 ua environ, c'était la principale molécule qui s'échappait du noyau. Dans certaines comètes, CO est très peu abondant mais CO_2 reste présent en grande quantité et pourrait

prolonger l'activité de la comète à plus de 2 ou 3 ua du Soleil.

L'abondance de CO , voire de CO_2 et aussi la structure des premières couches du noyau cométaire (profondeur des glaces, fraction de la surface couverte de glace, épaisseur de poussière et albédo en surface...) doivent certainement déterminer le comportement des comètes à l'approche du Soleil entre 4 et 1,5 ua du Soleil. En pratique, on observe des noyaux cométaires inactifs à 4 ua et d'autres actifs bien au-delà de 10 ua.

Les jets de gaz et de poussières, l'environnement de grains de glaces

La sublimation ne se fait pas de manière uniforme à la surface d'un noyau, d'une part parce que l'éclairement est inégal et le noyau irrégulier, mais aussi parce que les hétérogénéités de surface font que les glaces ne sont pas réparties de manière homogène. De ce fait, on observe très souvent une émission réduite à plusieurs zones actives d'où partent des jets de gaz et des jets de poussières soulevés par le gaz (figure 2). En fait ces jets, structures linéaires ou incurvées à plus grande échelle en raison de la rotation du noyau, correspondent à des zones de plus forte densité de poussières (tels que vus en lumière visible) et/ou de gaz.

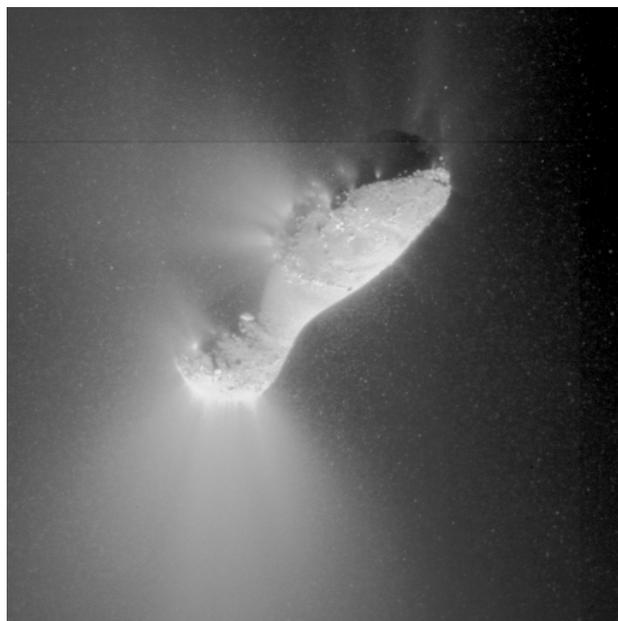


Fig.2. Noyau de la comète 103P/Hartley 2. Plus d'une dizaine de jets de poussières partent du noyau. La présence de petits grains de glace a aussi été mise en évidence autour du noyau et dans les jets. Cette image montre aussi une multitude de points brillants, "boules de neige" de taille centimétrique à décimétrique. Image EPOXI-MRI, © UMD, JPL- NASA.

En réalité c'est l'émission anisotrope de gaz à partir de ces zones actives qui va jouer un rôle déterminant dans le confinement des poussières et la formation de ces structures qui ne pointent pas forcément directement vers leur zone d'émission.

Le gaz quitte la surface du noyau avec la température de surface mais en s'échappant dans le vide, par détente adiabatique il va vite se refroidir et convertir son énergie thermique en énergie cinétique. La vitesse d'expansion (v_{exp}) typiquement atteinte par les molécules du gaz est de 0,4 à 1 km/s (voire plus en se rapprochant du Soleil).

Les poussières, en fonction de leur taille, vont être entraînées plus ou moins rapidement : les poussières microniques observées dans le visible vont atteindre une vitesse v_d proche de v_{exp} près du noyau (jusqu'à 0,5 km/s) tandis que v_d va diminuer avec la taille des particules jusqu'à atteindre 0 pour les plus grosses qui resteront liées gravitationnellement au noyau. Des milliers de "boules de neige" de taille centimétrique à décimétrique ont été détectées par radar et par imagerie visible autour de certains noyaux comme 103P/Hartley 2, comme le montre aussi les images visibles de la mission EPOXI (figure 2). Ces particules macroscopiques sont plus ou moins en orbite autour du noyau mais la sublimation de glace par effet de réaction a tendance à les accélérer en direction anti-solaire.

Fragmentation et désintégration

Les « boules de neige » observées autour du noyau de 103P/Hartley 2 sont une étape intermédiaire vers les fragments plus gros, véritables mini-comètes de quelques mètres de diamètre qui ont été observées en s'échappant du noyau principal. Ces fragments ont des durées de vie de quelques heures à quelques jours et se subliment comme les glaces du noyau. Par effet de réaction à la sublimation du côté solaire ils sont accélérés à quelques mètres par seconde vers la queue de la comète (figure 3).

L'émission de tels fragments témoigne de la fragilité des noyaux cométaires (faible cohésion et faible gravité). On observe régulièrement des comètes se désintégrer complètement et disparaître en quelques jours. En juillet 2000, on a pu imager des dizaines de fragments de taille décimétrique au sein du nuage de poussières lors de la désintégration de la comète C/1999 S4 (LINEAR). Un mois plus tard ils avaient quasiment tous disparus, entièrement sublimés et dispersés.

Certaines comètes peuvent se briser en plusieurs morceaux plus conséquents donnant lieu à plusieurs comètes, au début rapprochées sur la même orbite, puis se dispersant.

Par exemple les comètes Liller de 1988 et Tabur de 1996, passées près du Soleil à 8 ans d'intervalle sont vraisemblablement issues du même corps parent. La famille de comètes rasant le Soleil du groupe de Kreutz, dont font partie une dizaine de grandes comètes vues à l'œil nu depuis quelques siècles (C/1843 D1, C/1882 R1, C/1965 S1 Ikeya-Seki, C/2011 W3 Lovejoy...) mais aussi les milliers de fragments de comètes SOHO est probablement originaire d'une seule et même comète passée près du Soleil il y a environ 1 700 ans et qui s'est fragmentée à plusieurs reprises suite au stress de l'échauffement intense et de l'effet de marée en passant à moins d'un million de km du Soleil.



Fig.3. Désintégration et fragments cométaires relâchés par le noyau G de la comète 73P/Schwassmann-Wachmann 3 en avril 2006. Image HST/NASA/ESA.

Les missions spatiales et les observations récentes nous ont fait mieux connaître les noyaux cométaires et leur comportement. Mais si on commence à avoir une vue un peu globale, chaque comète est différente des autres, dans son aspect, son évolution...

La mission spatiale Rosetta va nous faire découvrir un nouveau noyau cométaire l'année prochaine : celui de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko. Elle l'auscultera de très près (le module Philae s'y posera en novembre 2014) et l'escortera durant toute son approche au Soleil et même après. La communauté espère donc en apprendre beaucoup plus sur le fonctionnement des noyaux cométaires.