

Planètes naines, astéroïdes, comètes

(voir http://media4.obspm.fr/public/AMC/pages_asteroides/introduction-asteroides.html)

Le système solaire ne se résume pas aux huit planètes vues dans la fiche du même nom ! Les étoiles filantes qui zèbrent le ciel nocturne ou bien encore les comètes qui ont terrifié les anciens nous indiquent que l'espace entre les planètes et au delà n'est pas vide. Les observations faites au télescope dès le XIX^e siècle ont révélé de nouveaux objets. Au cours des dernières années, on a découvert que ces « autres corps » du système solaire sont plus nombreux et divers qu'on l'avait pensé.

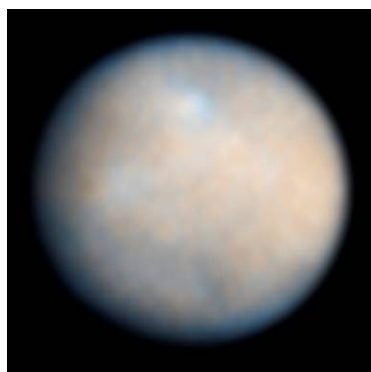
Les planètes naines

Reprenons la définition moderne des planètes vue dans la fiche « Planètes ». Une planète est un corps céleste qui :

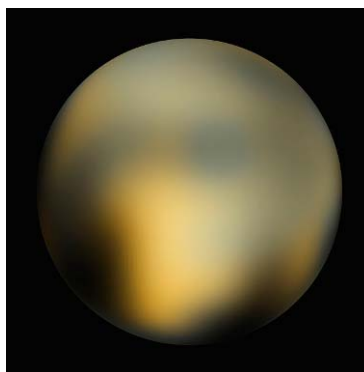
1. est en orbite autour du Soleil (ce qui exclut donc les satellites)
2. a une masse suffisante pour que son attraction propre l'emporte sur ses forces de cohésion interne, de telle manière qu'il soit en équilibre hydrostatique : en d'autres termes, une planète doit être pratiquement sphérique !
3. a « nettoyé » le voisinage de son orbite : autrement dit, tout corps passant au voisinage est soit capturé, soit chassé, soit placé en résonance. Il n'existe pas d'autre corps semblable se déplaçant sur une orbite voisine.

Pluton, qui forme un système binaire avec son compagnon Charon, au-delà de l'orbite de Neptune, a longtemps été considéré comme la neuvième planète du système solaire, mais a été « dégradé » en 2006 ! Pluton remplit pourtant les deux premières conditions ci-dessus (il tourne autour du Soleil en 248 ans, et a l'allure d'une sphère de 2300 km de diamètre). Qu'en est-il de la troisième condition ? De nombreux petits corps, les Plutinos, ont des orbites similaires à celle de Pluton : ce dernier n'a pas du tout fait le ménage autour de lui ! Ce n'est donc pas une planète, mais une **planète naine**.

Parmi les autres planètes naines (la liste s'allonge sans cesse) figurent **Cérès**, le plus grand objet de la ceinture d'astéroïdes, entre les orbites de Mars et de Jupiter : c'est bien une planète naine car elle est entourée d'un essaim de petits corps ; et **Eris**, découverte en 2005 aux confins du système solaire, trois fois plus loin que Pluton. Cette planète naine serait un peu plus grande que Pluton : si c'était le cas, Pluton serait alors doublement dégradé ! Notez enfin que des satellites comme Titan, Ganymède ou même la Lune sont nettement plus gros que ces planètes naines !



Cérès vue par le télescope spatial Hubble
(© NASA)



Pluton vu par le télescope spatial Hubble
(© Marc W. Buie, Southwest Research Institute)

Les astéroïdes

Revenons à la définition donnée au début de cette fiche : il arrive que seule la première condition (« être en orbite autour du Soleil ») soit remplie ! Au début de l'histoire du système solaire se sont formés des **petits corps** dont la masse était trop faible pour que la gravitation leur ait donné une forme régulière, sphérique. Ces corps d'allure « patateïde », de quelques centaines de kilomètres au plus, sont les astéroïdes (principalement rocheux) et, au-delà de l'orbite de Neptune, les noyaux des comètes (riches en glace d'eau et d'autres volatils). En fait, il existe des corps de composition intermédiaires, aussi cette distinction est-elle un peu artificielle.

Il existe sans doute plusieurs centaines de milliers d'astéroïdes, qui orbitent principalement entre les orbites de Mars et de Jupiter (de 2 à 4 unités astronomiques du Soleil) : c'est la **ceinture d'astéroïdes**, où l'on a déjà numéroté plus de 200 000 objets. D'après la « loi » empirique de Titus-Bode, on se serait attendu à trouver une planète entre Mars et Jupiter : en fait, l'influence gravitationnelle prépondérante de Jupiter aurait empêché l'accrétion des petits corps. Les astéroïdes ne sont donc pas les fragments d'une planète qui aurait éclaté, comme on l'a longtemps cru, mais les vestiges des matériaux à partir desquels les planètes se sont formées. Ce n'est pas une planète détruite, mais avortée ! Pour reprendre l'image de l'astronome André Brahic, ce sont les pierres abandonnées sur un chantier de construction, une fois les maisons terminées.



Cette merveilleuse image a été obtenue par la sonde Galileo. En route vers Jupiter, elle a traversé la ceinture d'astéroïdes et a frôlé l'astéroïde Ida. De forme irrégulière (56 km dans sa plus grande dimension), Ida tourne autour du Soleil, mais il a lui-même un petit compagnon, Dactyl, qui tourne autour de lui ! (© NASA/Galileo)

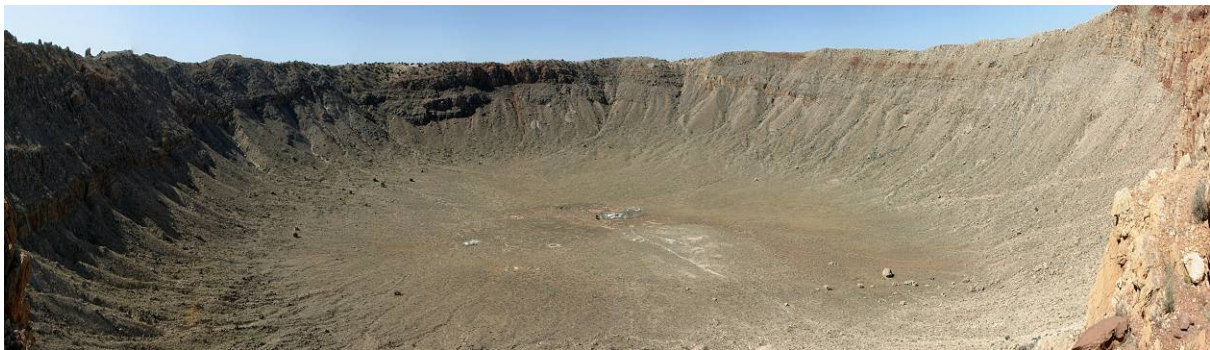
Les cratères qui couvrent les astéroïdes racontent une histoire riche en collisions. Souvent, les impacts, trop violents, ont conduit, non à l'accrétion, mais à la fragmentation des deux corps. Au cours du temps, toutefois, les rencontres se sont faites de plus en plus rares. Comme les astéroïdes ont été peu transformés depuis leur formation, ce sont des témoins incontournables des premiers temps du système solaire.

Près de l'orbite de la Terre, on trouve des astéroïdes qui pourraient s'approcher près de notre planète, voire entrer en collision avec elle : ce sont les géocroiseurs. Fort heureusement, nous avons plus souvent affaire à des petits fragments d'astéroïde !

Les météorites

On confond souvent les termes de météorite et d'astéroïde. Les **météorites** sont des « pierres tombées du ciel », blocs ferreux ou rocheux à l'aspect noirci caractéristique (leur traversée de l'atmosphère les chauffe et engendre une « croûte de fusion »). Les astéroïdes, comme nous venons de le voir, sont des petits corps qui peuplent le système solaire. On a vite soupçonné une relation entre météorites et astéroïdes ! Les météorites correspondent en effet pour la plupart à des fragments d'astéroïdes dont la trajectoire croise l'orbite terrestre. Les micrométéorites, en revanche, sont des petits grains libérés par les noyaux des comètes (voir plus loin). Certains de ces petits grains n'atteignent pas la surface de la Terre mais brûlent en traversant l'atmosphère : ce sont les **étoiles filantes**.

Si l'on met de côté les poussières (la Terre en reçoit 100 tonnes par jour !), les météorites que l'on échantillonne ont une taille de quelques centimètres à quelques mètres. Entre 10 et 100 mètres de diamètre, les météorites explosent avant d'atteindre le sol ! Au delà de 100 mètres de diamètre, les météorites sont suffisamment massives pour arriver jusqu'au sol où elles sont vaporisées (une partie de l'énergie cinétique étant convertie en chaleur). L'explosion de l'impacteur, et non la seule force mécanique de l'impact, crée un **cratère d'impact** (c'est pourquoi les cratères sont circulaires plutôt qu'ovales, même lorsque la trajectoire de l'impacteur est oblique). La collision avec des bolides de l'ordre de quelques kilomètres est exceptionnelle (récurrence moyenne de quelques dizaines de millions d'années), et c'est heureux, car un tel événement entraîne un cataclysme ! On a retrouvé les traces d'un tel impact à la limite du Crétacé et du Tertiaire : un astéroïde qui devait mesurer une dizaine de kilomètres a créé un cratère de 200 km de diamètre, aujourd'hui enfoui sous les sédiments à Chicxulub, au Mexique. Les conséquences de cette collision (500 millions de fois l'énergie de la bombe d'Hirshima) pourraient avoir contribué à l'extinction de masse de la fin du Crétacé, dont les dinosaures et les ammonites comptent parmi les victimes.



Meteor crater, Arizona (©Cburnett)

Quelques rares cratères d'impact sont préservés à la surface de la Terre, généralement dans des régions désertiques où l'érosion est lente. Mais les traces d'une collision sont le plus souvent indirectes. Par exemple, près de l'impact, on retrouve des débris consolidés et, en profondeur, des roches fracturées, où des fragments du substrat sont englobés dans une pâte vitreuse : ces brèches nommées **impactites** sont caractéristiques. On retrouve également des « verres » nommés **tectites**, issus des matériaux fondus à plus de 2 000 °C projetés lors de l'impact, ainsi que des cristaux de quartz qui présentent un aspect particulier en lumière polarisée : les **quartz choqués**. Leur structure cristalline n'a pu être déformée que par une onde de choc (une onde de pression se déplaçant plus vite que le son), et seul un impact avec un objet extraterrestre peut en produire. On retrouve également, à la limite Crétacé-Tertiaire, des teneurs élevées d'un métal, l'iridium, rare dans la croûte terrestre, mais abondant dans le manteau et dans les météorites. Ce taux anormal d'iridium ne peut donc s'expliquer que par un épisode volcanique spectaculaire ou par la chute d'une météorite géante.

Les météorites sont diverses. Les plus abondantes (90%), nommées **chondrites**, ont une structure qui ne ressemble à rien de connu sur terre : une matrice très finement cristallisée englobe des petites sphères à plus gros cristaux, les **chondres**, formées des mêmes silicates que le manteau terrestre (olivine, pyroxène) et de globules de fer-nickel. D'autres météorites, plus rares, sont entièrement rocheuses (olivine, pyroxène, feldspaths) et ne présentent pas de chondres : ce sont les **achondrites** ; et d'autres sont entièrement ferreuses (alliage fer-nickel) : ce sont les **fers**. Des intermédiaires existent (pallasites).



A. Une météorite ferreuse : la météorite de Tamentit découverte au Sahara en 1864. Exposée à Vulcania, elle pèse plus d'une demi-tonne. B. Les chondres sont bien visibles sur cette tranche polie d'un fragment de la météorite Allende, une chondrite carbonée. C. La croûte de fusion, de couleur noire, qui se forme lors de la traversée de l'atmosphère, est une caractéristique des météorites pierreuses (météorite de Marília)

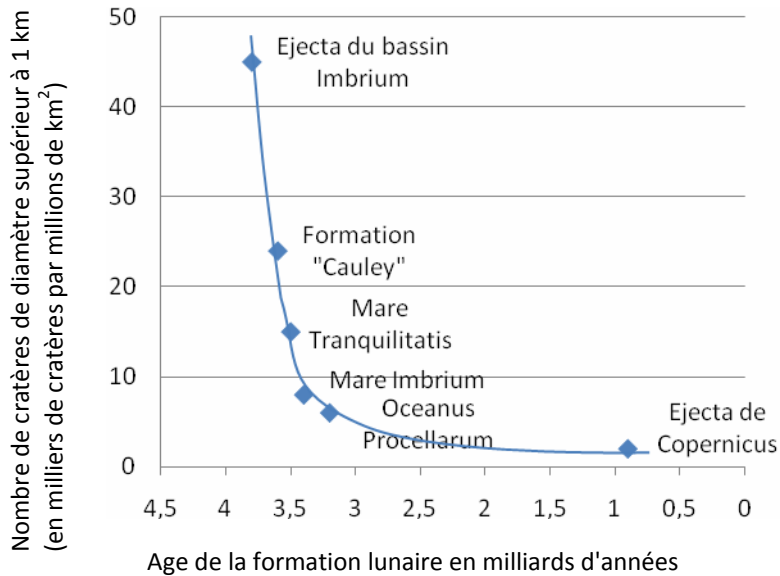
Comment expliquer cette diversité ? et comment faire le lien avec les astéroïdes ? Les chondrites seraient des fragments de petits astéroïdes peu transformés : la composition des chondrites carbonées, les plus primitives, correspond d'ailleurs parfaitement à celle de la photosphère du Soleil (à l'exception des éléments les plus légers), et refléterait donc celle de la nébuleuse primitive, matériau d'origine des corps du système solaire. Quant aux autres météorites (achondrites et fers), elles résulteraient de la **différenciation** d'astéroïdes plus gros, voire de planètes naines, qui se sont échauffés plus vite qu'ils refroidissaient (outre l'énergie des collisions, les sources de chaleur sont la radioactivité et l'énergie gravitationnelle) : dans la matière partiellement fondue de l'astéroïde, les éléments les plus lourds (métaux) auraient migré vers le centre pour former un noyau ferreux, entouré d'un « manteau » formé de la matière silicatée résiduelle. Les fers correspondraient donc aux fragments du noyau d'un petit corps disloqué par une collision, et les achondrites, aux fragments du manteau. On connaît même des météorites de composition basaltique, les eucrites, qui correspondraient aux fragments d'une croûte légère différenciée en surface.

Les cratères : un chronomètre planétaire

Les petits corps étaient beaucoup plus nombreux au début de l'histoire du système solaire, et le bombardement par les météorites était par conséquent bien plus intense. Les premières missions sur la Lune ont permis de le prouver. Voici comment !

La surface de la Lune (surtout la face visible de la Terre) présente deux types de terrain bien différents, que l'on peut distinguer même à l'œil nu : les « terres » à l'aspect clair, et les « mers », étendues planes, plus sombres. Les mers correspondent à d'immenses épanchements de lave basaltique : la lave a jailli de fissures et rempli les terrains les plus bas avant de se solidifier. Les terres sont les terrains plus élevés qui n'ont pas été recouverts par ces écoulements. Les mers sont un peu plus récentes que les terres - 3,5 à 3 milliards d'années en moyenne contre 4,4 milliards d'années. Elles sont donc moins cratérisées, ce qui est logique, mais elles le sont beaucoup moins que ce qu'on attendrait si le flux d'impacteurs avait été constant : cela indique que le bombardement par les météorites était beaucoup plus intense dans la jeunesse du système solaire. Les missions lunaires ont permis de dater plusieurs

surfaces plus ou moins cratérisées et d'estimer ainsi avec une certaine précision le flux d'impacteurs. Inversement, on peut utiliser le nombre de cratères pour estimer l'âge d'un terrain que l'on survole, si l'on a calibré l'échelle au préalable, comme c'est le cas pour la Lune. Pour les autres corps du système solaire, on peut estimer au moins qualitativement si une surface est jeune au vu du nombre de cratères (voir la fiche « Planètes »).



Mare Imbrium. En haut, le cratère Copernicus ; au centre, le cratère Pytheas (cliché NASA)

Relation entre l'âge des terrains lunaires échantillonnés par les astronautes et leur cratérisation. Certaines de ces formations sont des mers, d'autres les abords de cratères. En effet, lors de la chute d'une météorite, une partie de l'énergie cinétique est convertie en chaleur et de la matière fondue est éjectée. On peut dater les roches issues de cette matière en fusion. Au cours du temps, la surface formée par ces éjectas est elle-même la cible de nouveaux impacts de météorites. On peut donc relier l'âge de ces surfaces et le nombre de cratères qui s'y sont formés, et en déduire l'intensité du bombardement de météorites au cours du temps.

Les comètes

En 1997, vous étiez trop jeunes pour vous souvenir du magnifique spectacle que le ciel a offert pendant des mois. Sur cette photo prise le 29 mars 1997, un objet céleste, plus brillant que toute étoile à l'exception de Sirius, attire l'attention : d'une sphère aux contours flous jaillissent deux queues de lumière, l'une peu distincte, bleutée et rectiligne, à l'opposé du Soleil, l'autre plus lumineuse et incurvée. L'objet a atteint un pic de magnitude fin mars-début avril, puis a décliné pour devenir invisible à l'œil nu fin 1997. Malheureusement, vous n'aurez pas de deuxième chance puisque le spectacle ne se répètera... qu'en 4385 ! Il s'agissait d'une **comète** (la comète de Hale-Bopp, nommée d'après ses découvreurs).

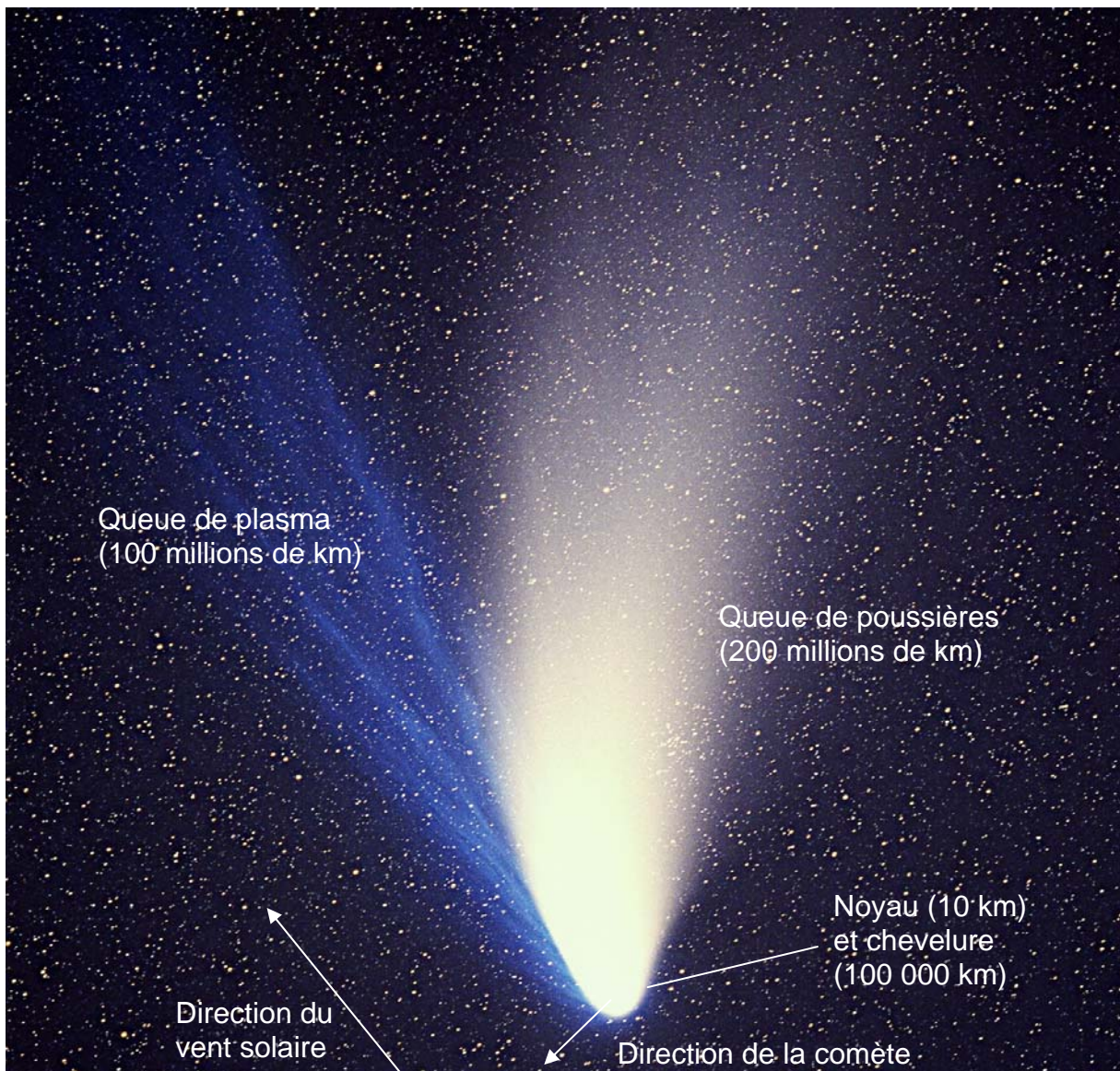
En 1705, Edmund Halley fit l'hypothèse que les comètes apparues dans le ciel en 1531, 1609 et 1684 étaient en fait une seule et même comète, voyageant sur



La comète de Halle-Bopp observée en Croatie le 29 mars 1997 (© Philipp Salzgeber)

une orbite très elliptique et effectuant une révolution autour du Soleil en 76 ans : il prédit par conséquent son retour en 1758. D'autres astronomes intégrèrent les perturbations causées par les planètes géantes et prédirent le retour de la comète de Halley en 1759... ce qu'elle fit ! Son dernier passage date de 1986, et le prochain aura lieu en 2061. La quasi-totalité des comètes, comme celles de Halley et de Hale-Bopp, suivent des orbites très elliptiques (première loi de Kepler) et font des passages réguliers, ce sont les **comètes périodiques**. De rares comètes pourraient avoir des orbites hyperboliques et ne feraient donc qu'un passage près du Soleil avant de quitter le système solaire.

Une comète est en fait le phénomène produit lorsqu'un petit corps riche en glaces, le **noyau cométaire**, s'approche à moins de 1 à 3 unités astronomiques du Soleil. Sous l'effet du rayonnement solaire, la glace d'eau et d'autres volatils est sublimée, c'est-à-dire passe de l'état solide à l'état gazeux (il ne peut pas exister d'eau liquide dans les conditions de l'espace). Ce phénomène relâche autour du noyau une atmosphère brillante constituée de gaz et de particules : c'est la **chevelure** ou **coma** (d'où le nom grec Κομήτης, « chevelu ». En effet, les glaces du noyau, qui ne mesure que quelques kilomètres de diamètre, agglomèrent

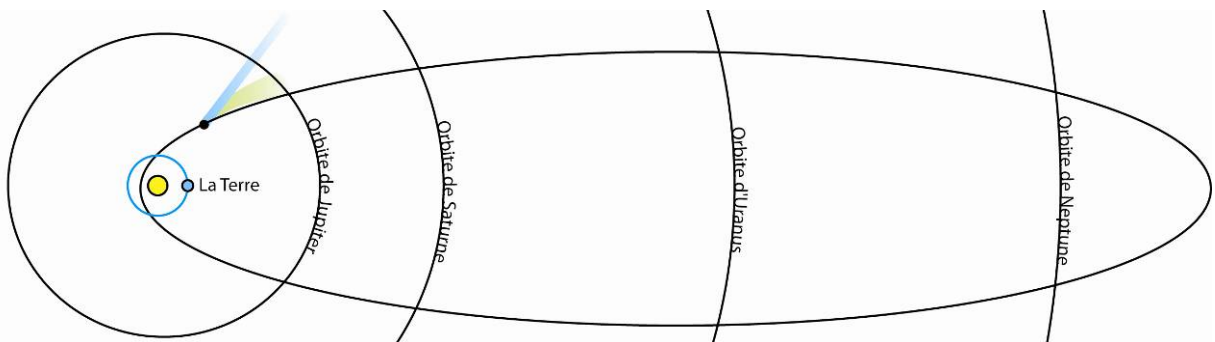


La comète de Hale-Bopp photographiée le 4 avril 1997 en Autriche (© E. Kolmhofer, H. Raab; Johannes-Kepler-Observatory, Linz, Austria (<http://www.sternwarte.at>))

des petits grains, d'où l'image d'une « boule de neige sale ». Le vent solaire chasse les molécules de gaz, ionisées, en une longue **queue de plasma** rectiligne, qui pointe donc à l'opposé du Soleil. Le vent solaire chasse aussi les poussières mais la **queue de poussières** résultante va s'incurver légèrement à l'opposé du mouvement de la comète sur son orbite.

Certaines comètes, dites joviennes, ont une période de moins de 20 ans. Leur orbite est généralement comprise dans le plan de l'écliptique. Les noyaux cométaires proviendraient d'une zone nommée **ceinture de Kuiper**, s'étendant de part et d'autre du plan de l'écliptique, au-delà de Neptune, entre 30 et 55 unités astronomiques. La ceinture de Kuiper comprendrait des centaines de milliers de petits corps glacés qui, dérangés par les planètes géantes, évolueraient sur une orbite plus excentrique. Les comètes qui, comme celle de Halley, ont une période de moins de 200 ans, sont dites à période intermédiaire. Leur plan orbital n'est pas forcément compris dans le plan de l'écliptique, elles proviennent donc, non d'une ceinture, mais d'un nuage compris entre 1000 et 20 000 unités astronomiques du Soleil : le **nuage de Hill** ou **nuage de Oort interne**. Enfin, les noyaux des comètes de période supérieure à 200 ans (comètes à longue période) proviendraient du **nuage de Oort externe**, qui s'étend jusqu'à 150 000 unités astronomiques du Soleil (2,5 années lumière) et comprendrait mille milliards d'objets. Ce sont les corps les plus lointains du système solaire. Ils sont du coup soumis aux perturbations gravitationnelles des étoiles voisines, qui les précipitent épisodiquement vers le système solaire interne.

Comète	Période (années)	Excentricité	Périhélie (en unités astronomiques)	Aphélie (en unités astronomiques)
Halley	75,31	0,967	0,586	35,1
Hale-Bopp	2537	0,994	0,914	371,1



Orbite de la comète de Halley

Le rayon des comètes diminue à chaque passage près du soleil d'environ 1 mètre, en moyenne. Au bout de 1000 passages, elles perdent pratiquement toute leur masse et s'éteignent définitivement. D'autres catastrophes peuvent détruire les comètes prématurément : elles peuvent s'abîmer sur une planète (impact de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter en 1994) ou sur le Soleil.