Les innombrables petits corps dans le système solaire

Les petits corps - Les astéroïdes
La ceinture principale d'astéroïdes
La ceinture de Kuiper et le nuage d'Oort
Les objets épars
Les astéroïdes troyens
Les astéroïdes géocroiseurs
Les centaures
Les comètes

Groupe d'Astronomie Populaire 47

GAP47 • Olivier Sabbagh • Février 2018 - Révision Mars 2023

Astéroïdes (astéroïdes classiques, astéroïdes géocroiseurs, astéroïdes troyens, objets épars), centaures **et comètes**

Il existe, dans le système solaire, un nombre quasiment incalculable de « petits corps ». Ils ne sont pas tous répertoriés et certains même, petits et fort lointains car situés dans la ceinture de Kuiper et dans le nuage de Oort, n'ont jamais été vus (et ne le seront probablement jamais). Ce sont principalement des astéroïdes (de plusieurs sortes), des comètes et des « petits corps » indéterminés et des « objets épars » situés à des endroits différents du système solaire. On a pu évaluer grossièrement le nombre d'astéroïdes situés dans la ceinture principale (entre Mars et Jupiter) à plusieurs millions de corps. Près de 900.000 ont été nommés ou répertoriés sans être nommés. Si l'on ajoute les astéroïdes et les autres petits corps de la ceinture de Kuiper et du nuage de Oort (notamment les comètes, actives ou non) on se trouve face à des chiffres probablement vertigineux et inconnus. On peut supposer qu'on parle de milliards de petit corps et d'objets épars.

Qu'est-ce qu'un petit corps ?

En astronomie, un **petit corps du Système solaire** est un objet céleste du Système solaire orbitant autour du Soleil et qui n'est ni une planète, ni une planète naine. ***Le terme fut adopté en 2006 par l'Union astronomique internationale (UAI) afin d'éclaircir la classification des objets tournant autour du Soleil.***

Définition

L'Union astronomique internationale (UAI), organisation chargée de la nomenclature astronomique, définit un petit corps comme un corps céleste du Système solaire qui satisfait aux conditions suivantes :

- Il est en orbite autour du Soleil;
- Il n'est ni une planète, ni une planète naine, c'est-à-dire qu'il ne possède pas une masse suffisante pour que sa propre gravité l'emporte sur les forces de cohésion du corps solide et le maintienne en équilibre hydrostatique (sous une forme presque sphérique). *A priori*, bien que la définition par exclusion n'impose pas cette contrainte, un tel objet n'a pas non plus, comme les planètes naines, fait place nette dans son voisinage orbital.

Ce terme fut adopté le 24 août 2006 par l'Union astronomique internationale. Il participe d'une classification des objets du Système solaire en trois catégories selon leur taille et leur environnement.

Caractéristiques

Orbite

La définition de l'UAI ne concerne que les objets directement en orbite autour du Soleil. Elle ne s'applique donc pas aux satellites naturels de planètes, de planètes naines ou même d'autres petits corps.
En revanche, cette définition n'explicite pas le statut d'objets binaires dont chacun des membres est de taille comparable et orbite l'un autour de l'autre, le système tout entier orbitant autour du Soleil. Plusieurs objets de ce type sont connus, par exemple l'astéroïde (90) Antiope.

Dimensions

La définition de l'UAI ne précise aucune limite de taille, tant inférieure que supérieure.
Les limites supérieures et inférieures, en taille et en masse, des planètes naines ne sont pas spécifiées dans la résolution 5A de l'Union astronomique internationale.

La limite supérieure est déterminée par le concept d'« équilibre hydrostatique », mais les dimensions auxquelles un objet atteint un tel état ne sont pas déterminées; des observations empiriques suggèrent qu'elles varient suivant la composition et l'histoire de l'objet. La version initiale de la résolution 5 définissait l'équilibre hydrostatique comme s'appliquant « aux objets dont la masse dépasse 5×10^{20} kg (soit 500 millions de milliards de tonnes) et le diamètre 800 km », mais ceci ne fut pas retenu dans la résolution

finale. À titre de comparaison, parmi les satellites naturels des planètes géantes, un corps aussi grand que Protée, satellite de Neptune mesurant plus de 400 km de diamètre moyen, ne possède pas une forme sphérique. En revanche, Mimas, satellite de Saturne d'une taille comparable, est clairement sphérique. Aucune limite inférieure n'est spécifiée. Les plus petits objets macroscopiques en orbite autour du Soleil sont nommés météoroïdes. En dessous de cette taille, on trouve des poussières interplanétaires, des molécules et de simples atomes. Il n'est pas précisé si les petits corps regroupent l'intégralité de ces objets.

Voisinage

La définition d'un petit corps fait appel à celle d'une planète et d'une planète naine et suppose qu'elle n'a pas « fait place nette dans son voisinage », mais n'explicite pas plus ce concept.

Alan Stern et Harold F. Levison ont défini un critère permettant de faire la distinction entre une planète et une planète naine, exprimant la probabilité d'une rencontre entre un objet et un corps plus petit à la suite d'une déviation de l'orbite de ce dernier. Selon ses auteurs, ce critère permet d'estimer la capacité d'un corps à nettoyer son voisinage. Stern et Levison trouvèrent un écart de cinq ordres de grandeur entre sa valeur pour Mars et celle des plus grands astéroïdes et transneptuniens. En utilisant ces travaux, Steven Soter a proposé un paramètre nommé discriminant planétaire, permettant de faire la distinction entre les planètes naines et les huit planètes du Système solaire, sur la base de leur capacité à nettoyer les corps plus petits par collision, capture ou perturbation gravitationnelle. Ces critères pourraient *à fortiori* s'appliquer aux petits corps.

Membres

Les orbites de la vaste majorité des petits corps du Système solaire sont localisées en deux régions distinctes, la ceinture d'astéroïdes et la ceinture de Kuiper. D'autres régions contiennent de moindres concentrations de petits corps, comme les astéroïdes géocroiseurs, les centaures, les comètes ou les objets épars.

Pourquoi faut-il s'intéresser aux petits corps et objets épars du système solaire ? C'est une question primordiale, qui vaut que l'on s'arrête un instant sur elle.

Quand vous promenez sur la Terre (et il en serait de même sur certaines autres planètes ou satellites) vous pouvez ramasser un morceau de roche et vous mettre à étudier ses composants, sa structure et peut-être son histoire. Peut-on déduire de cette étude des conclusions sur la manière dont s'est formé le système solaire, sur ses premiers millions d'années ? Rappelons que notre système solaire est vieux d'à peu près 4,6 milliards d'années…

La réponse est NON, un grand NON !

Pourquoi ? Parce que les roches que l'on trouve sur terre ou sur les autres planètes telluriques ont été profondément modifiées au cours de ces milliards d'années, en raison de l'activité interne de ces planètes, activité notamment thermique générée par le cœur de ces planètes ou régnait (et règne encore pour Vénus et la Terre) une forte activité volcanique, tectonique, radioactive, magnétique et atmosphérique. Ces roches ont donc subi des compressions, des distorsions, de très fortes élévations de température, des pluies, etc.

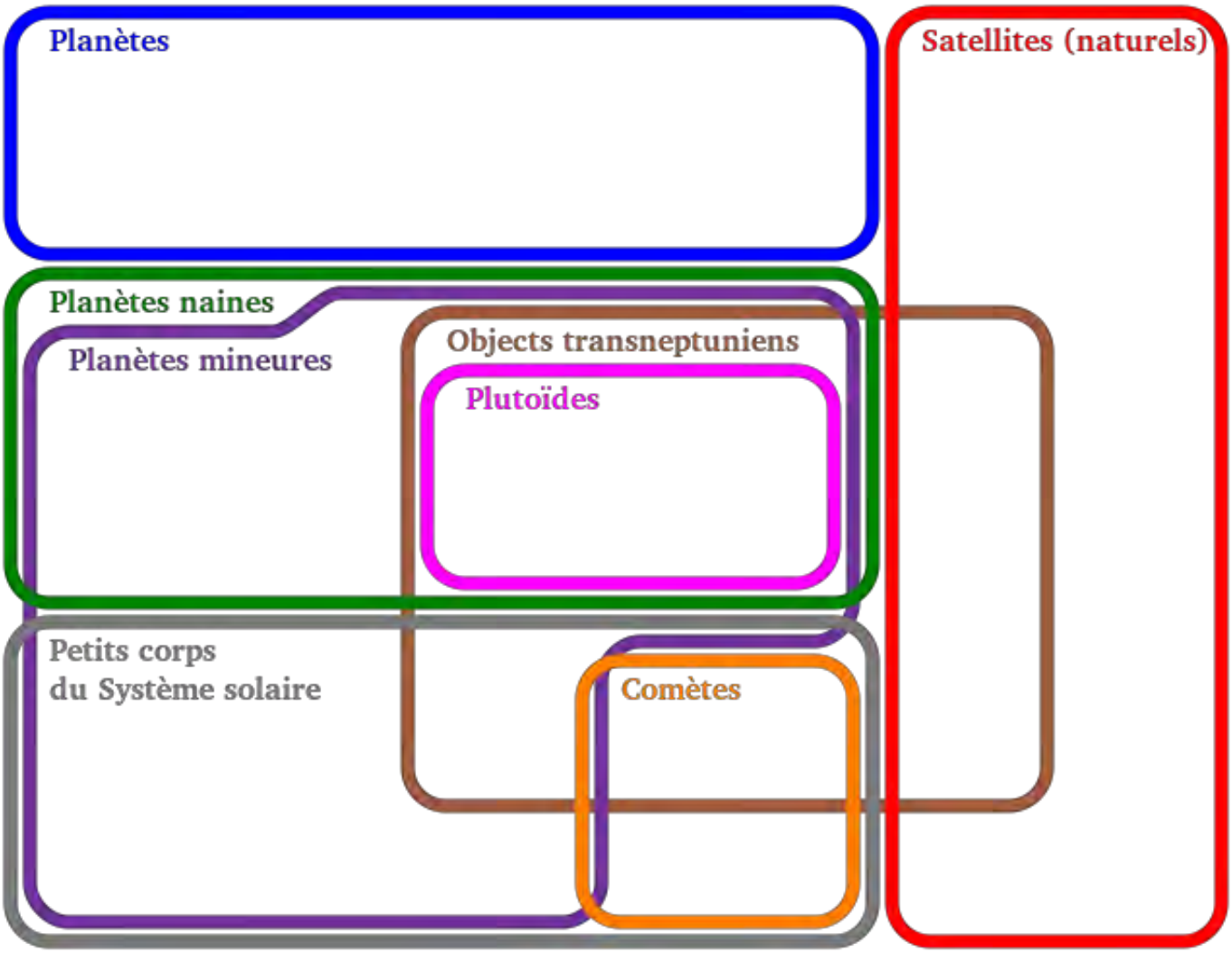
Par contre, la plupart des petits corps du système solaire sont quasiment inertes. Il existe quelques rares exceptions comme certaines comètes qui s'échauffent lors de leur passage au périhélie et quelques rares astéroïdes de grande taille. Nous avons avec les petits corps un accès aux briques fondamentales du système solaire et ces briques de 4,6 milliards d'années **sont intactes**.

L'étude et la connaissance de ces petits corps est donc essentielle à une meilleure compréhension de la genèse de notre système solaire et à son évolution.

I – Les astéroïdes

A – Les astéroïdes « classiques »

Un **astéroïde** est une planète mineure (voir ci-dessous le diagramme d'Euler des corps du système solaire) qui est composée de roches, de métaux et de glaces dans des proportions variables selon les astéroïdes. Ces corps ont des dimensions qui varient de l'ordre du mètre (limite actuelle de détection) à plusieurs centaines de kilomètres.



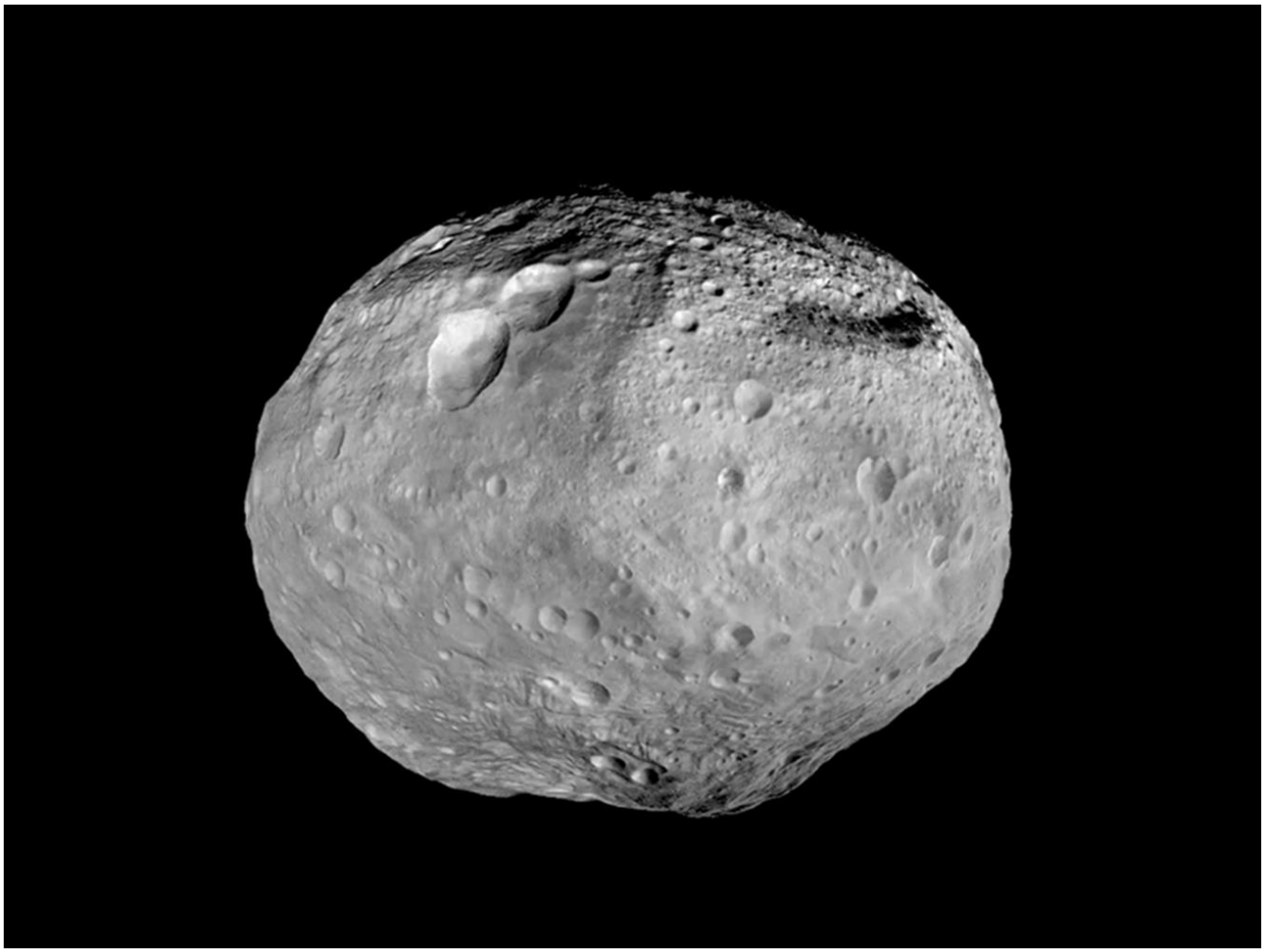
- Lorsque leur diamètre avoisine ou dépasse 1.000 km, ce qui est rarissime, leur forme peut être sphérique et ils peuvent prendre alors également le statut de planète naine. C'est le cas de Cérès. Dans le cas contraire, ils ont généralement une forme irrégulière et font partie de la classe des petits corps.
- Les astéroïdes (appelés météoroïdes pour les plus petits) pénétrant dans l'atmosphère d'un autre corps créent des météores. Si une partie de l'astéroïde réussit à toucher la surface du corps impacté, elle forme alors une météorite et peut créer un cratère d'impact.

En 1801, le premier astéroïde est découvert et nommé Cérès; il est le plus grand du système solaire. Depuis, plus de 580.000 astéroïdes du Système solaire ont été répertoriés (en 2015, date à laquelle une sonde spatiale a tourné pour la première fois autour de Cérès). Les premiers astéroïdes découverts ont une orbite située entre celles de Mars et de Jupiter, aussi cette zone est-elle appelée **la ceinture principale d'astéroïdes**. Une autre zone située au-delà de l'orbite de Neptune comporte une forte concentration d'astéroïdes : **la ceinture de Kuiper**.

1) La ceinture principale d'astéroïdes

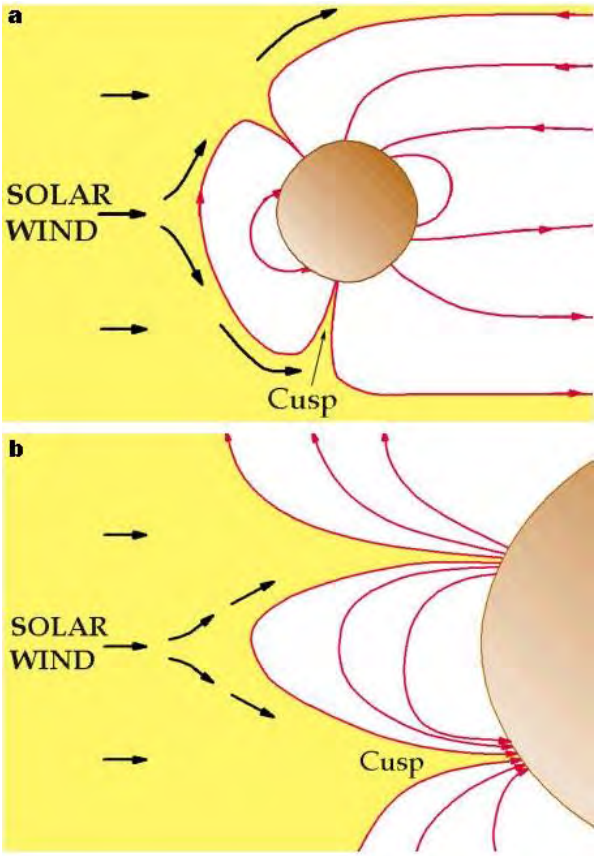
On suppose que les astéroïdes de la ceinture principale sont des restes d'un disque protoplanétaire qui ne se sont pas regroupés, notamment à cause de l'influence gravitationnelle de Jupiter, qui n'aurait pas permis l'accrétion d'une planète au niveau actuel de la ceinture principale.

L'astéroïde Vesta a-t-il un champ magnétique ?



Vesta, un des trois plus gros astéroïdes de la ceinture principale, avec un diamètre moyen de 530 km, pose aux scientifiques un problème depuis 30 ans. Pourquoi sa surface basaltique n'est pas altérée par le vent solaire, alors que les mers de la Lune qui sont identiques le sont ? Des chercheurs du **LESIA** (UMR, CNRS, Observatoire de Paris, Universités de Paris VI et VII), de l'Observatoire de Catane et du **CEREGE** (UMR CNRS, IRD, Universités d'Aix-Marseille 1 et 3), viennent de réaliser, en laboratoire, des tests d'irradiation d'échantillon. La seule explication plausible pour expliquer une telle différence serait la présence d'un champ magnétique autour de Vesta.

Le vent solaire (ions et électrons) affecte les corps du système solaire qui ne sont pas protégés par une atmosphère ou une magnétosphère (par exemple la Lune ou les astéroïdes), et change les propriétés optiques de leur surface. Cette altération modifie les propriétés spectrales des objets riches en silicate, induisant un assombrissement et un rougissement progressif de leur spectre en réflectance dans le domaine de longueur d'onde 0,2-2,5 µm.

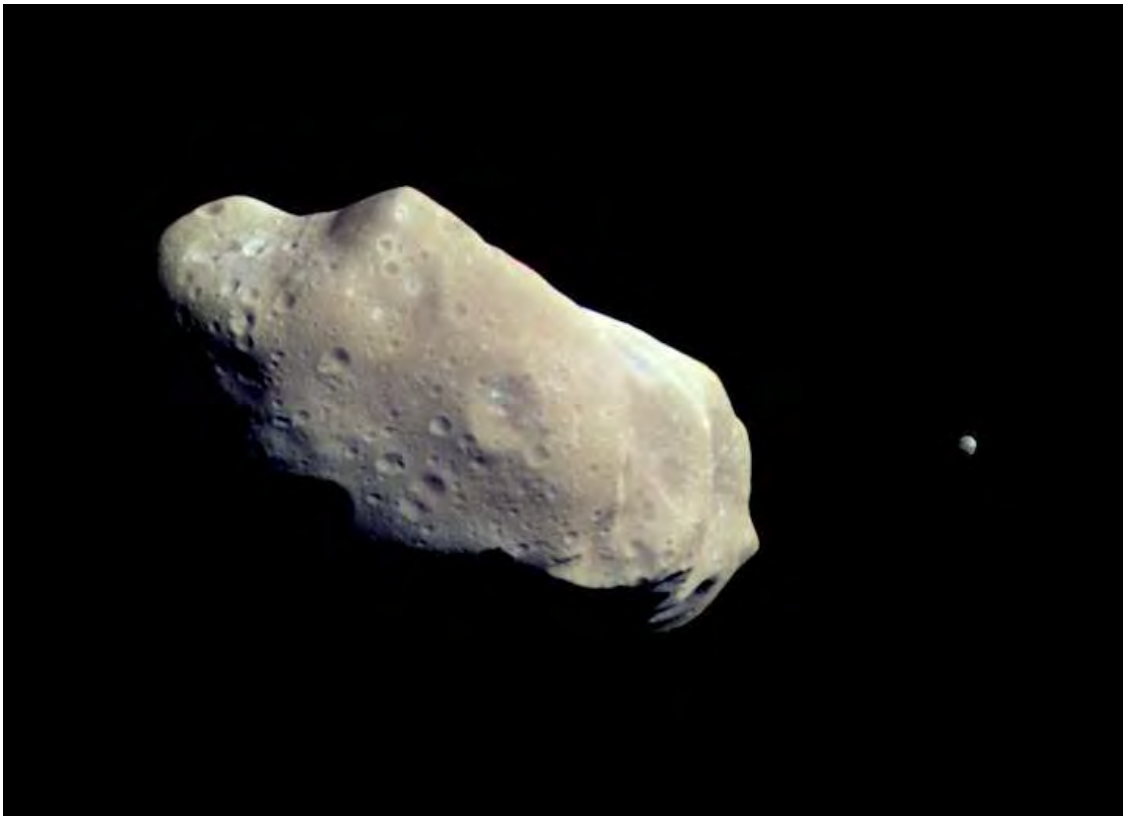


Schémas de 2 configurations possibles du champ magnétique de Vesta. En jaune, les régions directement accessibles aux particules du vent solaire. En blanc, les zones protégées par le champ magnétique. En rouge, les lignes de champ magnétique. En marron, Vesta. a) (en haut) Vesta protégé par un champ magnétique global, produisant une magnétosphère semblable à celle de la Terre. b) (en bas) Vesta protégé par des "magnétosphères" locales crustales. Dans ce cas, les ions peuvent atteindre les régions non protégées de la surface.

La surface de Vesta, qui est un des trois plus grands astéroïdes de la ceinture principale (D = 529 ± 10 kilomètres), est étonnamment primitive. Des expériences récentes d'irradiation avec des ions sur des pyroxènes ont montré un rougissement et un assombrissement significatifs des spectres. Etant donné que le pyroxène est un composant majeur de la surface de Vesta, comme le démontre la spectroscopie, on pourrait s'attendre à ce que le vent solaire change de manière significative les propriétés optiques de la surface de Vesta.

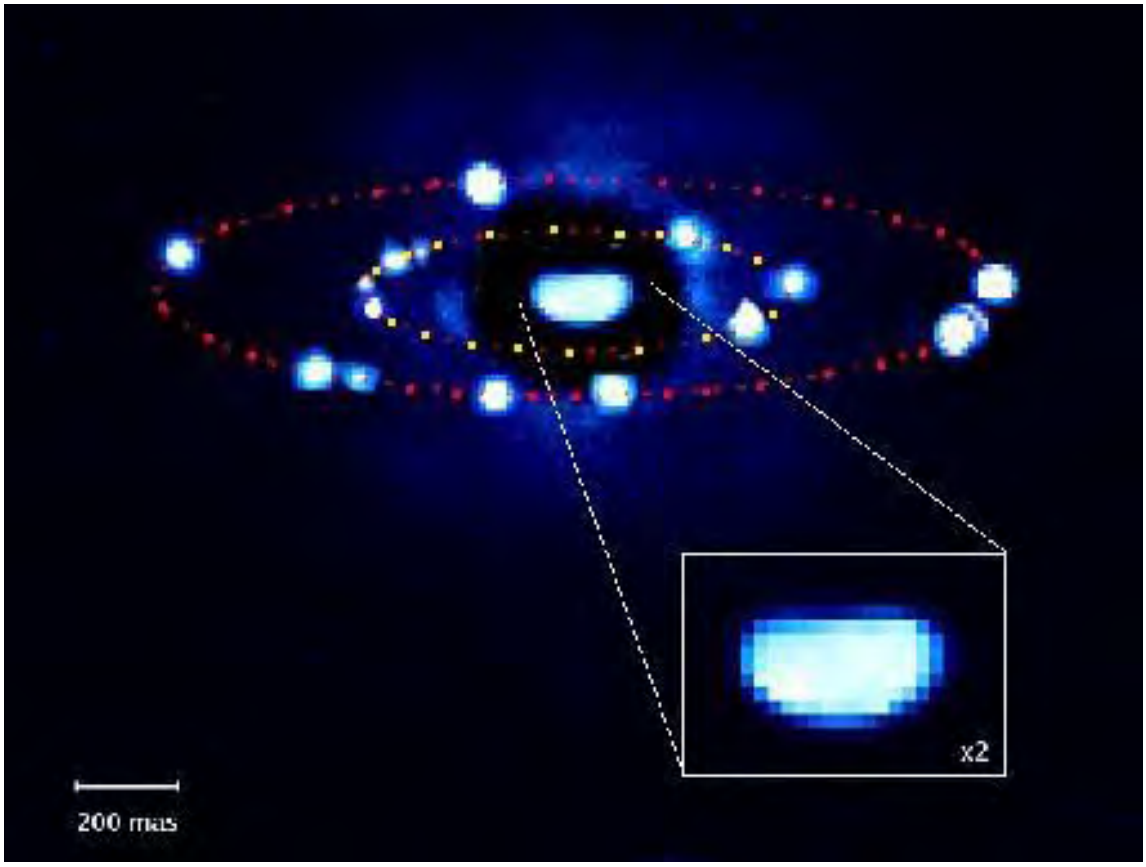
Pour répondre à ce questionnement une expérience d'irradiation a été effectuée à l'Observatoire de Catane par les chercheurs du LESIA sur une eucrite qui est une météorite basaltique caractéristique de la surface de Vesta. L'expérience montre qu'une irradiation d'une durée très courte à l'échelle des phénomènes astronomiques suffit à modifier les propriétés optiques de surface de l'échantillon d'eucrite.
Ce résultat implique que si les ions du vent solaire atteignent la surface de Vesta, son spectre devrait être plus rouge et son albédo plus bas. Il est donc indispensable que les particules du vent solaire ne puissent atteindre la surface de l'astéroïde. Un champ magnétique rémanent est le processus le plus probable permettant de former un obstacle à l'écoulement du vent solaire en le déviant. Les données actuelles ne permettent pas de faire la distinction entre un champ magnétique global produisant une magnétosphère de type terrestre et plusieurs blocs de matière crustale uniformément magnétisés produisant des "magnétosphères" crustales.

Certains astéroïdes ont des satellites. Les spécialistes estiment que 16 % des astéroïdes pourraient être accompagnés d'un satellite (ou plusieurs). En 2015 on avait dénombré 225 satellites d'astéroïdes. Le premier à avoir été découvert en 1993 est Dactyle, satellite de l'astéroïde Ida. *Voir Ida et Dactyle ci-après.*



L'astéroïde Sylvia possède deux satellites

Une équipe internationale comprenant des chercheurs de l'**IMCCE** (CNRS, Observatoire de Paris) vient de découvrir que l'astéroïde Sylvia ne possédait pas une lune, mais deux lunes. Cette observation a été réalisée avec un des télescopes du **VLT** de l'**ESO**, Yepun, munis du système d'optique adaptative NACO.



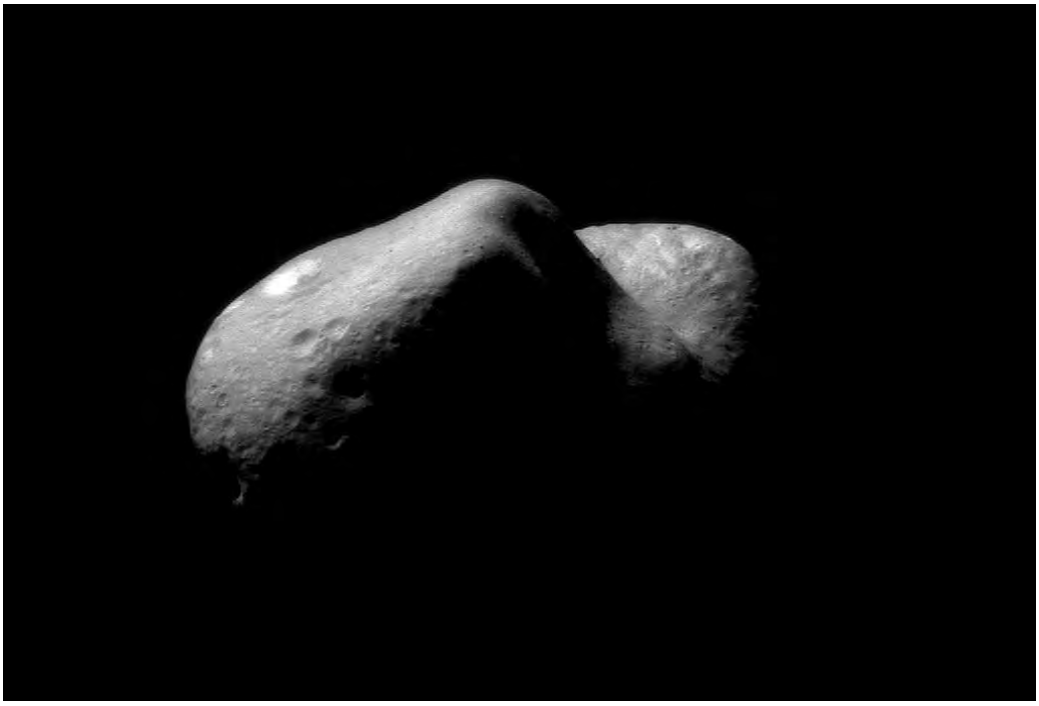
Positions de Rémus et Romulus d'août à octobre 2004. 87 Sylvia, d'une taille de 280 km est résolu sur cette image et est montrée dans la loupe. © UCB/IMCCE-Observatoire de Paris

Sylvia est un des plus gros astéroïdes de la ceinture principale se situant entre Mars et Jupiter. Il est de forme irrégulière avec un diamètre d'environ 280 km et est à une distance moyenne de 3,5 unités astronomiques du Soleil. En 2001 une première lune avait été découverte orbitant autour de Sylvia. Utilisant le système d'optique adaptive NACO équipant l'un des télescopes du VLT de l'ESO, l'équipe internationale a découvert, lors d'observation en 2004, une seconde lune autour de Sylvia. L'Union Astronomique Internationale les a baptisé Romulus et Rémus. Romulus, la première lune découverte, a un diamètre de 18 ± 4 km, est à 1 360 km de Sylvia et parcourt son orbite en 87,6 heures. Rémus, la nouvelle lune découverte, a un diamètre de 7 ± 2 km, est à 710 km de Sylvia et fait un tour complet autour de l'astéroïde en 33 heures.

L'astéroïde Sylvia a la particularité d'avoir une densité faible d'environ 1,2 g/cm^3. Il pourrait être constitué d'un agglomérat de matière, fragments dont la cohésion serait assurée par la force gravitationnelle. Des modèles développés par des chercheurs de l'Observatoire de la Côte d'Azur en 2003 ont montré que des astéroïdes pouvaient avoir une structure non monolithique, structure due à de violentes collisions entre astéroïdes conduisant à leur éclatement puis à une ré-accumulation gravitationnelle des fragments formant un nouvel astéroïde ayant une structure inhomogène. Au vu de la forme irrégulière de Sylvia, nous serions en présence d'un tel objet.

En fonction de ce modèle il reste à savoir si Romulus et Rémus, débris de la collision initiale, ont été capturés gravitationnellement par Sylvia lorsque celui-ci s'est agrégé, ou bien si des instabilités rotationnelles de Sylvia ont conduit à l'éjection de ces deux objets et à leur mise en orbite autour de l'astéroïde principal ?

L'astéroïde **Éros** a été approché par la sonde Near, qui a survolé l'objet en 2000 (photo ci-dessous). La sonde s'est ensuite posée sur l'astéroïde.



Couleur des astéroïdes :
La composition des astéroïdes est évaluée d'après leur spectre optique mesurant la lumière réfléchie, qui correspond à la composition de leur surface. Celle des météorites est connue avec l'analyse des fragments retrouvés sur Terre. Le système classique de classification spectrale des astéroïdes, élaboré en 1975, les classe selon un système basé sur leur couleur, leur albédo et leur spectre optique. Ces propriétés étaient censées correspondre à la composition de leur surface. Il faut noter, cependant, que certains types sont plus facilement détectables que d'autres. Ainsi, ce n'est pas parce que la proportion d'astéroïdes d'un type donné est plus importante qu'ils sont effectivement plus nombreux. Il existe des systèmes de classification plus récents, dont deux se démarquent : Tholen et SMASS.

À l'origine, la classification des astéroïdes se basait sur des suppositions au sujet de leur composition :

- type C – carbone
- type S – silice
- type M – métallique

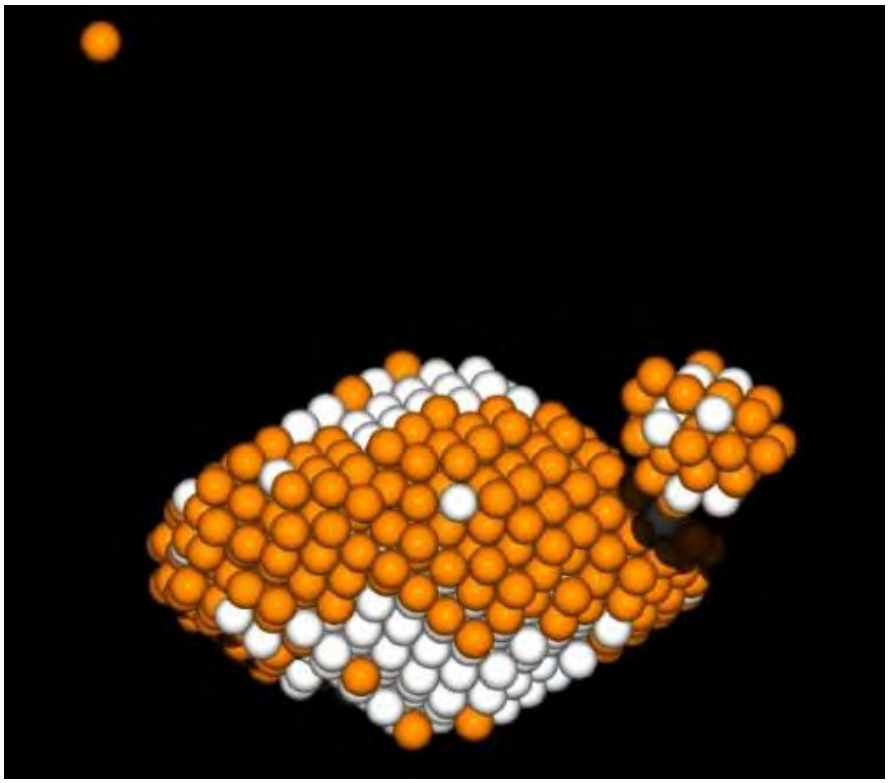
Mais ceci a porté à confusion, car le type spectral d'un astéroïde ne garantit pas sa composition.

La fragmentation par rotation à l'origine des astéroïdes binaires (CNRS)

Deux chercheurs du laboratoire CASSIOPEE (INSU-CNRS - Observatoire de la Côte d'Azur, Université de Nice) en collaboration avec un chercheur de l'Université de Maryland (USA) viennent de trouver par simulation numérique l'origine des astéroïdes binaires qui constituent 15% des deux populations d'astéroïdes, celle située entre Mars et Jupiter dans la Ceinture principale et celle croisant la trajectoire de la Terre. Un effet thermique est connu pour entraîner une augmentation de la vitesse de rotation d'un astéroïde. Lorsque celui-ci est un agrégat, l'accélération de sa rotation provoque un déplacement de matière des pôles vers l'équateur et un échappement de cette matière à l'équateur. Cette matière va de nouveau s'agréger pour former un satellite de l'astéroïde avec les propriétés observées. Ces travaux sont publiés dans la revue Nature du 10 juillet 2008.

Les astéroïdes binaires sont composés d'un corps central autour duquel tourne un petit satellite. Ces astéroïdes constituent 15% des populations des objets de la Ceinture Principale et des géocroiseurs, objets passant à proximité de la Terre. L'étude de la nature de la composition rocheuse de ces astéroïdes répond à une double problématique : mieux comprendre la structure des géocroiseurs qui nous "menacent", nous informer sur la composition initiale du Système Solaire que ces astéroïdes ont gardé en mémoire. L'existence d'astéroïdes binaires et leur origine peuvent nous révéler des informations sur les propriétés physiques de ces petits corps.

Ces astéroïdes doubles ont des propriétés bien caractéristiques : le corps central (dit "primaire") est en général presque sphérique, et le secondaire (le satellite) est sur une orbite presque circulaire autour du primaire. Des études montrent que des effets de marée peuvent casser un corps passant près d'une planète. Mais s'il y a formation d'un système binaire, d'une part ce système peut se déstabiliser rapidement lors d'un passage suivant, d'autre part la forme du primaire sera plutôt allongée, ce qui est contraire aux observations. Les effets de marée ne peuvent donc expliquer le fait que 15% des astéroïdes soient doubles avec un corps primaire de forme quasi-sphérique.



En page précédente : *Simulation numérique du processus : initialement, l'astéroïde est un agrégat constitué de roches liées par la gravitation. Quand la rotation de l'astéroïde accélère du fait de l'effet YORP, les roches situées à l'équateur vont pouvoir s'échapper, celles des pôles vont descendre vers l'équateur et aussi s'échapper. Parmi toutes ces roches qui s'échappent, sous certaines conditions, quelques-unes vont se ré-accumuler autour de l'astéroïde et former ainsi un satellite. Sur la figure, les particules en orange sont celles qui étaient initialement à la surface de l'astéroïde et celles en blanc étaient initialement situées au-dessous de la surface. La figure montre bien que les pôles du corps primaire ont été ainsi "dégarnis" et qu'ils sont maintenant constitués de matière "fraîche" (non exposée aux radiations solaires) qui était initialement sous la surface. Cela rend l'exploration des astéroïdes binaires particulièrement intéressante pour observer l'intérieur d'un objet sans avoir à creuser. © OCA. INSU.*

Dans l'article à paraître dans Nature le 10 juillet, les trois chercheurs montrent, par simulation numérique, qu'il existe un mécanisme très robuste pour former les astéroïdes binaires avec les bonnes propriétés : l'effet Yorp. Il s'agit d'un effet thermique, qui tient compte de l'éclairement du Soleil, de la forme de la surface de l'astéroïde, et du taux d'absorption du rayonnement par cette surface. Cet effet peut augmenter ou diminuer le taux de rotation des astéroïdes de taille kilométrique. Il a déjà été observé récemment sur deux astéroïdes géocroiseurs.

Les chercheurs ont donc simulé l'augmentation du taux de rotation d'un astéroïde due à cet effet, en représentant l'objet par un agrégat composé de sphères liées par gravité, hypothèse en accord avec différentes études et observations. Ils ont mis en évidence deux phénomènes lorsqu'un corps de ce type se met à tourner de plus en plus vite. Certaines particules descendent du pôle vers l'équateur et l'astéroïde perd de ces morceaux depuis son équateur, là où la force centrifuge est la plus élevée.

Ci-dessous : *Image radar d'un astéroïde binaire réel 1999 KW4. La forme du primaire produit par la simulation est en parfait accord avec l'observation, ainsi que la taille du secondaire. A la fin de la simulation la séparation entre les deux objets sera similaire à celle de 1999KW4. © Ostro et al. NASA.*

Ces particules, qui s'échappent, vont se ré-accumuler pour former un satellite. Le primaire du fait de l'aplatissement de ses pôles, contrebalancé par l'échappement de matière au niveau de l'équateur, aura une forme approximativement sphérique. Les particules s'échappant, si elles sont constituées de matériaux suffisamment poreux, pourront se ré-accumuler d'une manière stable. Le résultat final sera donc un astéroïde double, composé d'un primaire assez sphérique, d'un secondaire dont la taille par rapport à celle du primaire est similaire à celles observées, et dont l'orbite est aussi similaire aux observations. Le résultat final est même très similaire à l'image radar du binaire 1999 KW4.

L'effet YORP semble bien être à l'origine de la grande fraction des binaires observés. Mais ceci fait aussi apparaître que les objets binaires sont préférentiellement issus d'un agrégat, et non d'un monolithe, ce qui est en accord avec l'idée que ces astéroïdes sont poreux. Ceci a des implications fortes dans la définition

des stratégies de défense pour faire face au risque d'impact. Un autre résultat très intéressant est que ce sont les particules de la surface du primaire, qui viennent du pôle et s'échappent de l'équateur, qui forment le secondaire. Ainsi on peut s'attendre à ce que la surface du primaire soit plus "fraîche" que celle du secondaire, comme si on lui enlevait sa première peau en laissant apparaître de la matière n'ayant pas subi d'interaction avec le milieu environnant. Ce serait donc très intéressant d'aller voir un tel objet, voire même de récolter un échantillon, comme la mission Marco Polo en phase d'étude à l'Agence Spatiale Européenne se propose de le faire sur un astéroïde primitif, car ce serait une façon d'avoir des informations de sous-surface sans avoir à creuser !

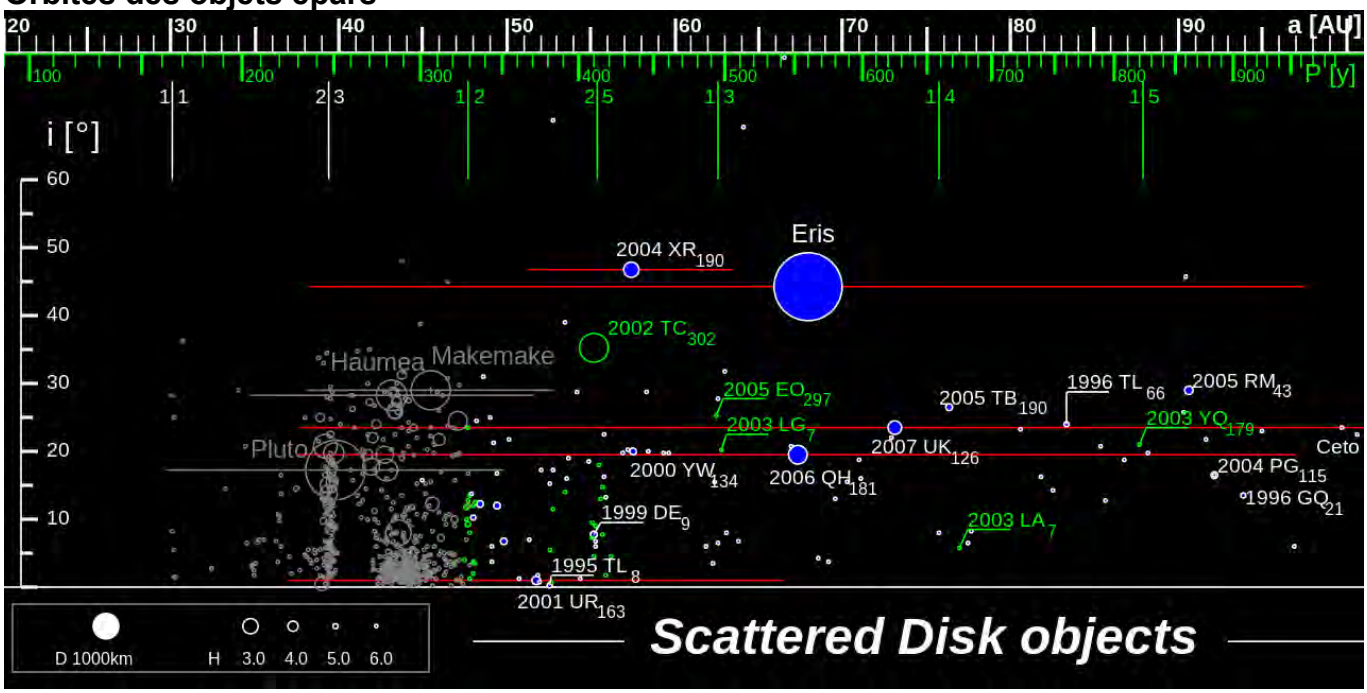
2) La ceinture de Kuiper

La composition des astéroïdes de la ceinture de Kuiper est plus riche en glace et plus pauvre en métaux et en roches, ce qui les apparente plus à des noyaux cométaires. Contrairement aux comètes les astéroïdes sont généralement inactifs, cependant quelques-uns ont été observés avec une activité cométaire (développement d'une queue à l'approche du Soleil). On trouve également, dans la ceinture de Kuiper, d'autres corps que les astéroïdes que l'on appelle des **objets épars**.

Les objets épars

Le **disque des objets épars** est un ensemble regroupant les objets transneptuniens au-delà de la ceinture de Kuiper (à environ 30 à 48 ua) dont l'orbite est fortement excentrique. La distance des objets épars au Soleil varie énormément et peut atteindre une centaine d'ua et plus ; leur orbite est souvent excentrique contrairement aux cubewanos, les *objets classiques* de la ceinture de Kuiper.

Orbites des objets épars



Le diagramme ci-dessus illustre les orbites de tous les objets épars connus jusqu'à 85 ua avec les objets de la ceinture de Kuiper (en gris) et les objets résonants (en vert), pour la comparaison. L'excentricité des orbites est représentée par les segments rouges (du périhélie à l'aphélie) avec l'inclinaison représentée sur l'axe vertical. À noter par exemple l'orbite peu commune, presque circulaire et très inclinée, de 2004 XR_{190}.

Le disque des objets épars (jusqu'à 100 ua). La ceinture de Kuiper représentée en gris, les objets en résonance dans le disque sont représentés en vert.
La position d'un objet représente :

- Le demi-axe de son orbite **a** en ua et sa période orbitale en années (axe des abscisses)
- L'inclinaison **i** de son orbite en degrés (axe vertical des ordonnées).

La taille du cercle illustre la taille de l'objet par rapport à la taille relative des autres objets. Pour quelques grands objets, le diamètre dessiné représente la meilleure estimation actuelle. Pour les autres, le cercle représente la magnitude absolue de l'objet. L'excentricité de son orbite est montrée indirectement par un segment s'étendant de la gauche (périhélie) vers l'aphélie à droite. En d'autres mots, le segment illustre les variations de la distance de l'objet au Soleil. Les objets ayant des orbites quasi-circulaires auront un segment court tandis que les objets avec des orbites fortement elliptiques seront représentés par des segments longs. Les résonances principales avec Neptune sont marquées par des barres verticales. 1:1 marque la position de l'orbite de Neptune (et de ses astéroïdes troyens), 2:3 marque l'orbite de Pluton (et de ses lunes) etc.

Périhélie des objets épars

Les objets épars suivent typiquement des orbites de moyenne ou grande excentricité mais leur périhélie ne les amène jamais à moins de 35 unités astronomiques du Soleil, bien à l'abri de l'influence directe de Neptune (les segments rouges). Les plutinos (les segments gris pour Pluton et Orcus) ainsi que les objets résonants (en vert) peuvent s'approcher plus près de Neptune, leurs orbites étant protégées par des résonances orbitales. Cette caractéristique du périhélie minimal est en fait une des caractéristiques qui définissent les objets épars.

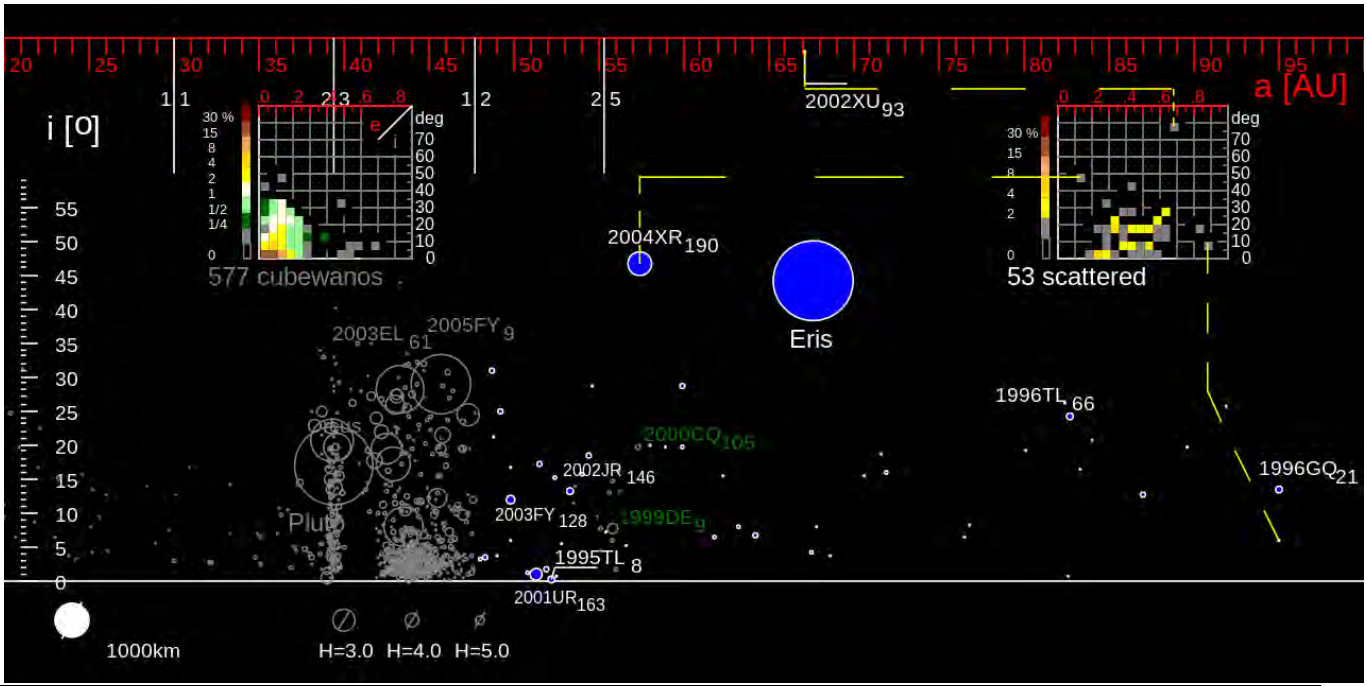
Extrêmes

Le disque des objets épars contient des éléments d'une extrême excentricité et d'une grande inclinaison, les orbites circulaires sont des exceptions. Quelques-unes de ces orbites exceptionnelles sont représentées en jaune :

- 1999 TD_{10} suit une orbite d'une extrême excentricité, son périhélie étant près de l'orbite de Saturne
- 2002 XU_{93} est à présent l'objet à l'orbite la plus inclinée
- 2004 XR_{190} suit une orbite peu commune, très inclinée mais presque circulaire.

Comparaison avec les objets classiques

Deux petits graphes statistiques insérés dans le diagramme comparent l'excentricité et l'inclinaison des orbites entre la population des objets épars et celle des objets classiques. Chaque petit carré représente une plage pour les deux paramètres. Le nombre des objets correspondants est représenté en couleurs cartographiques. Les deux populations sont très différentes ; plus de 30 % de tous les cubewanos sont sur les orbites peu inclinées, presque circulaires et pour les autres l'excentricité ne dépasse pas 0,25. Par contre, les paramètres des orbites des objets épars sont plus variés. La majorité de la population a une excentricité moyenne entre 0,25 et 0,55. Quelques orbites extrêmes sont représentées en gris. À l'exception de 2004 XR_{190} on ne connaît pas d'objets épars avec une excentricité inférieure à 0,3. C'est donc l'excentricité, plus que l'inclinaison, qui est la caractéristique distinctive de la classe des objets épars.



Graphique principal

La position d'un objet représente

- le demi-axe de son orbite **a** en ua (axe horizontal : abscisse)
- l'inclinaison de l'orbite **i** en degrés (axe vertical : ordonnées).

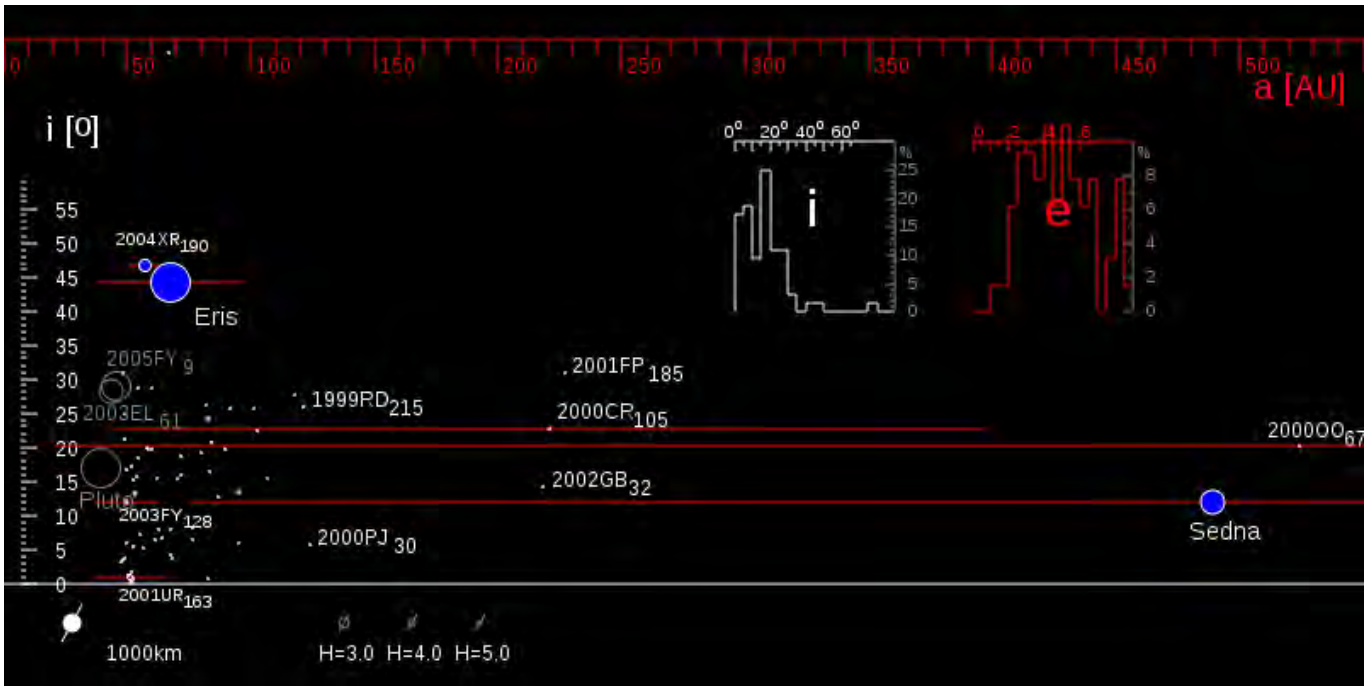
La taille du cercle illustre la taille de l'objet par rapport à la taille relative des autres objets. Pour quelques grands objets, le diamètre dessiné représente la meilleure estimation actuelle. Pour les autres, le cercle représente la magnitude absolue de l'objet.

Graphique e/i

- ordonnées : inclinaison de l'orbite **i** en degrés, avec des intervalles de 5°
- abscisses : excentricité de l'orbite **e** avec des intervalles de 0.05
- chaque petit carré représente une échelle donnée pour l'excentricité **e** et l'inclinaison **i**

Comme les orbites quasi-circulaires occupent la première colonne (e<0.05) et que l'orbite avec la plus petite inclinaison i <5% occupe la ligne la plus basse, le carré dans le coin inférieur droit représente le nombre d'objets aux orbites presque circulaires avec des inclinaisons très faibles

- la population relative est représentée avec des couleurs cartographiées : (depuis les petits nombres montrés en vert, jusqu'aux pics marron. Les couleurs sont indiquées en pourcentage
- Un carré gris représente un seul objet dans cette population



Graphique principal

La position d'un objet représente

- Le demi-axe de son orbite **a** en u.a. (abscisses)
- L'inclinaison de son orbite **i** en degrés (ordonnées)

La taille du cercle illustre la taille de l'objet par rapport à la taille relative des autres objets. Pour quelques grands objets, le diamètre dessiné représente la meilleure estimation actuelle. Pour les autres, le cercle représente la magnitude absolue de l'objet. L'excentricité de son orbite est montrée indirectement par un segment s'étendant de la gauche (périhélie) vers l'aphélie à droite. En d'autres mots, le segment illustre les variations de la distance de l'objet au Soleil. Les objets ayant des orbites quasi-circulaires auront un segment court tandis que les objets avec des orbites fortement elliptiques seront représentés par des segments longs. Les résonances principales avec Neptune sont marquées par des barres verticales. 1:1 marque la position de l'orbite de Neptune (et de ses astéroïdes troyens), 2:3 marque l'orbite de Pluton (et de ses lunes) etc.

Histogrammes

Les histogrammes montrent la population de certains objets dont les paramètres (respectivement l'excentricité **e** et l'inclinaison **i**) dans un intervalle donné. La population est exprimée en % de la population totale (axe des ordonnées) :

- Pour l'inclinaison, quand l'intervalle est de 5°, soit la première graduation, cela montre la population relative d'objets dans un intervalle **i** de 0 à 5°, la suivante est pour l'intervalle 5 à 10°, etc.
- Pour l'excentricité **e**, quand l'intervalle est de 0.1, soit la première graduation, cela montre la population relative d'objets avec **e** dans l'intervalle 0-0.1 (orbites quasi-circulaires).

Comparaison des orbites

Le graphique à gauche représente la vue polaire et écliptique des orbites (préalablement alignées) des objets épars comparées avec celles des cubewanos (en bleu) et des objets résonants (en vert). Les objets non classés sont montrés en gris. L'anneau bleu n'est pas une vision d'artiste mais la représentation réelle de centaines des orbites des objets classiques méritant le nom de la ceinture classique. Le périhélie minimal est représenté par le cercle rouge. Contrairement aux objets épars, les objets résonants s'approchent de l'orbite de Neptune (en jaune). En vue écliptique, les arcs illustrent le même périhélie minimal à 35 ua (en rouge) et l'orbite de Neptune (en jaune). Comme le montre cette vue, les objets épars ne se distinguent pas par l'inclinaison ; c'est plutôt l'excentricité qui les définit vraiment.

Les deux projections

- Les nœuds des orbites sont amenés à 270° et le périhélie à 0° pour simplifier la comparaison des périhélies et aphélies.
- Objets représentés : classiques en bleu, avec une résonance 2:5 en vert, classés comme épars en noir, non formellement classés en gris.

Vue Polaire

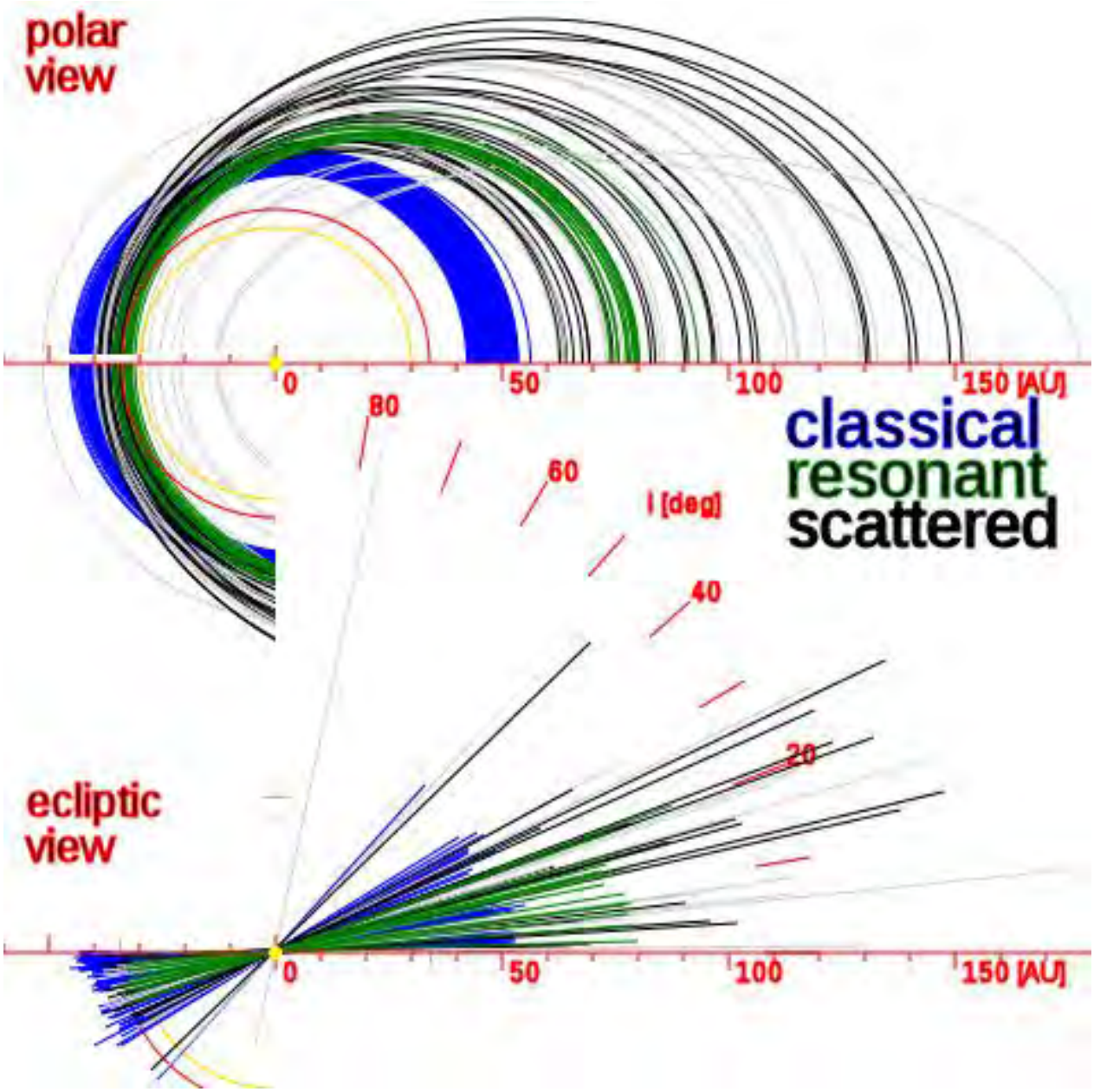
Les orbites alignées sont inclinées sur l'écliptique (c'est-à-dire tournées autour de la ligne des nœuds avec un angle opposé à l'inclinaison) pour permettre des comparaisons faciles des périhélies et aphélies.

- Coordonnées polaires
    - Distance au Soleil (le petit disque doré) en ua
    - L'argument n'est pas dessiné
- Le cercle rouge est à 35 ua (limite du périhélie, limite de la stabilité avec Neptune)
- Cercle jaune : 30 ua (~Orbite de Neptune)
- Remarquez comment les objets classiques sont toujours primordiaux, orbites à faible excentricité

Vue écliptique

La projection des orbites alignées sur le plan (en regardant l'écliptique depuis son bord). Le point de vue est le nœud ascendant.

- Coordonnées polaires.
    - Axe : distance au Soleil. Périhélie à gauche, aphélie à droite.
    - Angle : inclinaison de l'orbite en degrés
- Arc rouge : 35 ua limite du périhélie
- Arc jaune : 30 ua périhélie de l'orbite de Neptune



Découverte

Le premier objet découvert est (15874) 1996 TL_{66}, en 1996, (toutefois (48639) 1995 TL_8 a été ajouté depuis), d'autres ont suivi dès 1999, en 2011 on en comptait plus de 200.
Ces découvertes sont dues au progrès de l'astronomie, notamment à la caméra CCD.

Quelques objets épars remarquables :

	Péréhélie (ua)	Aphélie (ua)	Dimensions (km)	Inclinaison / Ecliptique	Excentricité
1996 TL_{66}	52,6	197,6	339 à 575	24°	0,582
1999 DE_9	32,29	79,57	461 ± 45	7,6°	0,422
2001 UR_{163}	36,96	65,96	636	0,8°	0,281
2002 RP_{120}	2,473	107,29	14,6	119,112°	0,954
(90377) Sedna	76,06	954,94	995	11,929°	0,85245
2000 CR_{105}	44,2675541	413,248	242 à 333	22,7113°	0,8064871
(136199) Éris	37,736	97,561	2326	44,198°	0,44218
2004 XR_{190}	51,03	63,78	335 à 850	46,73526°	0,111042
2006 SQ_{372}	24,14	1461	110	19,49°	0,9677

NB : **Éris** est désormais une planète naine et **Sedna** est un objet épars qui est potentiellement une future planète naine.

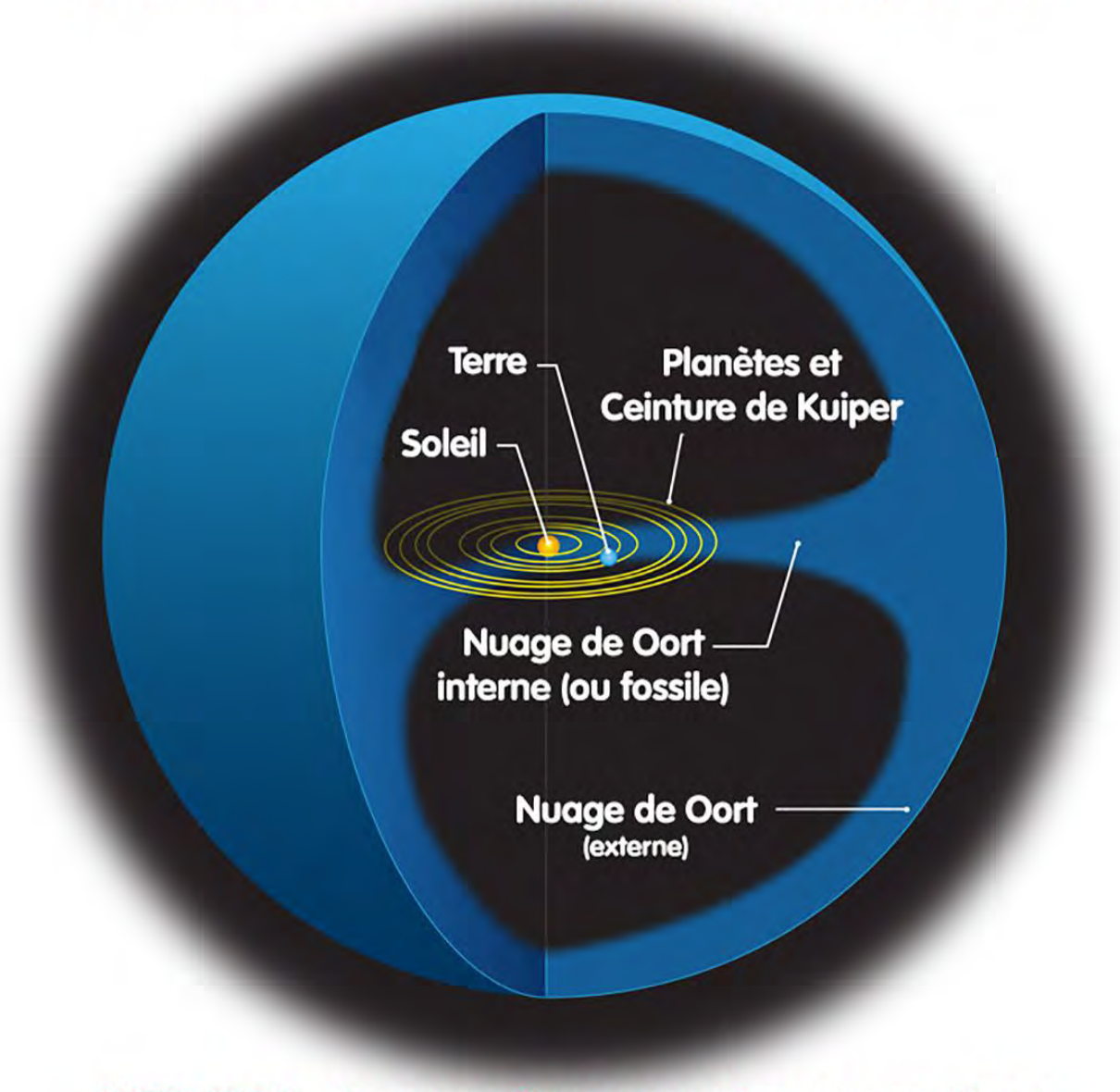
3) Le nuage d'Oort

Cet espace, hypothétique mais fortement probable, s'étendrait de 100+ unités astronomiques du Soleil jusqu'à une limite estimée entre 100.000 et 155.000 unités astronomiques (ce qui représente plus de 2 années-lumière) ! Cela représente des distances considérables et donc un volume encore plus gigantesque. Ce volume, bien que composé essentiellement de vide contient quand même des objets petits et quasiment innombrables. Les distances, depuis la Terre, sont si grandes qu'il est très difficile de voir ou de détecter la plupart de ces objets. En conséquence on sait très peu de choses sur la population du nuage d'Oort : il est invisible, même par de puissants télescopes et n'a jamais été atteint par une sonde envoyée depuis la Terre.

On estime à plusieurs centaines de milliards d'objets épars, astéroïdes, petits corps et comètes la population de cette zone.

Certains objets ayant leur périhélie dans la ceinture de Kuiper ont une excentricité si élevée que leur périhélie s'étend jusqu'au nuage de Oort, du moins le nuage de Oort fossile. C'est le cas, par exemple, de **Sedna** dont les distances extrêmes au Soleil vont de 76 à 955 ua

Schéma montrant la forme sphérique du nuage de Oort



ATTENTION : les proportions ne sont pas respectées !

Nous pensons que le nuage d'Oort est peuplé de milliards de comètes, dont nous parlerons dans la dernière partie de ce document.

En fait, ce nuage serait composé de deux éléments distincts :

• le nuage de Oort interne (ou « nuage d'Oort fossile », ou « nuage de Hills ») qui va de 100 à 3.000 ua du Soleil. Cette partie serait (comme l'écliptique et la ceinture de Kuiper) plutôt plate et dans le même plan, allant en s'évasant vers l'extérieur.
• le nuage d'Oort externe, de forme sphériques qui va de 3.000 à 155.000 ua.

Outre les comètes, il y a aussi de nombreux corps, également gelés, dont certains pourraient peut-être prétendre au statut de planète naine s'ils remplissent les conditions de l'UAI. Mais comme ce sont de très petits objets qui sont extrêmement éloignés de nous, il est très difficile, voire impossible, de les voir et de les étudier sérieusement.

L'hypothèse la plus probable de la formation du nuage d'Oort remonte aux premiers temps de la formation du système solaire où il se serait formé d'objets éjectés aux premières heures du système solaire par des phénomènes comme la résonance avec les planètes géantes.

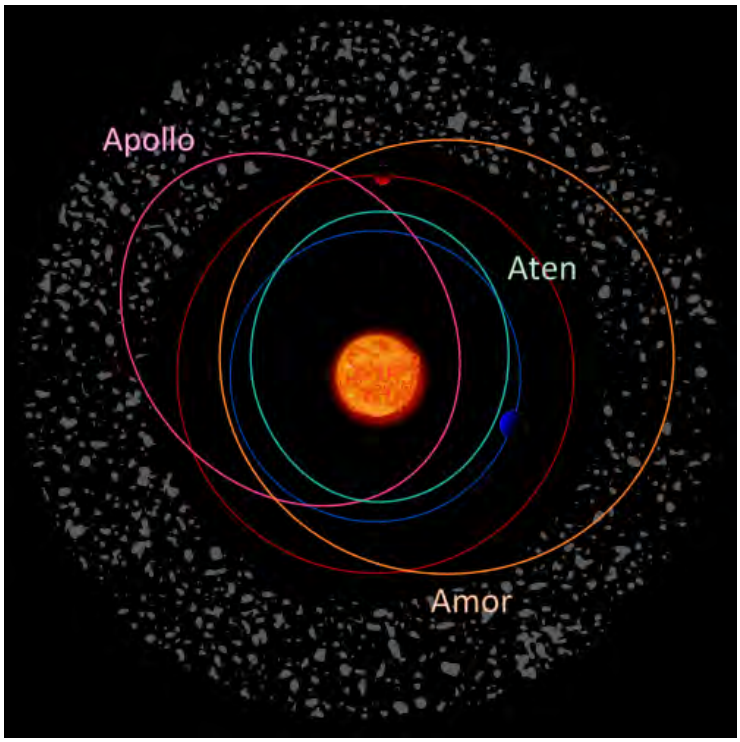
A contrario, les corps de la ceinture de Kuiper se sont probablement formés sur place, là où ils se trouvent actuellement.

B - Les astéroïdes « géocroiseurs »

En astronomie, les **astéroïdes géocroiseurs** sont des astéroïdes évoluant à proximité de la Terre. Pour les nommer on utilise souvent l'abréviation *ECA* (de l'anglais *Earth-Crossing Asteroids*, astéroïdes croisant l'orbite de la Terre), astéroïdes dont l'orbite autour du Soleil croise celle de la Terre, ayant un aphélie inférieur à celui de Mars, soit 1,381 ua (valeur d'1,300 ua fixée par les spécialistes américains).

Les NEA (*Near-Earth Asteroids*, astéroïdes proches de la Terre) sont aussi souvent, par abus et à tort, appelés en français géocroiseurs même si certains ne croisent pas l'orbite de la Terre (voir ci-dessous). Le terme francophone de *circastéroïde* a également été utilisé par certains auteurs pour cette même définition.

Parmi les NEA, on distingue trois familles principales :
• les Atons, qui possèdent un demi-grand axe de moins d'une ua;
• les Apollons, qui croisent l'orbite de la Terre avec une période supérieure à un an;
• les Amors, qui sont des frôleurs extérieurs et ne sont donc pas des géocroiseurs au sens strict du terme.



↑ *Classification des astéroïdes géocroiseurs (en bleu l'orbite de la Terre)*

Au 31 décembre 2017, la NASA a identifié :
- 106 comètes de type géocroiseur
- 18 astéroïdes géocroiseurs de type Atira
- 1.284 astéroïdes géocroiseurs de type Aten
- 9.520 astéroïdes géocroiseurs de type Apollo
- 6.618 astéroïdes géocroiseurs de type Amor

soit un total de 17.440 astéroïdes géocroiseurs. Parmi eux 886 ont un diamètre d'au moins un kilomètre, et 7.991 un diamètre supérieur ou égal à 140 mètres. La NASA considère que le recensement des premiers est terminé, et se fixe désormais comme objectif de répertorier 90% des seconds.

On appelle astéroïdes géofrôleurs (en abrégé *EGA*, sigle de *Earth-Grazing Asteroids*) les astéroïdes ayant une distance minimale à l'orbite terrestre inférieure à 0,100 ua et *PHA* (sigle de *Potentially Hazardous Asteroids*, astéroïdes potentiellement dangereux APD en français) ceux de magnitude absolue H < 22 (soit plus de 130 mètres de diamètre moyen) et qui peuvent passer à l'intérieur d'un cercle de 0,05 ua situé dans le plan de l'écliptique à 1,0 ua du Soleil.

Les astéroïdes géocroiseurs appartiennent au groupe des objets géocroiseurs (en anglais, *NEO* : *Near Earth Object*), qui comprend également quelques comètes. Certains de ces objets étant susceptibles de heurter la Terre, ils font l'objet d'une recherche et d'un suivi particulier.

Détection des astéroïdes géocroiseurs

Dans la seconde moitié du XX° siècle, différents travaux scientifiques ont permis de découvrir la menace que constituerait l'impact d'astéroïdes pour la vie sur Terre. La NASA a mis sur pied en 1998 le programme Spaceguard de détection des astéroïdes géocroiseurs (dont l'orbite coupe celle de la Terre) ayant un diamètre supérieur à 1 km. Cette dimension a été retenue car l'impact d'un tel astéroïde pourrait amener l'extinction de l'humanité. On estime qu'il existe moins de 1.200 astéroïdes dans cette catégorie. Un objet de ce type frappe la Terre environ tous les 500 000 ans. Fin 2008, près de 90 % des objets de cette dimension ont été recensés. Ces dernières années plusieurs programmes de détection de la NASA (LINEAR, NEAT, Spacewatch, LONEOS, Catalina Sky Survey, ADAS) ou d'autres pays (CINEOS,…) ont été mis sur pied pour identifier les objets de plus petite taille. Ces programmes utilisent des télescopes dédiés à cette tâche et basés sur Terre. Le programme NEOWISE exploite les capacités du télescope spatial infrarouge WISE pour identifier une sous-catégorie des astéroïdes géocroiseurs baptisée PHA (*Potentially hazardous asteroid*) qui se définit comme ceux dont l'orbite coupe celle de la Terre à moins de 8 millions de km de celle-ci (soit 20 fois la distance Terre-Lune). Les résultats de cette étude, achevée en 2012, permettent d'estimer qu'il existe environ 4.000 à 5.000 astéroïdes de ce type ayant une taille comprise entre 100 mètres et un kilomètre dont 20 à 30 % sont aujourd'hui identifiés. Il existe par ailleurs un demi-million d'astéroïdes géocroiseurs d'une taille comprise entre 50 et 100 mètres. Un de ces objets frappe la Terre statistiquement tous les mille ans (un astéroïde de moins de 50 mètres tous les 100 ans). Début 2013 seule une faible fraction de ces objets a été détectée.

Risques d'impacts et conséquences selon la taille des astéroïdes :

- Taille du corps : < 10 m :
  Fréquence d'impact : 200 fois par an;
  Conséquence d'une chute sur la Terre : désintégration dans l'atmosphère.

- Taille du corps : 10 à 100 m :
  Fréquence d'impact : une fois par siècle (exemples connus : Meteor Crater, Arizona, il y a 50 000 ans ; Toungouska, Sibérie, 30 juin 1908);
  Conséquence possible d'une chute sur la Terre : destruction d'une ville, raz-de-marée.

- Taille du corps : 100 m à 1 km :
  Fréquence d'impact : une fois tous les 5 000 à 30 000 ans
  Conséquence probable d'une chute sur la Terre : environ cinq millions à cent millions de morts.

- Taille du corps : > 5 km :
  Fréquence d'impact : une fois tous les 100 millions d'années;
  Conséquence d'une chute sur la Terre : hiver d'impact, disparition de l'humanité, catastrophe globale.

- Taille du corps : de 100 à 200 km
  Fréquence d'impact : une fois tous les 1 milliard d'années;
  Conséquence d'une chute sur la Terre : vaporisation des océans, disparition de toute forme de vie sur Terre.

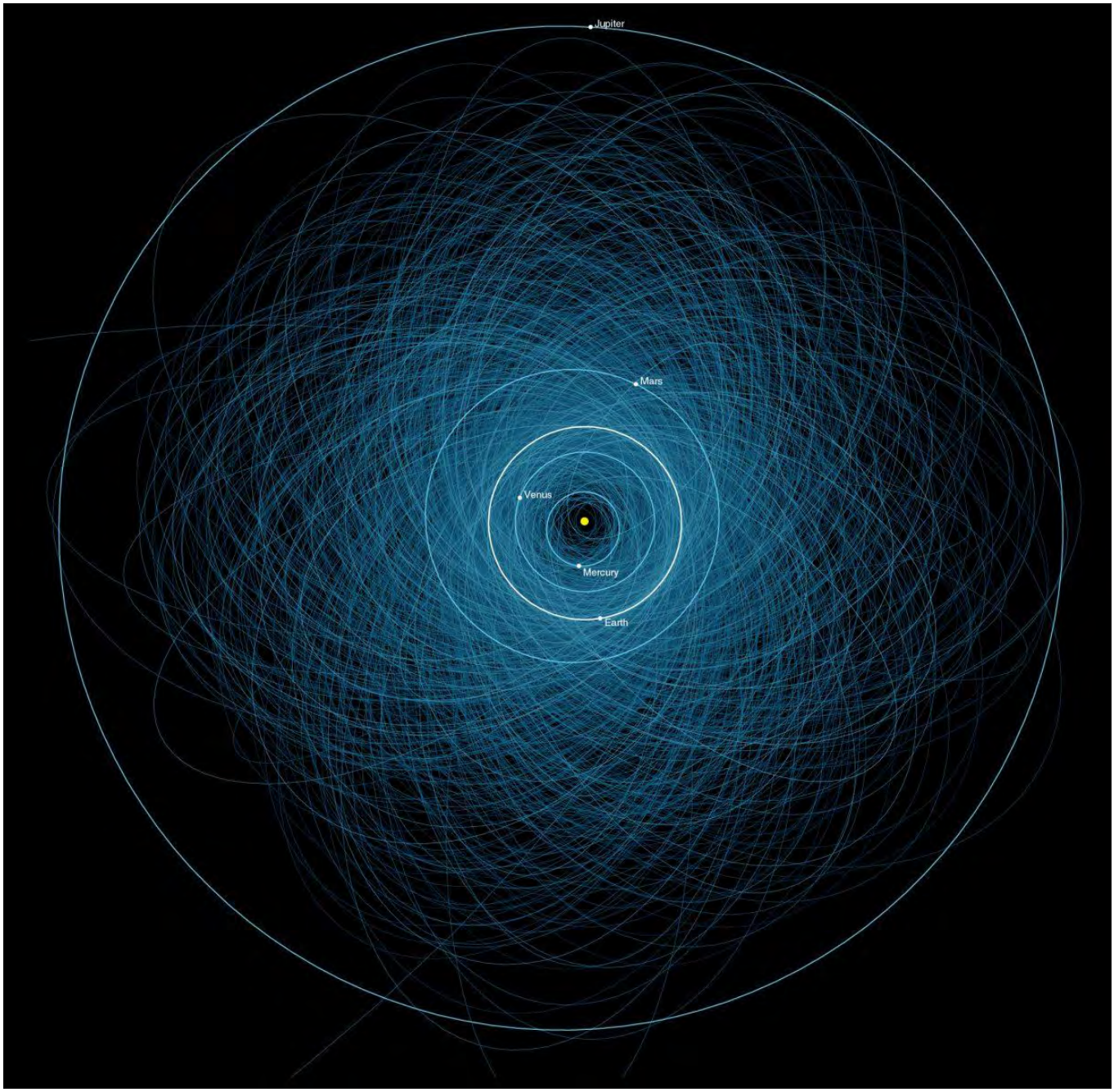


Image quelque peu « anxiogène » des orbites des astéroïdes géocroiseurs de plus de 140 mètres suivis en 2013

Outre les géocroiseurs, il existe d'autres regroupements d'astéroïdes, suivant qu'ils croisent l'orbite d'une autre planète du Système solaire. Certains astéroïdes peuvent faire partie de plusieurs regroupements. Il est à noter que si le terme de géocroiseur est répandu (**géo-** étant le préfixe associé à la Terre), ceux qui suivent sont très rarement employés :

Herméocroiseurs : croisent l'orbite de Mercure
Cythérocroiseurs : croisent l'orbite de Vénus
Géocroiseurs : croisent l'orbite de la Terre
Aréocroiseurs : croisent l'orbite de Mars
Zénocroiseurs : croisent l'orbite de Jupiter
Kronocroiseurs : croisent l'orbite de Saturne
Ouranocroiseurs : croisent l'orbite d'Uranus
Poséidocroiseurs : croisent l'orbite de Neptune
Hadéocroiseurs : croisent l'orbite de Pluton (qui n'est plus reconnue comme planète depuis 2006 mais comme une planète naine).

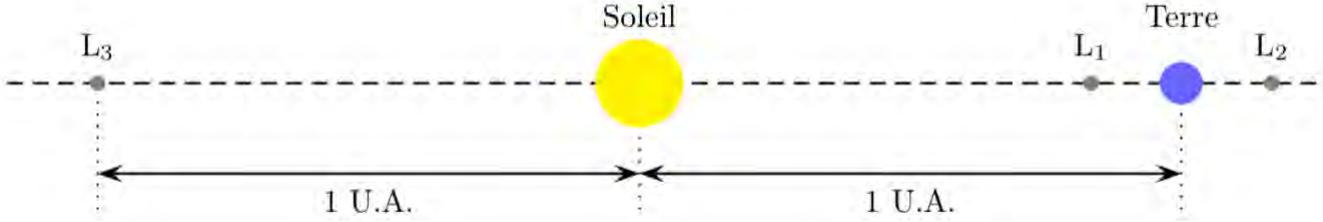
C – Les astéroïdes « troyens »

Ce sont des astéroïdes qui ne présentent, à priori, aucun danger pour la Terre, dans la mesure où ils partagent l'orbite d'une planète, dans un équilibre très stable puisqu'ils sont situés aux points de Lagrange 4 et 5 de l'orbite de leur planète.

Que sont les points de Lagrange ? Iles résolvent la problématique de l'équilibre d'un système à trois corps.

Un **point de Lagrange** (noté L_1 à L_5), ou, plus rarement, **point de libration**, est une position de l'espace où les champs de gravité de deux corps en orbite l'un autour de l'autre, et de masses substantielles, fournissent exactement la force centripète requise pour que ce point de l'espace accompagne simultanément l'orbite des deux corps. Dans le cas où les deux corps sont en orbite circulaire, ces points représentent les endroits où un troisième corps de masse négligeable resterait immobile par rapport aux deux autres, au sens où il accompagnerait à la même vitesse angulaire leur rotation autour de leur centre de gravité commun sans que sa position par rapport à eux n'évolue. Au nombre de cinq, ces points se scindent en deux points stables dénommés L_4 et L_5, et en trois points instables notés L_1 à L_3. Ils sont nommés en l'honneur du mathématicien français Joseph-Louis Lagrange. Ils interviennent dans l'étude de certaines configurations d'objets du Système solaire (principalement pour les points stables) et dans le placement de divers satellites artificiels (principalement pour les points instables). Ce sont les points remarquables de la « géométrie de Roche » (points-col et extrema) laquelle permet notamment de classer les différents types d'étoiles binaires. Les trois points L_1, L_2 et L_3 sont parfois appelés les **points d'Euler**, en l'honneur de Leonhard Euler, l'appellation de **points de Lagrange** étant alors réservées aux deux points L_4 et L_5.

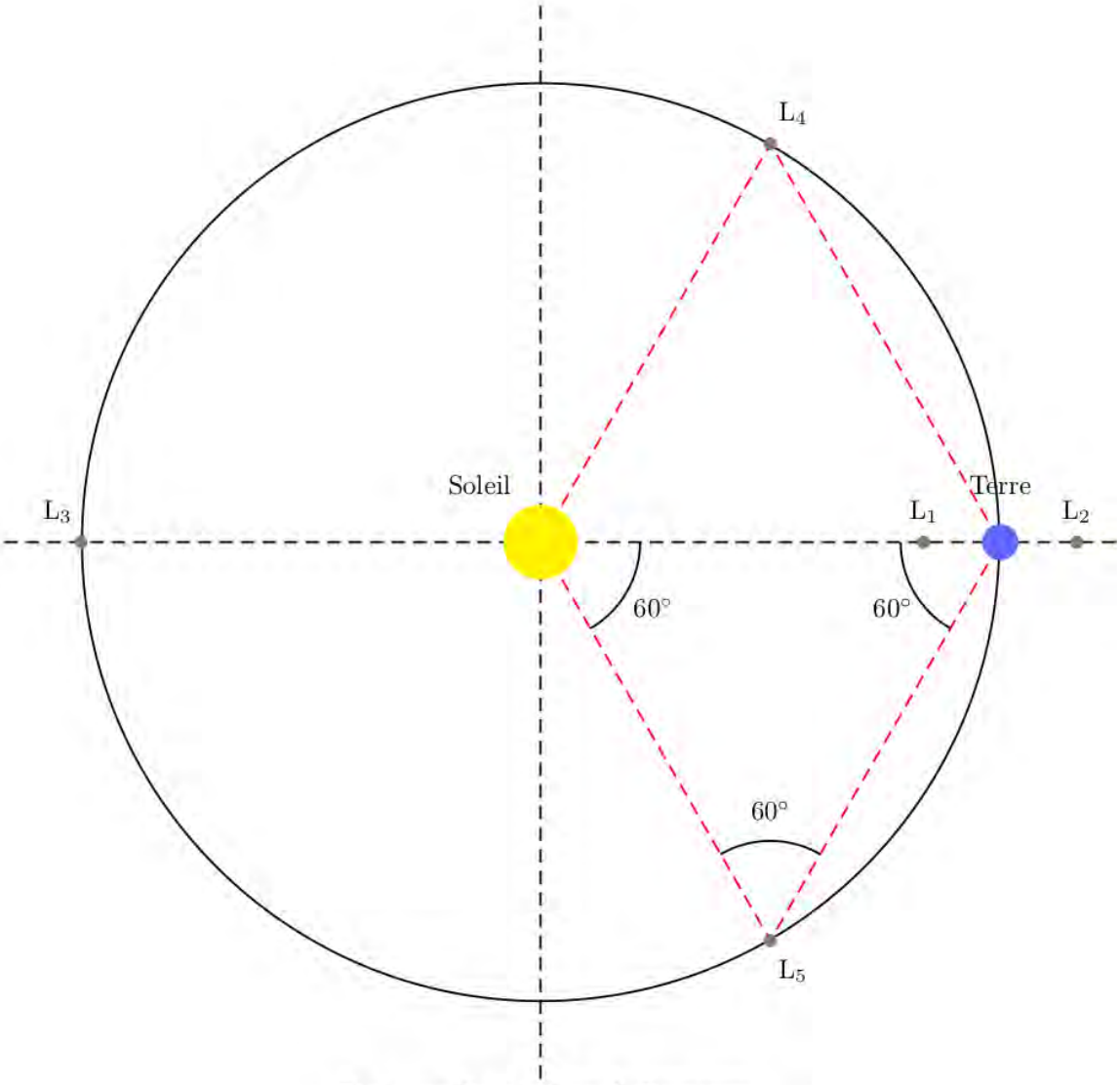
En mécanique céleste, il est un sujet qui a passionné de nombreux mathématiciens : c'est le problème dit des *trois corps*. Newton, après avoir énoncé sa loi qui exprime que « les corps s'attirent avec une force proportionnelle au produit de leur masse et inversement proportionnelle au carré de la distance de leurs centres », a cherché à décrire le comportement de trois corps sans y parvenir. Il faut attendre le mathématicien Joseph-Louis Lagrange qui, en 1772, étudia le cas d'un petit corps, de masse négligeable (ce qu'on appelle aujourd'hui *corps d'épreuve* ou particule-test), soumis à l'attraction de deux plus gros : le Soleil et, par exemple, une planète. Il découvrit qu'il existait des positions d'équilibre pour le petit corps, des endroits où toutes les forces se compensent. Un objet de faible masse situé en ces points n'en bouge plus relativement aux deux autres corps, et tourne de concert avec eux (par exemple une planète et le Soleil).



Trois des points de Lagrange sont situés sur l'axe reliant les deux corps. Dans le cas d'une grande dissymétrie de masse entre ceux-ci, deux points sont situés proches et de part et d'autre du corps peu massif, alors que le troisième est quasiment situé à l'opposé du corps peu massif par rapport au corps massif.

Si on donne en exemple les points de Lagrange du système Soleil-Terre, ces cinq points sont notés et définis comme suit (échelle non respectée) :

- **L_1** : sur la ligne définie par les deux masses, entre celles-ci, la position exacte dépendant du rapport de masse entre les deux corps; dans le cas où l'un des deux corps a une masse beaucoup plus faible que l'autre, le point L_1 est situé nettement plus près du corps peu massif que du corps massif.
- **L_2** : sur la ligne définie par les deux masses, au-delà de la plus petite. Dans le cas où l'un des deux corps a une masse beaucoup plus faible, la distance de L_2 à ce corps est comparable à celle entre L_1 et ce corps.
- **L_3** : sur la ligne définie par les deux masses, au-delà de la plus grande. Dans le cas où l'un des deux corps est notablement moins massif que l'autre, la distance entre L_3 et le corps massif est comparable avec celle entre les deux corps.



Positions des 5 points de Lagrange

Les deux derniers points de Lagrange (L4 et L5) forment avec les deux corps des triangles équilatéraux

- **L_4** et **L_5** : sur les sommets des deux triangles équilatéraux dont la base est formée par les deux masses. Sans qu'il y ait de consensus précis, L_4 est celui des deux points en avance sur l'orbite de la plus petite des masses, dans son orbite autour de la grande, et L_5 est en retard. Ces points sont parfois appelés *points de Lagrange triangulaires* ou *points Troyens*, du fait que c'est le lieu où se trouvent les astéroïdes troyens du système Soleil-Jupiter. Contrairement aux trois premiers points, ces deux derniers ne dépendent pas des masses relatives des deux autres corps.

Les points L_1 et L_2 sont des équilibres instables, ce qui les rend utilisables dans le cadre de missions spatiales : on n'y trouve pas de corps naturels, et un équilibre dynamique peut y être maintenu pour une consommation de carburant raisonnable (le champ gravitationnel étant faible dans leur voisinage). Pour de tels satellites, des corrections de trajectoires régulières doivent être appliquées afin de conserver le satellite au voisinage du point. Ce temps caractéristique peut être évalué dans le cas où le rapport de masse des deux corps du système est élevé.

Les principaux avantages de ces positions, en comparaison des orbites terrestres, sont leur éloignement de la Terre et leur exposition au Soleil constante dans le temps. Le point L_1 se prête particulièrement à l'observation du Soleil et du vent solaire. Ce point a été occupé pour la première fois en 1978 par le satellite ISEE-3, et est actuellement occupé par les satellites SoHO et Advanced Composition Explorer. Le point L_2 est à l'inverse particulièrement intéressant pour les missions d'observation du cosmos, qui embarquent des instruments de grande sensibilité devant être détournés de la Terre et de la Lune, et fonctionnant à très basse température. Il est actuellement occupé par les satellites Herschel, Planck, WMAP et Gaia.

Il a été un temps envisagé de placer un télescope spatial au point L_4 ou L_5 du système Terre-Lune, mais cette option a été abandonnée après que des nuages de poussière y ont été observés.
Les points L_4 et L_5 sont généralement stables, aussi on y trouve de nombreux corps naturels, dits troyens (satellites ou astéroïdes) :

Il y a plus de 6.300 astéroïdes troyens recensés actuellement dans le système solaire, dont plus de 99% sont situés sur l'orbite de Jupiter autour du Soleil.

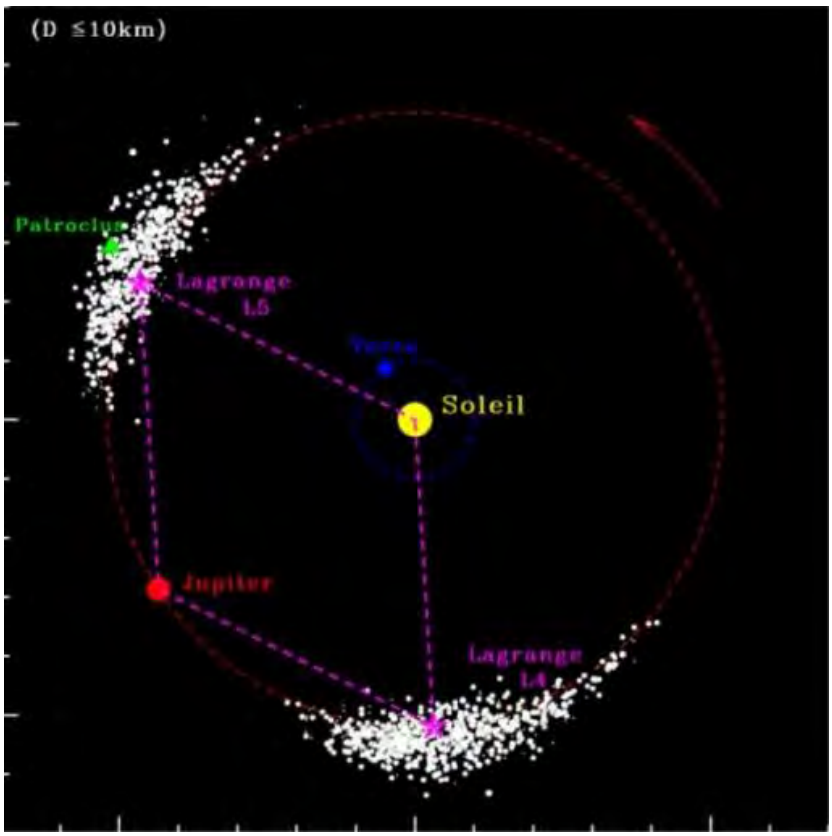
- dans le système Soleil-Jupiter, on recense (en 2011) environ 6.300 astéroïdes aux points L_4 et L_5
- dans le système Soleil-Neptune, huit
- dans le système Soleil-Mars, quatre
- dans le système Saturne-Téthys, les points L_4 et L_5 sont occupés par Télesto et Calypso.
- dans le système Saturne-Dioné, Hélène et Pollux occupent ces points

Curieusement, il semblerait que le système Soleil-Saturne ne soit pas en mesure d'accumuler des troyens du fait des perturbations joviennes

Dans le système Soleil-Terre, on connait (depuis peu) un troyen au point L_4, l'astéroïde 2010 TK7, qui mesure 300 mètres de diamètre. Certains astronomes soulignent que cet objet pourrait représenter un risque comparable aux géocroiseurs. Ces auteurs proposent également que l'impacteur supposément à l'origine de la Lune (Théia) aurait stationné un temps sur le point L_4 ou L_5 et accumulé de la masse avant d'en être éjecté sous l'action des autres planètes.

Patroclus et Ménœtius, un couple d'astéroïdes troyens fait de glace d'eau

Une équipe franco-américaine avec des chercheurs de l'Institut de Mécanique Céleste et de Calculs des Ephémérides (CNRS, Observatoire de Paris, Université de Paris VI) a déterminé en 2006 la densité d'un couple d'astéroïdes. Ce système binaire, les astéroïdes 617 Patroclus-Ménœtius qui sont en interaction gravitationnelle, a une densité très faible d'environ 0,8 g/cm^3. Cette mesure permet pour la première fois de déterminer avec précision la masse et la densité d'un astéroïde troyen de Jupiter. Cette faible densité n'a que très rarement été mesurée pour des objets situés à cette distance du Soleil (environ 780 millions de kilomètres). Cela tend à montrer que ces deux compagnons ont une composition proche de celle des comètes, et qu'ils proviennent de régions plus lointaines dans le système solaire. Ces résultats sont publiés dans la revue Nature du 02/02/06.



***Page précédente** : Vue du système des troyens de Jupiter dans le plan de l'écliptique. Patroclus fait partie du groupe des "grecs" associé au point d'équilibre de Lagrange L5. © IMCCE. OP. CNRS. L'astéroïde 617 Patroclus et son compagnon Ménœtius appartiennent au groupe des astéroïdes troyens de Jupiter, plus exactement ceux capturés dans la zone du point de Lagrange stable L5. Ces deux corps célestes forment un véritable couple orbitant l'un autour de l'autre en 4,28 jours ce qui permet de déterminer leur masse. Ces objets situés à quelque 630 millions de kilomètres de la Terre sont peu brillants et leur observation nécessite l'utilisation de système d'optique adaptative. Pour les observer, les astronomes ont utilisé le télescope Keck II installé à Mauna Kea qui est équipé d'un système d'optique adaptative et d'un système d'asservissement Laser Guide Star. L'observation répétée sur plusieurs mois leur a permis d'en déterminer l'orbite et par conséquent la masse et la densité. La densité du couple ainsi révélée, d'une valeur d'environ 0,8 g/cm^3 donc plus léger que l'eau, tend à confirmer qu'ils seraient issus de la région froide du système solaire au-delà de Saturne.*

Cette présence dans la zone des troyens de Jupiter serait le fruit d'un jeu dynamique très complexe provoqué par la migration des planètes Jupiter et Saturne qui les aurait d'abord décrochés de leur disque lointain, il y a de cela environ quatre milliards d'années, pour les injecter dans les régions internes du système solaire. Ils auraient ensuite été capturés par Jupiter dans les zones dynamiquement stables des troyens.

Images du couple Patroclus et Ménœtius prise au télescope de l'Observatoire du Keck à Hawaï équipé du système LGS. Le plus gros des deux corps Patroclus (et le plus brillant des deux) se trouve en haut à droite sur les images. © UC-Berkeley, W.M. Keck Observatory. Un système binaire n'aurait certes pas survécu à ce long périple et à ces perturbations. Il s'en suit que ce système binaire a très vraisemblablement été formé dans la phase finale de son voyage par effet de marée ou bien encore in situ par collision.

Si cette découverte apporte des avancées sur l'origine de ces corps, elle permet aussi de soulever de nombreuses questions. Quel est le scénario de formation de ce couple ? Est-il un cas particulier ou bien existe-t-il d'autres binaires parmi les troyens ? Tous les astéroïdes troyens observés actuellement sont-ils originaires de ce disque primordial qui a, par la suite, donné naissance à la ceinture de Kuiper et partageraient ainsi les mêmes caractéristiques que leurs cousins éloignés ?

II - Les « centaures »

Dans la mythologie grecque, un **centaure** (en grec ancien Κένταυροι / *Kéntauroi*) est une créature mi-homme, mi-cheval, que l'on disait issue soit d'Ixion et de Néphélé, soit de Centauros et des juments de Magnésie.

Une étymologie ancienne fait dériver leur nom de deux mots grecs : κεντειν / *kentein*, « piquer », et ταυρος / *tauros*, « taureau ». Dans l'*Iliade* cependant, Homère utilise le mot φηρ / *phêr*, « bête » (I, 268 et II, 743) pour désigner les adversaires de Pirithoos, décrits comme de sauvages habitants des montagnes de la Thessalie. Le terme de « centaure » est réservé à Chiron, « le plus juste des centaures » et aussi le plus connu (XI, 832). Les centaures sont décrits comme ayant la partie inférieure équine. Ils vivaient à l'origine sur le mont Pélion, en Thessalie. Parmi les plus connus : Chiron (centaure connu pour sa sagesse, qui sert de précepteur à de nombreux héros grecs dont Achille et Jason), Pholos (un centaure calme, ami d'Héraclès) et Nessos, un centaure sauvage qui tente d'enlever Déjanire épouse d'Héraclès, avant d'être tué par lui. La mythologie grecque compte plusieurs autres centaures : Eurytion, Homade, Hyléos et Rhoécos, Crotos, Thérée. Si l'on excepte Pholos et Chiron, tous deux « avisés » (leur parenté est d'ailleurs différente des autres), les centaures symbolisaient pour les Grecs les appétits animaux (concupiscence et ivresse en sont les traits caractéristiques). Ainsi le combat contre les Lapithes peut se lire comme une parabole de l'affrontement des états civilisé et sauvage.
L'origine de leur représentation est généralement expliquée ainsi : le cheval a été introduit en Grèce dès le XVIe siècle av. J.-C., mais n'était alors utilisé que comme bête d'attelage ; les centaures représenteraient, dans les légendes de l'Âge héroïque, les premiers cavaliers.

En astronomie, les **centaures** sont des petits corps glacés qui gravitent autour du Soleil entre Jupiter et Neptune. Ils ont été nommés d'après la race mythique des centaures. En référence à la créature mythologique mi-homme mi-cheval, les centaures sont des objets que les scientifiques classent entre les astéroïdes et les comètes, faute de données suffisantes pour déterminer leur véritable nature. Mais des astronomes de la NASA viennent de donner un début de réponse en affirmant que ces centaures seraient en fait des comètes avec une orbite chaotique.

"Tout comme les créatures mythologiques, les centaures semblent avoir une double vie", déclare l'un des auteurs de l'étude, James Bauer, du Jet Propulsion Laboratory. Leur orbite est en effet chaotique, ils peuvent se faire happer par l'attraction des planètes ou du Soleil, ou au contraire se faire éjecter du système solaire. Mais aucun centaure n'a pu être photographié de près, ce qui rend difficile la distinction entre comète et astéroïde pour les astronomes. Les données proviennent du satellite WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer), un engin lancé en 2009 qui observe l'espace à la lumière infrarouge. Il a permis de découvrir des milliers d'astéroïdes, ainsi qu'une nouvelle classe d'étoile, les étoiles brunes (ou de type Y). L'étude porte sur 52 centaures, dont 15 ont été nouvellement découverts. La couleur de leur surface permet de les analyser Concrètement, le satellite a permis de calculer l'albédo des centaures, c'est-à-dire leur réflectivité à la lumière. Une information qui permet de différencier comètes et astéroïdes : les premières ont une surface très noire (rien à voir avec leur queue très lumineuse, qui se "déclenche" quand celles-ci passent près du soleil), alors que les astéroïdes sont plus brillants, à l'instar de la Lune. Observés à la lumière visible, les centaures ont des couleurs qui varient du bleu au rouge. Or, les données de WISE ont indiqué que les centaures bleus avaient une surface bien plus sombre, caractéristique des comètes. Près de 2/3 des centaures étudiés ont ainsi été associés à des comètes, dont l'origine serait l'extrême limite de notre système solaire. Mais il n'est pas certain que les autres soient tout à fait des astéroïdes, appelant ainsi à poursuivre les recherches. D'après les auteurs, de nouvelles études des données de WISE pourraient apporter d'autres réponses. Il semblerait donc bien que les centaures n'aient pas fini de révéler tous leurs secrets.

Les centaures sont généralement de petite taille, et le membre le plus grand, (10199) Chariclo, a un diamètre maximal de seulement 300 km. **Les centaures**, du fait de leurs orbites très instables (car influencées par les planètes géantes gazeuses) et du fait de la taille de certains d'entre-eux, **peuvent présenter de réels dangers pour la Terre en cas de collision avec notre planète.** Certains centaures ont une nature incertaine

et/ou double. On a en effet constaté qu'il y en avait qui se comportaient parfois comme des comètes en présentant une queue à l'approche du Soleil. En conséquence, il y a des centaures qui sont catalogués comme étant de nature double astéroïde/comète.

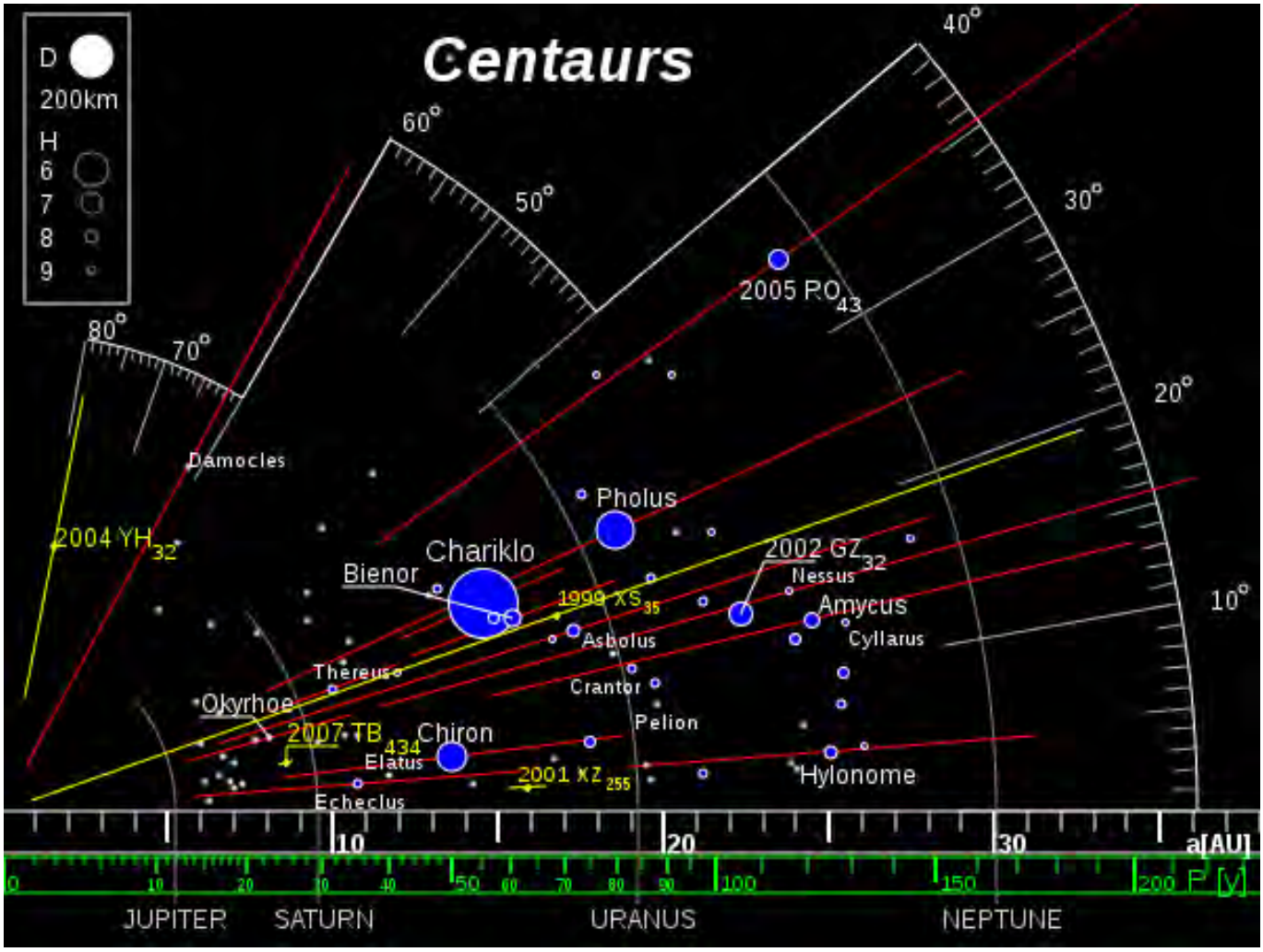
Définition
Un centaure peut être défini, en première approximation, comme un astéroïde qui orbite entre Jupiter et Neptune et croise l'orbite d'une ou plusieurs planètes géantes gazeuses. Plus précisément :
• pour le Centre des planètes mineures, un centaure est un objet dont le périhélie est au-delà de l'orbite de Jupiter et dont le demi-grand axe est à l'intérieur de l'orbite de Neptune;
• pour le Committee for Small-Body Nomenclature, un centaure est un planétoïde transjovien qui croise ou s'approche d'une planète géante gazeuse mais dont l'orbite est instable, n'étant en résonance de moyen mouvement 1:1 avec aucune planète majeure;
• pour la JPL Small-Body Database, de façon similaire, un centaure est un objet dont le demi-grand axe est supérieur à 5,5 ua et inférieur à 30,1 ua;
• pour le Deep Ecliptic Survey, un centaure est un objet non résonant dont le périhélie de son orbite osculatrice reste inférieur au demi-grand axe de l'orbite osculatrice de Neptune.

Histoire
Le premier centaure fut découvert en 1920, il s'agissait de **Hidalgo** mais on ne connaissait pas encore l'origine de ce corps. Le premier centaure identifié fut Chiron en 1977, que l'on crut d'abord être un satellite de Saturne. En approchant de son périhélie, il développa une queue cométaire et fut reclassé comme comète (sous le nom de 95P/Chiron). Il est désormais considéré à la fois comme un astéroïde et une comète, quoique d'une taille nettement plus grande que les comètes classiques. On pense généralement que la plupart des centaures sont des astéroïdes qui ont été éjectés de la ceinture de Kuiper pour venir s'installer dans le système solaire interne.

Exploration
Aucun centaure n'a, à l'heure actuelle, été photographié de près par une sonde spatiale, bien qu'il semble que Phœbé, l'un des satellites de Saturne, photographié par la sonde Cassini en 2004, soit un centaure capturé. Le télescope Hubble a également glané quelques informations sur la surface de (8405) Asbolos. En 2010, la sonde *New Horizons* devait survoler de loin un autre centaure, (83982) Crantor, mais les images furent décevantes.

Orbites
Les centaures ne sont pas situés sur des orbites stables à l'échelle de la centaine de milliers d'années. Des études de leurs orbites semblent indiquer qu'il s'agit d'un état orbital de transition entre la ceinture de Kuiper et les comètes à courte période. Il est possible qu'il s'agisse d'objets de la ceinture de Kuiper perturbés gravitationnellement et dont l'orbite a croisé celle de Neptune. L'orbite des centaures est chaotique et évolue rapidement lorsque l'objet s'approche de l'une des planètes géantes du Système solaire. Certains centaures finissent par croiser l'orbite de Jupiter. S'ils démontrent une activité cométaire, ils sont re-classifiés comme comètes. À terme, il semble que leur destin doive se conclure par une collision avec le Soleil (ou une planète) ou bien par une éjection du Système solaire.

Pour illustrer la fourchette des paramètres des orbites, quatre objets avec les orbites extrêmes ont été montrés en (jaune) :
• 2005 VB_{123}, sur l'orbite la plus inclinée (~39°) mais aussi presque circulaire (la plus petite excentricité : < 0.01);
• (8405) Asbolos, sur l'orbite la plus excentrique (excentricité = 0,69);
• 2001 XZ_{255}, sur une orbite presque coplanaire avec l'écliptique (inclinaison < 3°).
Les histogrammes présentent la distribution de l'inclinaison *i* (intervalle 5°) et de l'excentricité *e* (intervalle 0,05) des orbites.

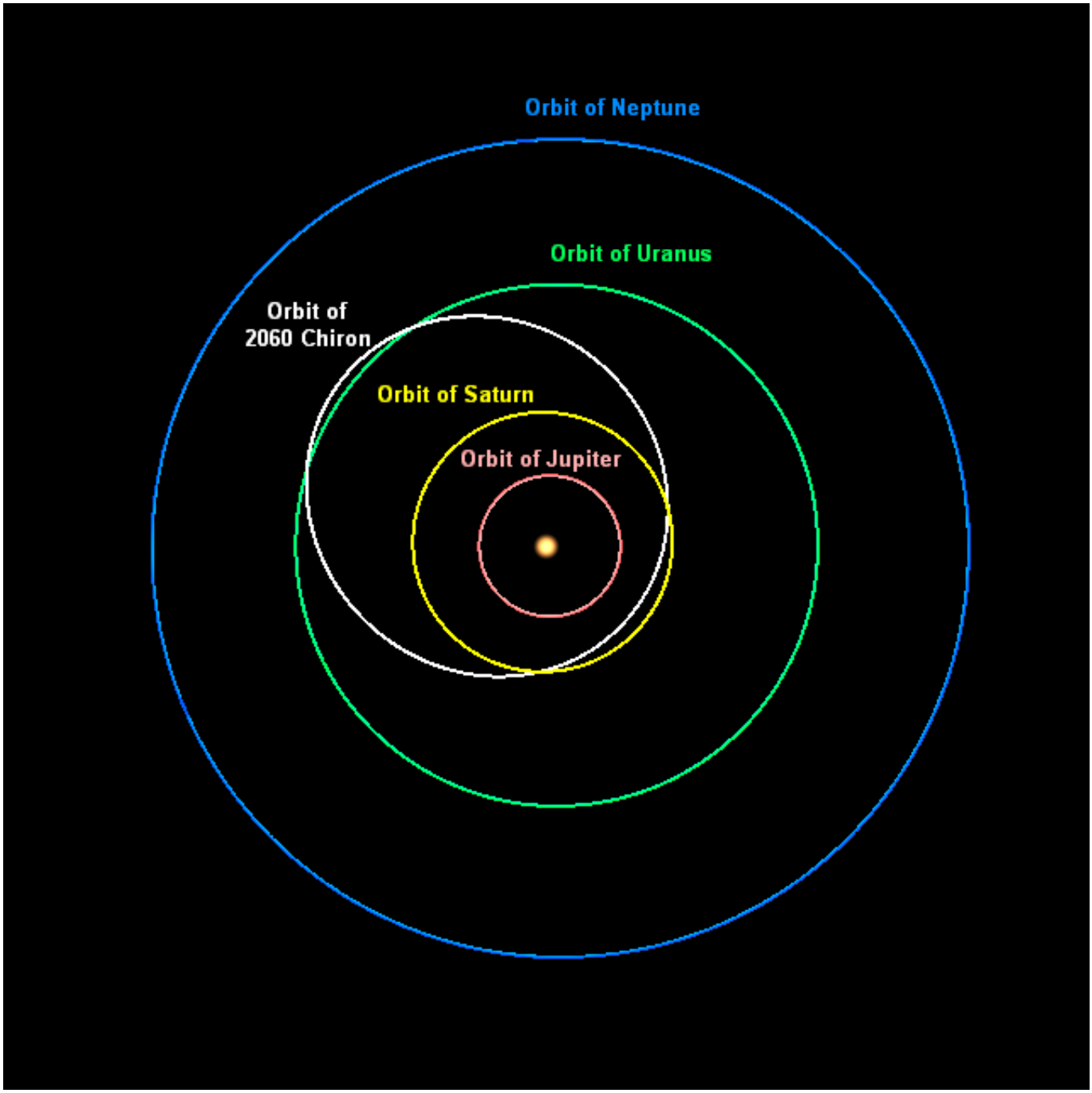


Le diagramme ci-dessus illustre les orbites des centaures connus par rapport aux orbites des planètes. Pour quelques objets, l'excentricité des orbites est représentée par les segments rouges (du périhélie à l'aphélie) avec l'inclinaison représentée sur l'axe vertical.

Chiron et Chariclo

a) Découvert en 1997, **Chariclo est un centaure**, c'est à dire un astéroïde dont l'orbite se promène dans la zone des 4 grandes planètes gazeuses, surtout entre Saturne et Uranus. Ce centaure fait environ 250 à 300 km dans sa plus grande dimension et se promène entre 13 et 18,6 UA du Soleil avec une excentricité de 0,175 et une période de révolution de 63,2 années. On lui a découvert (en mars 2014) 2 anneaux de 7 et 3 kilomètres de largeur, situés respectivement à 396 et 405 km de son centre. Ces anneaux sont probablement composés de glace d'eau, du moins en partie. Leur origine viendrait probablement d'une collision et, à l'instar de ce qui se passe sur Saturne, ils pourraient être gravitationnellement stabilisés par de très petits satellites dans et/ou autour des anneaux. Dans la mythologie grecque, Chariclo est une nymphe.

b) Découvert en 1977, **Chiron est aussi un centaure** dont on pense qu'il est peut-être une peu « comète » en même temps !! Il se déplace dans la même zone que Chariclo, entre 8,4 et 18,8 UA du Soleil. Il a une taille estimée à 166 km de Ø, a une excentricité forte de 0,38 et une période de révolution de 50,3 ans et de rotation de 6 heures. Il vient probablement de la ceinture de Kuiper, mais il a eu une activité de type cométaire en 1989 où on a constaté une coma et une queue. Mais, si c'est une comète, c'est la plus grande que nous connaissions !! Les centaures n'ont pas d'orbites très stables et il est possible que Chiron voie la sienne modifiée pour entrer en résonance 2:1 avec Saturne ou Uranus dans un temps inférieur à 10.000 ans et/ou qu'il devienne une comète à période courte. Il est possible (mais pas certain) que Chiron soit également entouré d'un double anneau. Ces anneaux n'ont pu être décelés que grâce à l'occultation d'une étoile par ces anneaux. Notons (et c'est certainement délibéré) que, dans la mythologie grecque, Chiron est un centaure qui est le compagnon de la nymphe Chariclo.



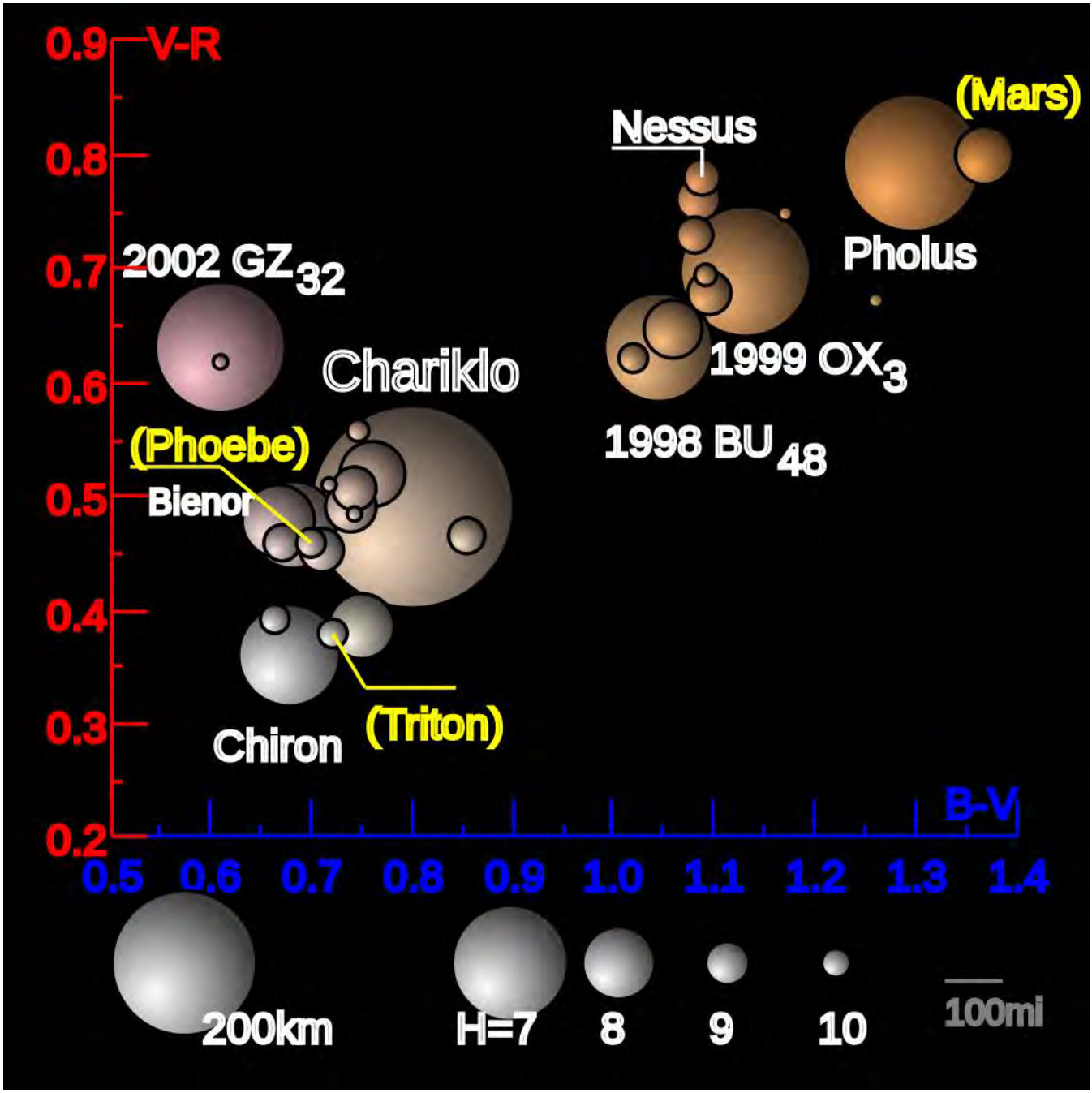
Orbite de Chiron (en blanc)

Couleur des centaures

Les centaures présentent une extraordinaire diversité de couleurs défiant toute tentative de modéliser de façon simple leur composition.

L'indice de couleur est la mesure des différences de magnitude apparente de l'objet vu à travers des filtres bleu (B), neutre (V) vert-jaune et (R) rouge.

Les centaures peuvent être regroupés en deux classes :
• Très rouges, comme Pholos
• Bleu (bleu-gris ou neutre selon les auteurs) comme Chiron



La distribution des couleurs des centaures.

Les nombreuses théories qui tentent d'expliquer ces différences de couleur peuvent à leur tour être classifiées en deux catégories :

• celles qui expliquent la différence de couleur comme une conséquence de la « vraie » différence de composition et d'origine,

• celles qui traitent la différence de couleurs juste comme un simple résultat de modifications par la radiation et l'activité typique aux comètes.

Comme exemple de la deuxième catégorie, la couleur rougeâtre de Pholos serait due à une croûte de matière organique irradiée alors que Chiron aurait eu sa couche de glace exposée comme résultat de ses épisodes de comète. Selon une autre explication, Pholos aurait été expulsé très récemment de la ceinture de Kuiper et la modification de la surface n'a pas encore eu lieu. Une autre théorie suggère plusieurs processus en compétition, la radiation rendant l'objet plus rouge et les collisions avec l'activité de comète le rendant plus bleu. A ce jour (début 2018) on a répertorié plus d'une cinquantaine de centaures, dont 15 assez récemment. Ce nombre aura tendance à croître avec les progrès technologiques de l'astronomie, mais aussi grâce à une surveillance particulière apportée désormais à ces objets.

Liste de centaures

Parmi les objets considérés actuellement comme centaures, on peut citer ceux qui sont nommés :

Quelques centaures

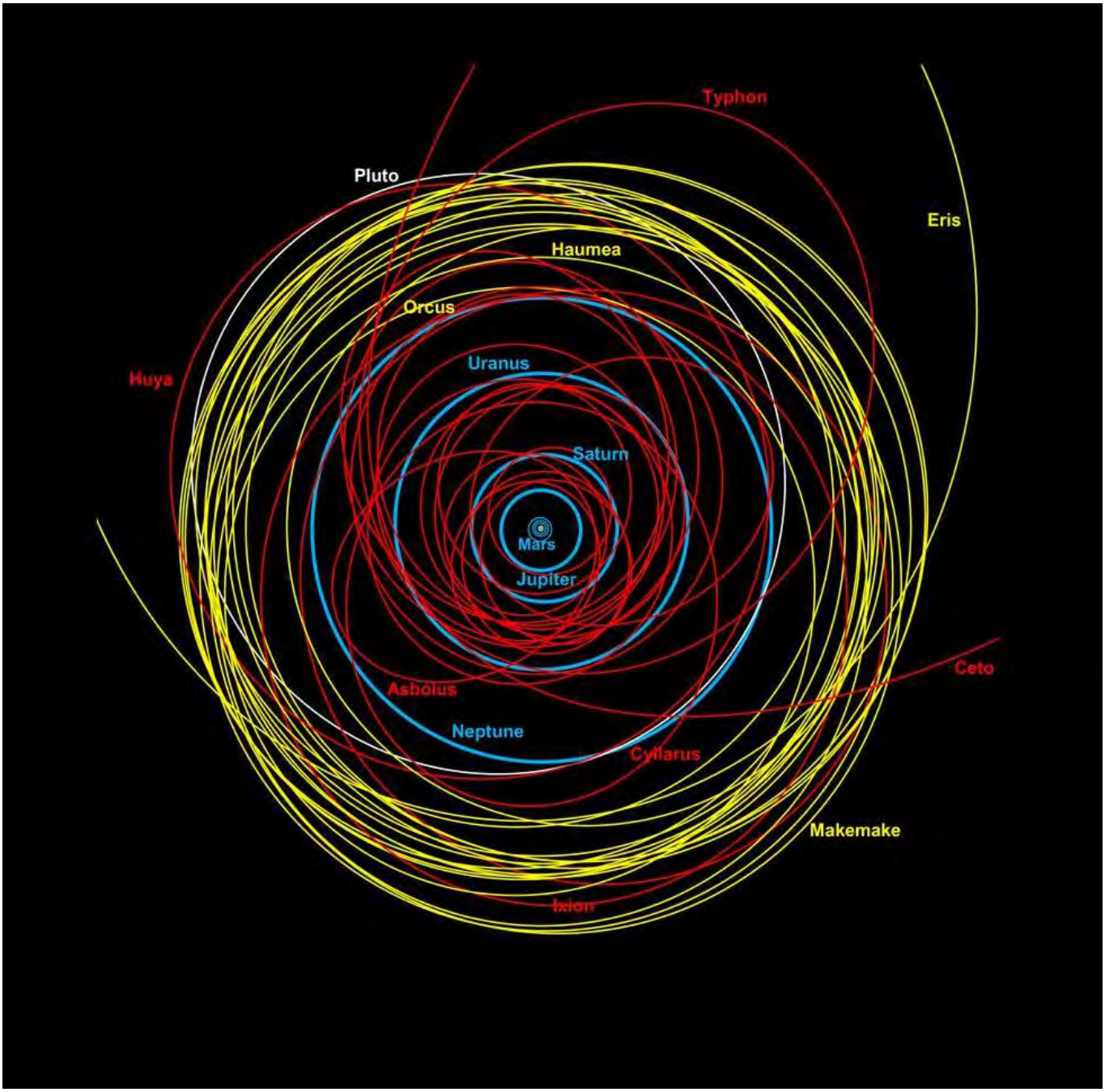
Numéro	Nom	Désignation provisoire	Périhélie (en UA)	Aphélie (en UA)	Magnitude absolue	Date découverte
44594		1999 OX3	17.421	28.605	7.5	21/07/1999
52975	Cyllarus	1998 TF35	17.878	37.300	9.5	12/10/1998
52872	Okyrhoe	1998 SG35	5.840	10.998	11.2	19/09/1998
49036	Pelion	1998 QM107	17.323	22.877	10.3	21/08/1998
33128		1998 BU48	18.466	32.426	7.4	22/01/1998
69371		1994 TA	11.770	21.949	11.5	02/10/1994
10370	Hylonome	1995 DW2	18.854	30.908	8.0	27/02/1995
10199	Chariklo	1997 CU26	13.072	18.408	6.4	15/02/1997
8405	Asbolus	1995 GO	6.834	29.135	9.0	05/04/1995
7066	Nessus	1993 HA2	11.809	37.104	9.6	26/04/1993
5145	Pholus	1992 AD	8.654	31.797	7.0	09/01/1992
2060	Chiron	1977 UB	8.447	18.774	6.5	18/10/1977

Des comètes géantes, les centaures, menacent-elles la Terre ?

Dans la mythologie grecque, les centaures sont des créatures grossières, cruelles, lubriques et ivrognes qui ont une très mauvaise réputation... Dans le Système solaire, ce sont des corps de 50 à 100 km pour la plupart, à la fois astéroïdes et comètes, et attroupés entre les planètes géantes. Selon de récentes recherches, cette situation instable peut provoquer de redoutables chevauchées de quelques-uns d'entre eux parmi les petites planètes rocheuses. Aussi, il ne serait pas rare que de gros et petits fragments de ces comètes géantes croisent l'orbite de la Terre, voire plongent dans notre atmosphère, ce qui peut avoir des conséquences dévastatrices.

Hormis le sage Pholos et le célèbre Chiron (souvent associé à la constellation du Sagittaire), les centaures, descendants d'Ilion, ont une mauvaise réputation dans la mythologie grecque. On disait de ces créatures mi-Homme et mi-cheval que leurs mœurs étaient brutales, qu'ils se nourrissaient de chair crue, étaient enclins à la lubricité et vivaient comme des bêtes dans les forêts de Thessalie...
Dans notre Système solaire, on nomme Centaures, la famille de corps célestes à l'identité incertaine, entre astéroïdes et comètes. Ils sont plutôt gros et se regroupent essentiellement entre les orbites de Jupiter et de Neptune, plus exactement entre 5,5 et 30 unités astronomiques selon la définition du JPL *Small-Body* Database. Le premier d'entre eux, identifié en 1977, fut naturellement baptisé Chiron par son découvreur qui supposait sa double nature. Et, en effet, une dizaine d'années plus tard, en 1988, quand ce corps de 166 km atteignit le point de son orbite le plus proche du Soleil (périhélie), les astronomes observèrent un accroissement significatif de sa luminosité et la formation d'une chevelure, trahissant une activité cométaire provisoire.

Parmi les quelque 400 Centaures débusqués à ce jour dans les « forêts » du Système solaire externe, Chariklo est à ce jour le plus gros connu. Pourvu de deux fins anneaux et de petits satellites découverts il y a bientôt deux ans, l'astre affiche environ 250 à 300 km dans sa plus grande longueur, alors que la plupart de ses congénères ont une taille comprise entre 50 et 100 km. Cela en fait donc des comètes géantes et, comme le soutient une étude récemment publiée dans Astronomy & Geophysics, le journal de la *Royal Astronomical Society*, leur réputation ne fait qu'empirer, à l'instar de leurs homonymes.



Le Système solaire externe vu de dessus. L'orbite des planètes est en bleu. Pluton, planète naine dans la ceinture de Kuiper, a son orbite marquée en blanc. 17 objets transneptuniens (transneptunian objects, ou TNO) sur les 1.500 découverts, sont en jaune. Les orbites de 22 Centaures sont tracées en rouge. Comme on peut le voir, leurs trajectoires croisent souvent celles des planètes géantes, ce qui peut provoquer leur injection dans le Système solaire interne. © Duncan Steel

III- Les comètes

La comète Hale-Bopp en 1997.

Que sont les comètes ?

Une **comète** (stylisé en symbole astronomique ☄) est, en astronomie, un petit corps céleste constitué d'un noyau de glace et de poussière en orbite (sauf perturbation) autour d'une étoile. Lorsque son orbite, qui a généralement la forme d'une ellipse très allongée, l'amène près de cette étoile (par exemple le Soleil dans le système solaire), la comète est exposée à diverses forces émanant de cette dernière : vent stellaire, pression de radiation et gravitation. Le noyau s'entoure alors d'une sorte de fine atmosphère brillante constituée de gaz et de poussières, appelée chevelure ou *coma*, souvent prolongée de deux traînées lumineuses composées également de gaz et de poussières, les queues (une de gaz ionisé et une de poussières), qui peuvent s'étendre sur plusieurs dizaines de millions de kilomètres. Le Centre des planètes mineures répertorie au 14 janvier 2020 4.352 comètes. Mais on pense néanmoins qu'avec le très grand nombre de comètes que l'on pense pouvoir trouver dans le nuage de Oort, ce chiffre pourrai se monter à environ 1.000.000.000.000 de comètes…

Dans le système solaire, quand elles s'approchent suffisamment de la Terre ou que leur magnitude est importante, les comètes deviennent visibles à l'œil nu (parfois même de jour) et peuvent être spectaculaires ; elles sont alors classées comme « grandes comètes ».
Les comètes se distinguent des astéroïdes, autres petits corps, par l'activité de leur noyau. Cependant, les observations récentes de plusieurs astéroïdes présentant une activité cométaire, notamment dans la ceinture principale, tendent à rendre de plus en plus floue la distinction entre comète et astéroïdes. Elles proviendraient de deux réservoirs principaux du système solaire : ceinture de Kuiper et nuage d'Oort, tandis que les comètes interstellaires ont une origine extérieure au système solaire.

Étymologie
Le mot « comète » vient du grec ancien κομήτης ἀστήρ, *komêtês astêr*, qui signifie « astre chevelu ». Il est employé en ce sens chez Aristote et chez Aratos de Soles dans son poème sur l'astronomie, *Les Phénomènes*.

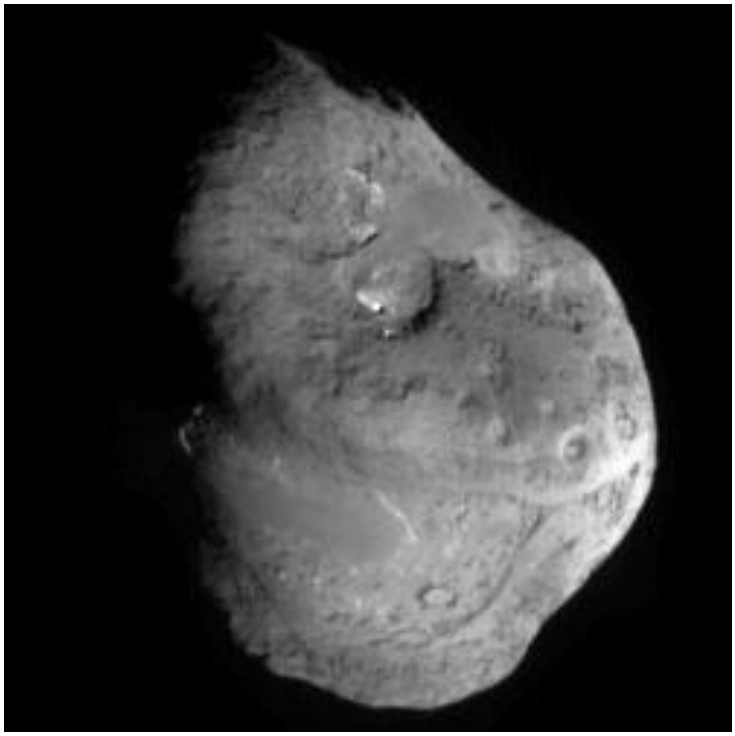
Description
Une comète se compose essentiellement de trois parties : le noyau, la chevelure et les queues. Le noyau et la chevelure constituent la tête de la comète. Lors du dernier passage de la comète de Halley en 1986, six sondes spatiales (ICE, Vega-1, Vega-2, Sakigake, Suisei et Giotto) ont frôlé la comète et enregistré des données et des images précieuses pour notre connaissance des comètes.

Le noyau

L'hypothèse de constitution du noyau la plus communément admise et confirmée par les récentes expériences spatiales de spectroscopie, est qu'il serait un corps solide constitué pour environ moitié de glaces (essentiellement d'eau, puis de monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, méthane, éthane, acétylène) et environ moitié de matières météoritiques agglomérées (modèle dit de la « boule de neige sale » proposé par Fred Whipple en 1950, « modèle en couche » proposé par Michael J. Belton à la suite de la mission *Deep Impact*). Ces glaces se subliment (lorsque la comète est à une distance de 1 à 3 unités astronomiques du Soleil) sous l'action du rayonnement solaire et donnent naissance à la chevelure, puis aux queues.

Le diamètre du noyau (non sphérique, certaines parties étant lisses, d'autres rugueuses) est estimé entre quelques centaines de mètres et quelques dizaines de kilomètres. La période de rotation va de 5 à 70 heures. Le noyau de la comète de Halley est de forme oblongue, sa plus grande dimension mesure environ 15 kilomètres, pour un volume estimé à 500 kilomètres cubes et une masse de 10^{14} kilogrammes, ce qui correspond à une masse volumique moyenne de 200 kilogrammes par mètre cube (un cinquième de celle de l'eau dans les conditions standards à la surface de la Terre). La présence de molécules organiques dans les comètes est un élément en faveur de la théorie de la panspermie. Un scientifique de la NASA, Richard B. Hoover (en), prétend ainsi en 2011 avoir trouvé des bactéries fossiles extraterrestres dans des comètes, mais la NASA a pris ses distances avec ces travaux, leur reprochant un manque d'évaluation par les pairs. Les noyaux cométaires sont parmi les objets les plus sombres du Système solaire avec un albedo compris entre 2 et 7 %.

Noyau cométaire



Le noyau de la comète Tempel 1.

Le **noyau** d'une comète est la partie solide et centrale de cette dernière, populairement appelée « boule de neige sale ». Le noyau d'une comète est composé de roche, de poussière et de gaz gelés. Lorsqu'elles sont réchauffées par le Soleil, les glaces se subliment et les gaz issus de la sublimation produisent une atmosphère (appelée chevelure) entourant le noyau. La force exercée sur la chevelure par la pression de radiation du Soleil et les vents solaires provoque la formation d'une énorme queue, qui pointe à l'opposé du Soleil. Un noyau classique de comète présente un albédo de 0,04.

Désintégration

Le noyau de certaines comètes peut être fragile, une conclusion déduite de l'observation de comètes s'étant désintégrées en morceaux. 3D/Biela en 1846, Shoemaker-Levy 9 en 1992 et 73P/Schwassmann-Wachmann de 1995 à 2006 sont des exemples de comètes s'étant désintégrées. L'historien grec Éphore de Cumes reportait déjà lors de l'hiver entre 373 et 372 av. J.-C. la désintégration d'une comète. Les contraintes thermiques, la pression des gaz internes, ou des impacts seraient les responsables de la désintégration des comètes.

Les comètes 42P/Neujmin et 53P/Van Biesbroeck semblent être des fragments d'une comète mère. Des intégrales numériques ont montré que ces deux comètes étaient très proches l'une de l'autre lors de leurs passages près de Jupiter en janvier 1850, et qu'avant cette date, leurs deux orbites étaient presque identiques.

Taille

La plupart des noyaux ne mesurent pas plus de 16 km. Les plus grandes comètes qui ont déjà franchi l'orbite de Saturne sont les comètes Hale–Bopp (environ 60 km), 29P/Schwassmann-Wachmann (environ 30,8 km), 109P/Swift-Tuttle (environ 26 km) et 28P/Neujmin (environ 21,4 km).

Le noyau en forme de pomme de terre de la comète de Halley (15 × 8 × 8 km) contient de la glace et de la poussière en quantités égales. Environ 80 % de la glace est de l'eau glacée, et le monoxyde de carbone gelé constitue 15 %. Une grande partie du reste est formée de dioxyde de carbone, de méthane et d'ammoniac gelés. Les scientifiques pensent que les autres comètes sont chimiquement similaires à la comète de Halley. Le noyau de la comète de Halley est aussi extrêmement noir. Les scientifiques pensent que la surface de la comète, et peut-être des autres comètes, est couverte d'une croûte noire de poussière et de roche qui enveloppe la majorité de la glace. Ces comètes libèrent du gaz seulement quand les trous de sa croûte sont tournés vers le Soleil, exposant la glace interne aux rayons chauds du Soleil.

Pendant un vol de reconnaissance en 2001, la sonde spatiale Deep Space 1 a observé le noyau de la comète Borrelly et déduit qu'elle faisait la moitié de la taille (8 × 4 × 4 km) du noyau de la comète de Halley. Le noyau de la comète Borrelly était aussi en forme de pomme de terre et avait une surface noire. Comme la comète de Halley, la comète de Borrelly libère ses gaz seulement lorsque les trous de la croute exposent la glace vers les rayons du Soleil. Le diamètre du noyau de la comète Hale-Bopp a été estimé à 60 ± 20 km. La comète Hale-Bopp est apparue brillante à l'œil nu car son noyau exceptionnellement large avait dégagé beaucoup de poussière et de gaz. Le noyau de P/2007 R5 possède probablement un diamètre de seulement 100-200 m. Les plus grands centaures (instable, croiseur de planète, astéroïdes glacés) ont un diamètre estimé entre 250 et 300 km. 10199 Chariclo (258 km), 2060 Chiron (230 km), et 1995 SN55 (environ 300 km et considéré comme perdu), feraient partie des plus grands centaures. Les comètes connues ont une densité estimée à 0,6 g/cm^3.

La liste suivante contient les estimations de la taille, de la densité et de la masse de plusieurs comètes.

Nom	Dimensions (km)	Densité (g/cm^3)	Masse (kg)[13]
Comète de Halley	15 × 8 × 8[2,8]	0,6[14]	3 × 10^{14}
Tempel 1	7,6 × 4,9[15]	0,62[12]	7,9 × 10^{13}
19P/Borrelly	8 × 4 × 4[9]	0,3[12]	2 × 10^{13}
81P/Wild	5,5 × 4 × 3,3[16]	0,6[12]	2,3 × 10^{13}

Albédo

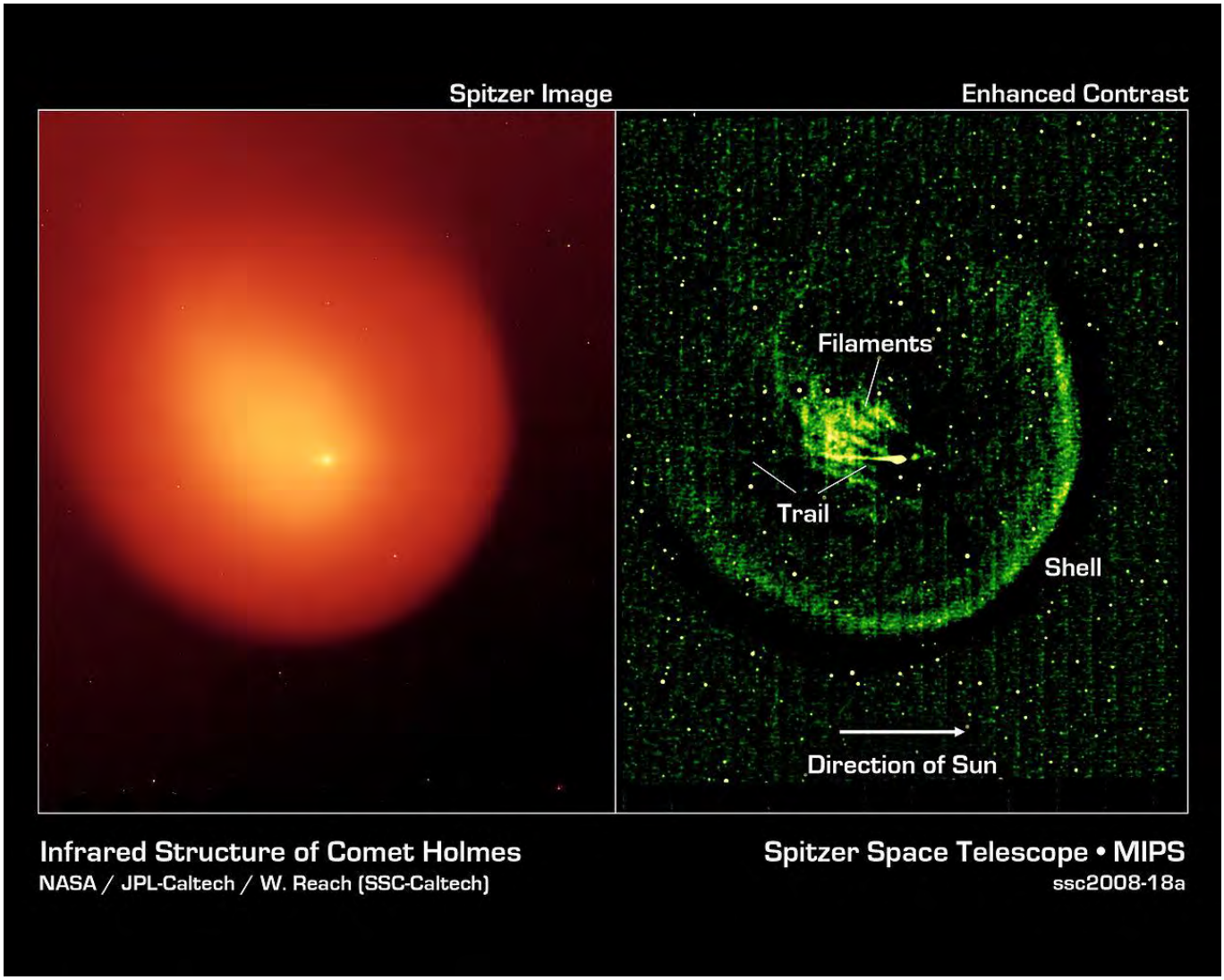
Les comètes sont souvent décrites comme des « boules de neige sales », mais de récentes observations ont révélé des surfaces de roches ou de poussière sèches, ce qui suggère que les glaces sont cachées sous la croûte. Il est suggéré que les comètes devraient être appelées « boules de terre glacées ». Les noyaux de comètes font partie des objets les plus sombres du Système solaire avec un albédo compris entre 2 et 7 %, probablement en raison de la couche de molécules organiques solides (comme du goudron) qui recouvrent les poussières cométaires. La sonde de la mission Giotto a découvert que le noyau de la comète de Halley reflète environ 4 % de lumière reçue, et la sonde Deep Space 1 a découvert que la surface de la comète Borrelly reflète seulement entre 2,5 à 3 % de lumière reçue ; en comparaison, l'asphalte reflète 7 % de lumière perçue. Les scientifiques pensent que des composés organiques complexes forment la surface sombre. L'énergie solaire chasse les composés volatils, laissant derrière de longues chaines d'organismes lourds qui sont très sombres, comme du goudron ou du pétrole brut. La très importante obscurité de la surface des comètes leur permet d'absorber l'énergie nécessaire pour le dégazage. Environ 6 % des géocroiseurs pourraient être des noyaux éteints de comètes, qui ne dégazent plus. (14827) Hypnos et (3552) Don Quichotte sont deux astéroïdes géocroiseurs ayant des albédos aussi bas.

La chevelure

Chevelure de la comète 17P/Holmes, prolongée à droite par sa queue ionique.

La **chevelure** (ou la ***coma***) est l'enveloppe nébuleuse autour du noyau d'une comète, formée lorsque la comète passe près du Soleil lors de son orbite elliptique. En effet, à mesure que la comète se réchauffe, certaines parties de celle-ci connaissent une sublimation. Cela donne à une comète une apparence «floue» lorsqu'elle est vue dans des télescopes et la distingue des étoiles.

La chevelure est généralement constitué de glace et de poussière cométaire. L'eau composant jusqu'à 90 % des substances volatiles qui sortent du noyau lorsque la comète est à 3-4 UA du soleil, la molécule H_2O est détruite principalement par photolyse. Le vent solaire joue un rôle mineur dans la destruction de l'eau par rapport à la photochimie. De plus grosses particules de poussière sont laissées le long de la trajectoire orbitale de la comète tandis que les particules plus petites sont repoussées du Soleil vers la queue de comète par la pression de rayonnement.



Structure de la comète Holmes en infrarouge, vue par le télescope spatial Spitzer.

La **chevelure** (ou la ***coma***) est l'enveloppe nébuleuse autour du noyau d'une comète, formée lorsque la comète passe près du Soleil lors de son orbite elliptique. En effet, à mesure que la comète se réchauffe, certaines parties de celle-ci connaissent une sublimation. Cela donne à une comète une apparence « floue » lorsqu'elle est vue dans des télescopes et la distingue des étoiles.

La chevelure est généralement constitué de glace et de poussière cométaire. L'eau composant jusqu'à 90 % des substances volatiles qui sortent du noyau lorsque la comète est à 3-4 UA du soleil, la molécule H_2O est détruite principalement par photolyse. Le vent solaire joue un rôle mineur dans la destruction de l'eau par rapport à la photochimie. De plus grosses particules de poussière sont laissées le long de la trajectoire orbitale de la comète tandis que les particules plus petites sont repoussées du Soleil vers la queue de comète par la pression de rayonnement.

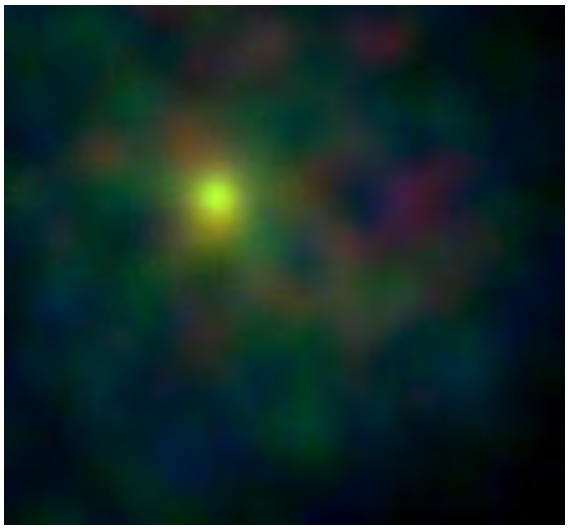
Terminologie
Le terme latin *coma* vient du grec « kome » (κόμη), qui signifie « cheveux » et est à l'origine du mot *comète* lui-même. Cela est traduit en français par « chevelure ».

Taille
Les chevelures grossissent généralement à mesure que les comètes s'approchent du Soleil, et elles peuvent être aussi grandes que le diamètre de Jupiter, même si leur densité est très faible. Environ un mois après une forte expansion en octobre 2007, la chevelure de la comète 17P/Holmes a brièvement une atmosphère de poussière ténue plus grande que le Soleil. La Grande comète de 1811 avait également une chevelure d'un diamètre comparable au Soleil.

Comète 17P/Holmes en novembre 2007.

Même si la chevelure peut devenir assez grande, sa taille peut également diminuer au moment où elle traverse l'orbite de Mars vers 1,5 UA du Soleil. À cette distance, le vent solaire devient assez fort pour chasser le gaz et la poussière du coma, élargissant plutôt la queue de comète.

Rayons X



Tempel 1 vue en rayons X par Chandra.

Il est découvert que les comètes émettent des rayons X en mars 1996. Cela surprend les chercheurs car l'émission de rayons X sont généralement associées à des corps de très haute température. Il est estimé que les rayons X sont générés par l'interaction entre les comètes et le vent solaire : lorsque des ions hautement chargés traversent une atmosphère cométaire, ils entrent en collision avec des atomes et des molécules cométaires, "arrachant" un ou plusieurs électrons de la comète. Ce processus conduit à l'émission de rayons X et de photons ultraviolets.

Observation

Avec un télescope situé sur la surface de la Terre, la taille d'une chevelure peut être calculée. Appelée méthode de la dérive (*drift method*), elle consister à verrouiller le télescope en position et à mesurer le temps de passage de la chevelure à travers le champ de vision. Ce temps multiplié par le cosinus de la déclinaison de la comète, multiplié par 0,25, est égal au diamètre de la chevelure en minutes d'arc. Si la distance à la comète est connue, alors la taille apparente de la chevelure peut être déterminée.
En 2015, il est noté par l'instrument ALICE de la sonde spatiale *Rosetta* que la chevelure de la comète 67/P était composée d'hydrogène, d'oxygène, de carbone et d'azote dans le coma, ce qui a également été appelé "atmosphère de la comète". L'instrument découvre également que les électrons créés par la lumière UV entrent en collision et brisent des molécules d'eau et de monoxyde de carbone.

Halo d'hydrogène

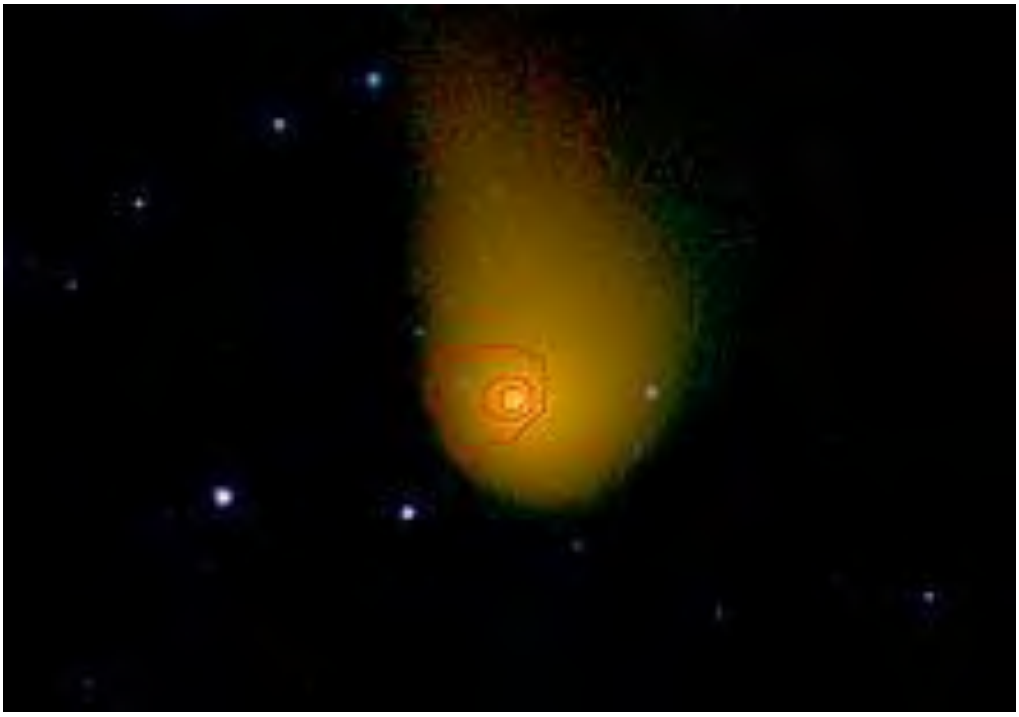
Image ultraviolette lointaine colorée artificiellement de la comète Kohoutek (Skylab, 1973).

Le télescope spatial OAO-2 (« Stargazer ») découvre vers 1970 l'existence de grands halos d'hydrogène gazeux autour des comètes. La sonde spatiale *Giotto* détecte des ions hydrogène à une distance de 7,8 millions de km de Halley quand elle survole la comète en 1986. Le halo d'hydrogène gazeux autour de la comète est détecté comme faisant 15 fois le diamètre du Soleil. Cela incite la NASA à diriger la mission *Pioneer Venus* vers la comète, où il est déterminé que la comète émet 12 tonnes d'eau par seconde. Cette émission d'hydrogène gazeux n'est pas détectée à partir de la surface de la Terre car ces longueurs d'onde

sont bloquées par l'atmosphère terrestre. Le processus par lequel l'eau est décomposée en hydrogène et oxygène est ensuite étudié par l'instrument ALICE de la sonde *Rosetta*.

Un halo d'hydrogène gazeux trois fois plus grand que le Soleil est détecté par *Skylab* autour de la comète Kohoutek dans les années 1970. *SOHO* détecte un halo d'hydrogène gazeux de plus de 2 UA de diamètre autour de la comète Hale-Bopp. L'eau émise par la comète est décomposée par la lumière du soleil et l'hydrogène émet à son tour une lumière ultraviolette. Les atomes d'hydrogène sont très légers et peuvent donc parcourir une longue distance avant d'être eux-mêmes ionisés puis emporté par le vent solaire.

Composition



C/2006 W3 (Chistensen) émettant du dioxyde de carbone (image infrarouge).

Le 11 août 2014, des astronomes publient des études utilisant pour la première fois le Grand réseau d'antennes millimétrique/submillimétrique de l'Atacama et détaillant la distribution de HCN, HNC, H_2CO et de la poussière à l'intérieur des comètes C/2012 F6 (Lemmon) et C/2012 S1 (ISON).

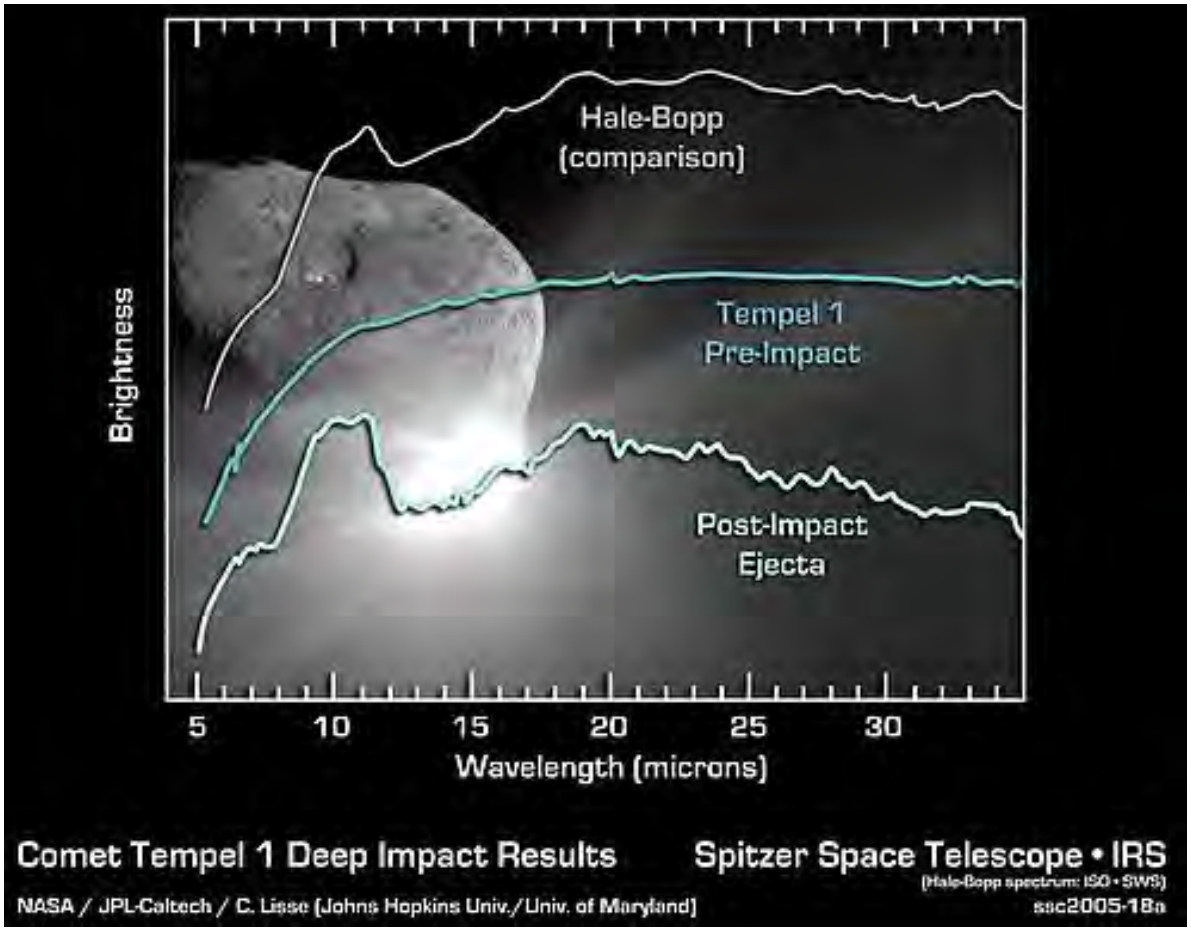
Le 2 juin 2015, la NASA rapporte que le spectrographe ALICE de la sonde spatiale *Rosetta* étudiant la comète 67P/ Tchourioumov-Guérassimenko détermine que les électrons à moins d'un kilomètre du noyau cométaire sont produits à partir de la photo-ionisation des molécules d'eau par le rayonnement solaire, et non des photons du Soleil comme pensé auparavant. Ce processus est responsable de la libération des molécules d'eau et de dioxyde de carbone du noyau de la comète vers sa chevelure. Par ailleurs, la mission *Rosetta* trouve du monoxyde de carbone, du dioxyde de carbone, de l'ammoniac, du méthane et du méthanol dans la chevelure de la comète 67P, ainsi que de petites quantités de formaldéhyde, de sulfure d'hydrogène, de cyanure d'hydrogène, de dioxyde de soufre et de disulfure de carbone. Les quatre principaux gaz dans la chevelure de 67P sont l'eau, le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone et l'oxygène. Le rapport oxygène/eau provenant de la comète est resté constant pendant plusieurs mois.

Spectre de la chevelure

La chevelure, ou *coma* (mot latin de même sens), forme un halo à peu près sphérique entourant le noyau et constitué de particules neutres de gaz et de poussières issus de ce noyau. Ces particules sont libérées sous forme de jets lorsque la comète se rapproche du soleil, provoquant la sublimation des glaces du noyau. Cette chevelure est entourée d'un nuage d'hydrogène atomique produit par photodissociation d'un certain nombre d'espèces, principalement H_2O et OH.

Son diamètre est généralement compris entre 50 000 et 250 000 kilomètres, avec des limites extrêmes de 15 000 et 1 800 000 kilomètres. La chevelure s'identifie fréquemment avec la tête de la comète, étant donné le faible diamètre relatif du noyau.

Les analyses du gaz de la chevelure de la comète de Halley indiquent que celle-ci contient 80 % d'eau, 10 % de monoxyde de carbone, 3 % de dioxyde de carbone, 2 % de méthane, moins de 1,5 % d'ammoniac et 0,1 % d'acide cyanhydrique.



Comparaison de trois spectres de chevelure de comète.

E) Les queues

Si la comète est suffisamment active, la coma se prolonge par des traînées lumineuses appelées queues.

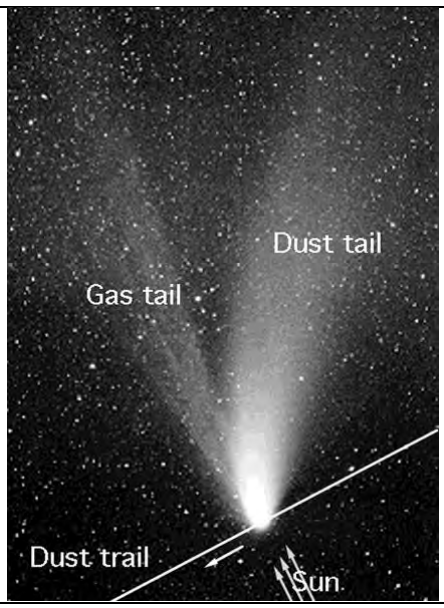
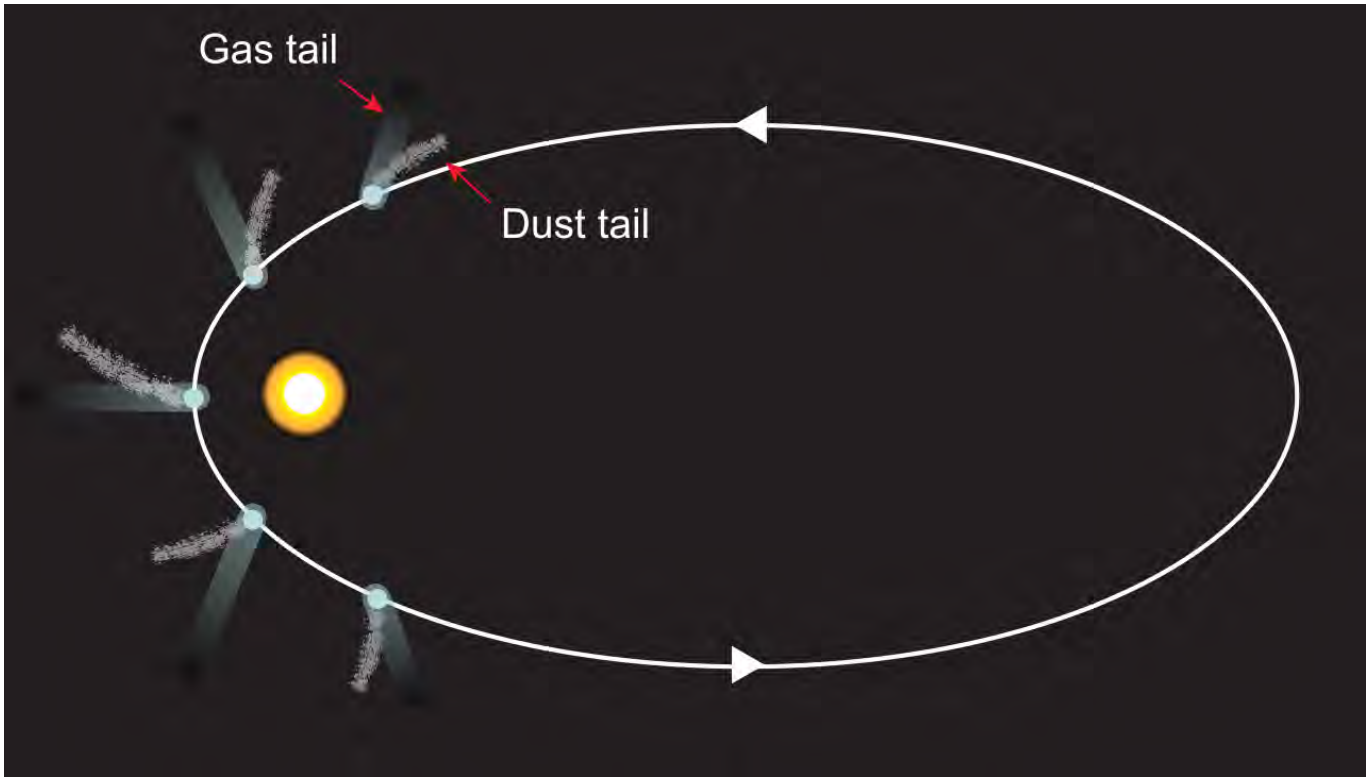


Diagramme d'une comète montrant l'orbite de la comète, la queue de poussière et la queue de gaz.

La **queue d'une comète** est une émission de plasma et de poussières qui se crée lorsqu'une comète se rapproche d'une étoile. Elle se forme alors par sublimation des glaces du noyau cométaire, engendrée par le vent solaire, la température grandissante et la collision des photons avec la comète. La queue d'une comète est distincte de sa chevelure, ou coma, qui n'est que le « halo » de gaz et de poussières entourant le noyau.

La queue d'une comète est composée d'une queue de gaz ionisé et d'une queue de poussières. La queue ionisée, bleutée et rejetée à grande vitesse, est toujours orientée de manière diamétralement opposée au Soleil, alors que la queue de poussières, jaunâtre et rejetée à des vitesses moindres, a une trajectoire plus courbée.

Formation



Les différentes positions des queues lors du passage près d'un soleil.
Dust Tail : queue de poussières — Gas Tail : queue gazeuse ou ionique

Dans le Système solaire externe, les comètes sont gelées et n'ont pas de queue. Alors que la comète approche du Système solaire interne, la radiation solaire vaporise les matières volatiles contenues à l'intérieur du noyau. Le flux de poussières et de gaz ainsi relâché forme une « atmosphère » extrêmement raréfiée autour de la comète, appelée chevelure. Une gigantesque queue, qui pointe toujours en direction opposée au Soleil, résulte de la force exercée sur la chevelure par la pression de radiation du Soleil et des vents solaires.

Perte de la queue

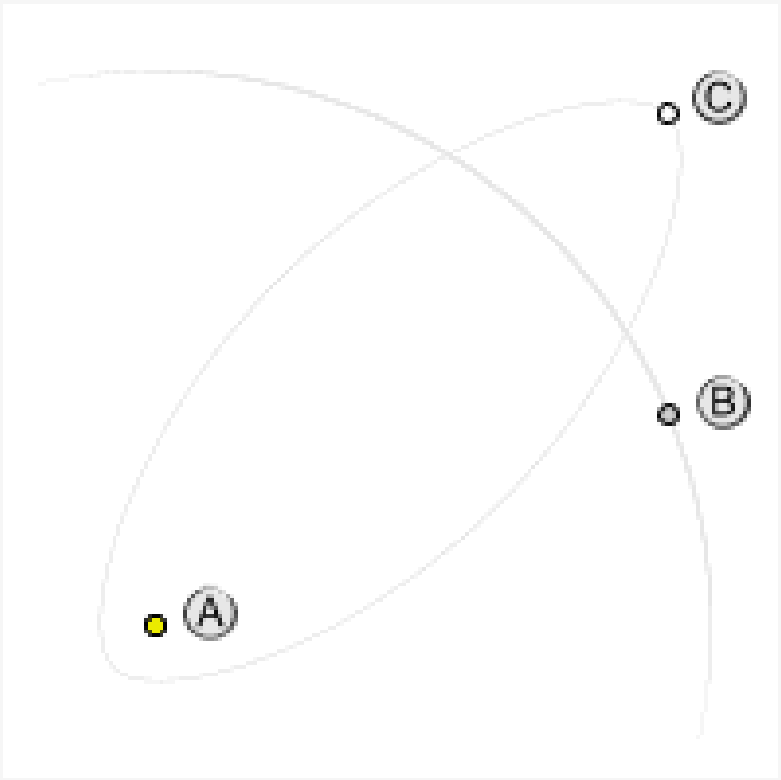
Si la charge ionique de la queue devient insuffisante, les lignes du champ magnétique sont pressées les unes contre les autres à un point tel que, plus loin le long de la queue, une reconnexion magnétique survient. Cela mène à la déconnexion de la queue. Cela a pu être observé à maintes reprises, notamment le 20 avril 2007 lorsque la queue ionisée de la comète de Encke s'est complètement détachée alors qu'elle est passé à travers une éjection de masse coronale. Cet évènement a été observé par la mission spatiale STEREO de la NASA. Une déconnexion a également été observée le 26 mai 2010 sur C/2009 R1.

La queue bleue d'Hale-Bopp, due essentiellement à l'ion CO+.

Une comète importante possède en général deux queues visibles :

- Une queue constituée d'un plasma, rectiligne et se maintenant à l'opposé du Soleil (comme une ombre), poussée à haute vitesse (de l'ordre de 500 km/s) par le vent solaire ; les changements de polarité du vent solaire produisent des ruptures dans la queue de plasma qui se reconstitue dans les heures qui suivent.
- Une queue plus large constituée de poussières poussées par la pression de radiation solaire, et incurvée dans le plan de l'orbite par la gravité du soleil. Grâce aux travaux de Michael Finson et Ronald Probstein (1968), qui ont mis en œuvre les hypothèses de Fiodor Bredikhine (1885) qui faisaient elles-mêmes suite à celles de Bessel, on peut modéliser la queue de poussières. Les trajectoires (képlériennes) des grains peuvent ainsi être analysées en fonction de la durée d'émission (synchrones) ou en fonction de leur taille (syndynes).
- Une troisième enveloppe, invisible avec des instruments optiques, mais décelée grâce à la radioastronomie, est la queue d'hydrogène qui s'étend sur des dimensions considérables.
- Une anti-queue, constituée de gros grains qui, par effet de perspective lorsque la Terre traverse le plan de l'orbite cométaire, semble pointer vers le Soleil.
- Leurs dimensions sont considérables : des longueurs de 30 à 80 millions de kilomètres sont relativement fréquentes.

F) Les Orbites



Animation d'une comète sur son orbite — (A : Soleil, B : Pluton, C : Comète)

Comme toute orbite céleste, celles des comètes sont définies à l'aide de six paramètres (éléments orbitaux) : la période P, argument du périhélie ω, la longitude du nœud ascendant Ω, l'inclinaison i, la distance du périhélie q et l'excentricité e. Lorsqu'on découvre une nouvelle comète, après au moins trois observations distinctes, on modélise une première orbite en prenant e = 1 : par défaut, l'orbite est supposée parabolique. Lorsque plus d'observations ont pu être effectuées, une meilleure orbite osculatrice est calculée en affinant la valeur de l'excentricité.

La majorité des comètes répertoriées ont une orbite elliptique et gravitent autour du Soleil : ce sont les comètes périodiques, leur période pouvant être modifiée par des perturbations gravitationnelles.

Les comètes sont dites, par convention, à courte période quand leur période est inférieure à deux cents ans. Celles-ci seraient originaires de la ceinture de Kuiper, passeraient par un stade de centaure avant d'atteindre le Système solaire interne.

Les comètes dont la période est supérieure à 200 ans, appelées comètes à longue période, sont supposées provenir du Système solaire externe (objets détachés, objets éjectés dans le nuage de Hills ou le nuage d'Oort par le passage d'étoiles et de nuages moléculaires et réinjectés dans le Système solaire par le même type de perturbation gravitationnelle).

Les comètes attachées au Système solaire ont une orbite dont l'excentricité est inférieure à 1 (orbites elliptiques, donc comètes périodiques). Il existe quelques rares cas de comètes dont l'excentricité est supérieure à 1 (orbites hyperboliques, donc comètes non périodiques) : soit il s'agit de comètes provenant de l'extérieur du Système solaire (moins d'une par siècle), soit il s'agit de comètes dont l'orbite a subi des perturbations gravitationnelles telles que, en l'absence de perturbations supplémentaires modifiant leur orbite en sens inverse, elles vont sortir du Système solaire.

Les comètes rasantes se caractérisent par un périhélie extrêmement proche du Soleil, parfois à quelques milliers de kilomètres seulement de la surface de celui-ci. Alors que les petites comètes rasantes peuvent complètement s'évaporer lors d'un tel passage, celles de plus grandes tailles peuvent survivre à plusieurs passages au périhélie. Cependant, l'importante évaporation et les forces de marée entraînent souvent leur fragmentation.

Modification des éléments orbitaux

Lorsqu'une comète passe à proximité des grosses planètes (essentiellement Jupiter), elle subit des perturbations gravitationnelles qui peuvent modifier certains de ses éléments orbitaux. C'est ainsi que la comète Shoemaker-Levy 9, initialement en orbite autour du Soleil, a été capturée par Jupiter puis a finalement percuté cette dernière en 1994 parce que lors de son précédent passage, cette comète était passée suffisamment près de cette planète pour qu'à la fois son orbite soit modifiée et son noyau décomposé en une multitude d'éléments répartis le long de l'orbite.

Les éléments orbitaux d'une comète peuvent aussi être modifiés de manière non prévisible par l'activité du noyau (perturbations non gravitationnelles). Pour ces raisons les éléments orbitaux d'une comète ne sont jamais définitifs et doivent être recalculés lors de chaque passage (dans le cas des comètes à courte période).

Paramètres de quelques comètes

Voici quelques-uns des paramètres de quelques comètes connues :

Comète	Période (années)	Paramètres de l'orbite		
		Excentricité	Aphélie (ua)	Périhélie (ua)
67P/Tchourioumov-Guérassimenko	6,55	0,640	5,68	1,243
1P/Halley	75,31	0,967	35,1	0,586
2P/Encke	3,30	0,847	4,096	0,339
C/1995 O1 (Hale-Bopp)	2 537	0,994	371,146	0,914
108P/Ciffréo	7,23	0,542	5,774	1,713
13P/Olbers	69,51	0,930	32,635	1,178
C/1975 V1-A (West)	558 306	0,999	13 560,217	0,196
109P/Swift-Tuttle	133,28	0,963	51,225	0,959
3D/Biela	6,64	0,751	6,190	0,879
C/2004 F4 (Bradfield)	3 679	0,999	476,543	0,168
C/1969 Y1 (Bennett)	1 678	0,996	281,892	0,537
C/1908 R1 (Morehouse)	∞	1,0007	∞	0,945

Comètes et étoiles filantes

Les essaims d'étoiles filantes (par exemple : Perséides, Orionides, Géminides) sont associés à des comètes. Les poussières perdues par une comète lors d'un passage se répartissent le long de l'orbite de celle-ci en formant une sorte de vaste nuage. S'il advient que la Terre, dans son mouvement orbital annuel, traverse un tel nuage, on assiste alors à une pluie d'étoiles filantes plus ou moins dense suivant l'activité et la nature de la comète. Ces « étoiles filantes » semblent provenir d'un même point du ciel appelé le radiant, un peu comme lorsqu'on est dans un tunnel rectiligne et que l'on a l'impression que les bords de celui-ci convergent vers un même point. L'essaim est nommé d'après la constellation où est situé le radiant (par exemple : Persée pour les Perséides, les Gémeaux pour les Géminides).

Les poussières cométaires, lorsqu'elles pénètrent dans la haute atmosphère de la Terre, s'échauffent et s'ionisent, produisant la traînée lumineuse que l'on connaît. L'intensité d'un essaim météoritique est variable et dépend notamment du réensemencement en poussières lors de chaque passage des comètes.

Les comètes à l'origine de l'eau sur Terre

Une équipe internationale a pu décrypter, par les données du télescope spatial Herschel, que l'eau de la comète Hartley 2 ressemblait parfaitement, au niveau chimique, à celle des océans de la Terre alors que, jusqu'ici, on croyait que celle-ci avait été apportée par les astéroïdes. Lors de sa formation, la Terre était très chaude et ses petites réserves d'eau se seraient évaporées. L'eau que l'on retrouve aujourd'hui serait présente grâce au bombardement de corps célestes, quelques dizaines de millions d'années après la

naissance de la Terre. La plupart des comètes viennent du nuage de Oort autour du système solaire. Les comètes de ce secteur renferment environ 50 % de glaces d'eau, bien que des analyses avaient démontré que cette eau contenait beaucoup plus de deutérium que celle de nos océans. Les chondrites carbonées, astéroïdes issus de la ceinture située entre Mars et Jupiter, similaire à notre eau, s'avéraient alors être les meilleurs candidats. Dorénavant, les comètes de type Hartley 2 rivalisent avec eux, ne provenant pas du nuage de Oort mais de la ceinture de Kuiper

L'hypothèse que l'eau de la Terre proviendrait des comètes avait déjà été formulée par William Whiston dans sa *Nouvelle Théorie de la Terre* en 1696.

G) Histoire

Comète de Halley dessinée sur la tapisserie de Bayeux, présage guerrier sur la bataille d'Hastings ?

Les comètes étaient vues autrefois comme un halo lumineux qui apparaissait épisodiquement dans le ciel, et qui était interprété, selon son aspect et selon le contexte historique, comme un signe de bon ou mauvais augure. En 1696 encore, William Whiston dans sa *Nouvelle Théorie de la Terre*, avance que la comète de 1680 est celle qui provoqua le Déluge lors d'un passage juste au-dessus de la Terre. Il soutient que les comètes sont responsables des catastrophes qu'a connues la Terre tout au long de son histoire, et qu'elles sont guidées par la volonté divine : « La Terre selon lui existait dans le chaos avant la création dont parle Moïse et cette création n'eut d'autre effet que de lui donner une forme et une consistance propres à la mettre en état de servir d'habitation au genre humain. La Terre dit cet auteur devenue fertile et peuplée au temps de la création conserva cette forme et cette consistance jusqu'au dix-huitième jour de novembre de l'année 2565 avant la période julienne où elle eut le malheur de rencontrer et de traverser l'atmosphère d'une grande comète dont la queue l'inonda d'un immense volume d'eau ce qui produisit le mémorable fléau du déluge universel rapporté dans l'écriture, fléau d'où sont nés tous les ravages toutes les altérations tous les phénomènes physiques qu'on observe à la surface et dans intérieur de ce globe ».

Premières observations

Dans l'Antiquité, les premières traces écrites d'observations de comètes figurent dans des annales chinoises (à l'époque ces chroniques sont essentiellement de la scapulomancie gravée sur carapace de tortues ou omoplates d'animaux) de la dynastie Shang datant de 1059 av. J.-C. (le plus ancien passage attesté de la

comète de Halley remontant à l'an 240 av. J.-C. est consigné dans ces archives chinoises), mais aussi à la même époque sur des tablettes en écriture cunéiforme chaldéennes. Le plus ancien dessin date du IVe siècle av. J.-C. : sur un livre de soie découvert en 1974 dans la tombe du marquis de Dai en Chine, sont représentés vingt-neuf types de comètes.

Les premières interprétations sur la nature des comètes viennent de la philosophie naturelle grecque. Aristote, dans son traité *Du ciel*, divise le cosmos en monde céleste, composé d'éléments sphériques parfaits et monde sublunaire avec ses objets imparfaits. Dans son traité *Meteorologia*, Aristote classe les comètes dans le monde sublunaire : elles sont selon lui des phénomènes atmosphériques de la sphère de l'air remontant dans la sphère du feu. Au contraire, les pythagoriciens considèrent qu'il s'agit de planètes rarement observables. Diodore de Sicile y voit des poutres enflammées alimentant le Soleil. Chez les Romains, Sénèque reprend la théorie d'Apollonios de Myndos selon laquelle les comètes sont des astres errants revenant à des périodes trop longues à l'échelle d'une vie humaine. Malgré ces interprétations de savants et de philosophes, la croyance populaire en fait à cette époque (et jusqu'au XXe siècle) des signes annonciateurs, le plus souvent de mauvais augure, plus rarement propitiatoires : ainsi les Chaldéens et les Mésopotamiens leur offrent de l'encens pour infléchir le funeste présage ; certaines femmes grecques et romaines en deuil délient leurs cheveux pour manifester leur chagrin ; certains astrologues égyptiens pensent que sacrifices et prières ne peuvent conjurer leur pouvoir annonciateur ; les astrologues au Moyen Âge les associent à des morts illustres : comète de 451 pour la mort d'Attila, de 632 pour Mahomet, de 1223 pour Philippe-Auguste, comète de Halley pour Henri IV, etc. Outre ces présages funestes, elles sont également associées à des batailles (bon augure pour les Normands, mauvais pour les Anglo-saxons lors de la Bataille d'Hastings). En 1472, l'astronome Johann Müller observe une comète à Nuremberg. Il fonde la cométographie. Paolo Toscanelli observe les comètes de 1433, 1449, 1456 et calcule leur position.

Leur nature véritable comme leur périodicité n'ont été trouvées qu'à partir de la Renaissance. En 1531, Petrus Apianus et Girolamo Fracastoro observent indépendamment que la queue des comètes est orientée à l'opposé du Soleil (des astronomes chinois au VIIe siècle l'avaient déjà remarqué), mettant ainsi en évidence l'effet des vents solaires. Tycho Brahe (1546-1601) montre en 1577, grâce au phénomène de parallaxe, que les comètes ne sont pas un phénomène sublunaire comme on le croyait couramment à son époque. En 1609, Johannes Kepler suppose, dans son ouvrage *De cometis*, que les comètes naissent par génération spontanée et suivent une trajectoire rectiligne à une vitesse variable. En 1652, il est contredit par Pierre Gassendi qui, dans son *Traité sur les comètes*, leur attribue une vitesse constante et par Seth Ward (1617-1689) qui comprend qu'elles suivent des ellipses, d'où le fait qu'elles ne soient visibles que lorsqu'elles sont suffisamment proches de la terre et du soleil.

H) Connaissance moderne

Annoncé par Halley en 1705, le retour de la comète de Halley de 1759 constitue la vérification la plus éclatante de la théorie de la loi de gravitation universelle de Newton.

Après avoir d'abord réfuté cette théorie, Isaac Newton (1643-1727) prouve que les comètes obéissent aux mêmes lois de mécanique céleste que les planètes, et possèdent une masse. En utilisant certaines de ces observations, dont plusieurs effectuées par lui-même, Isaac Newton élabore la théorie du mouvement des comètes dans le cadre de sa Loi universelle de la gravitation et établit ainsi pour la première fois leur appartenance au système solaire. Dans la première édition de ses *Principia*, Newton hésitait à attribuer aux orbites cométaires la forme de paraboles ou celle d'ellipses très allongées, plus apparentées aux trajectoires des planètes. John Flamsteed propose en 1680 une relation d'attraction-répulsion entre comètes et le Soleil.

La seconde des hypothèses envisagées par Newton reçoit un appui décisif lorsqu'en 1695 l'un de ses amis, l'astronome et mathématicien Edmond Halley (1656-1742), se persuade de l'identité probable de certaines comètes dont il s'était efforcé de calculer les éléments de trajectoires (Les apparitions cométaires de 1531, 1607 et 1682, ne seraient en fait qu'une seule et même comète). Annoncé par Halley en 1705 et précisé par Alexis Claude Clairaut en novembre 1758, le retour de la « comète de 1682 » observée à l'époque par Halley lui-même et qui sera bientôt appelée « comète de Halley » se réalisa le 13 mars 1759, date du passage de la comète à son périhélie. La valeur symbolique du retour de cet astre - qui n'est pas le plus remarquable ni le plus étudié - et qui lui valut une place privilégiée aussi bien dans les observations des astronomes que dans l'attention d'un vaste public, tient dans le fait qu'il s'agit du premier retour prévu d'une comète et pour le monde scientifique, qu'il s'agit de la plus éclatante vérification de la loi de gravitation universelle, tandis que sont définitivement éclaircis les principes de la théorie des comètes. La dernière version de l'étude de Halley, réalisée en 1717, devait être jointe à des « Tables astronomiques » qu'il venait de calculer, mais le tout n'est publié qu'après sa mort en version latine (1749), en version anglaise (1752) et en traduction française (1759). Toutefois la « prévision » de Halley avait été reprise dans les éditions et traductions successives des *Principia* de Newton ainsi que dans divers traités d'astronomie.

En tenant compte des études théoriques de Joseph-Louis Lagrange (1736 - 1813), Pierre-Simon de Laplace (1749-1827), Carl Friedrich Gauss (1777-1855), le retour suivant de la comète de Halley, celui de 1835, sont l'objet de plusieurs prévisions, dont les meilleures se révélèrent exactes à trois ou quatre jours près. La technique actuelle de calcul des orbites cométaires reprend avec de puissants ordinateurs la méthode de variation des éléments de la trajectoire introduite par Philip Herbert Cowell et Andrew Crommelin (1865–1939) en 1910, mais en ajoutant à l'ensemble des forces de gravitation classiques agissant sur la comète, des forces complémentaires non gravitationnelles de réaction, dues à l'éjection de matière cométaire sous l'action des rayons du Soleil. La prise en compte de ces dernières forces, introduites depuis 1973, à l'instigation de Brian G. Marsden (1937-2010), Z. Sekanina et D. K. Yeomans, permet d'améliorer suffisamment les calculs antérieurs et de reconstituer avec beaucoup de vraisemblance les caractéristiques essentielles des trajectoires cométaires correspondant à 1 109 apparitions de comètes attestées de -239 à mai 1983.

Les premiers résultats obtenus par la mission Stardust (1999-2011) ont considérablement modifié les hypothèses concernant la formation des comètes. En effet les grains prélevés dans la coma de la comète Wild 2 par cette mission et ramenés sur Terre contiennent de l'olivine, matériau qui ne peut être synthétisé qu'à de très hautes températures (1 300 K). On est donc amené à penser que les noyaux de comètes ont été formés à proximité du Soleil et ont par la suite été éjectés vers le Nuage d'Oort. Pourtant les premières interprétations données de l'analyse des grains rapportés par Stardust doivent être prises avec circonspection : on soupçonne des interactions entre le matériau qui les contenait (aérogel) avec l'atmosphère terrestre. Cela signifierait que les comètes seraient composées de matière plus ancienne que notre système solaire. Les noyaux de comètes se sont formés par accrétion : les petits grains se collent les uns aux autres pour former des grains plus gros, lesquels se rassemblent à leur tour jusqu'à atteindre la taille d'un noyau de comète, de quelques kilomètres. Selon les scientifiques français, les molécules organiques provoquant les BID, et préexistantes dans les nébuleuses primitives, n'ont donc probablement pas été détruites, mais ont pu faire partie des grains constituant les noyaux cométaires, où elles se trouvent toujours, 4,6 milliards d'années plus tard.

La récupération in situ n'est pas l'unique moyen de récupérer de la matière cométaire. La Terre traverse continuellement divers nuages de poussières stellaires et notamment de la matière cométaire lorsque

l'orbite de la Terre coïncide avec le sillage d'une comète. C'est ainsi que depuis 1982, la NASA récupère à l'aide d'avions pouvant voler à haute altitude de la poussière cométaire.

Missions spatiales

L'étude des comètes a considérablement progressé avec l'avènement de l'ère spatiale. Dix sondes ont contribué à mieux connaître les noyaux cométaires, les quatre premières s'étant approchées de la comète de Halley en 1986.

- La sonde soviétique Vega 1, lancée le 15 décembre 1984, après avoir détaché un module vers la planète Vénus, s'approche à 8 890 km de Halley le 6 mars 1986.
- La sonde japonaise Sakigake, lancée le 7 janvier 1985 rencontre Halley le 11 mars 1986.
- La sonde japonaise Suisei, lancée le 19 août 1985 rencontre Halley le 8 mars 1986.
- La sonde européenne Giotto, lancée le 2 juillet 1985 s'approche du noyau de Halley le 13 mars 1986 à moins de 500 km.
- La sonde américaine Deep Space 1, lancée le 24 octobre 1998, après avoir survolé l'astéroïde Braille le 29 juillet 1999, traverse la queue de la comète 19P/Borrelly le 22 septembre 2001.
- La sonde américaine Stardust, lancée le 7 février 1999, passe à moins de 236 km de la comète Wild 2 le 24 janvier 2004, prélève de la poussière en traversant sa queue et la ramène sur Terre le 15 janvier 2006. En 2007, une seconde mission lui est assignée, vers une nouvelle comète : le 15 février 2011 elle passe à 190 km de la comète Tempel 1.
- La sonde américaine Deep Impact, lancée le 12 janvier 2005, creuse un cratère artificiel sur le noyau de la comète Tempel 1 le 4 juillet 2005, par collision d'un impacteur. Puis, après avoir utilisé l'assistance gravitationnelle de la Terre fin 2007, la sonde - rebaptisée EPOXI - passe à environ 700 km de la comète 103P/Hartley le 4 novembre 2010.
- La sonde européenne Rosetta lancée le 2 mars 2004, après avoir survolé les astéroïdes Šteins (5 septembre 2008) et Lutetia (10 juillet 2010), se met en orbite à 100 km autour de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko dix ans après son lancement, le 6 août 2014, ce qui constitue une première technologique. Les images de haute définition sont transmises, révélant de nombreux détails de l'astre. *Philae*, un petit atterrisseur, s'est posé sur son noyau le 12 novembre 2014.
- La sonde européenne SoHO (Solar and Heliospheric Observatory), lancée le 2 décembre 1995, destinée à étudier le Soleil en continu et qui de ce fait a permis de découvrir des comètes qui finissaient leur vie en « tombant » dans le Soleil, appelées comètes rasantes.
- Les satellites jumeaux de la mission américaine STEREO (Solar TErrestrial RElations Observatory), lancés le 25 octobre 2006 et destinés eux aussi à étudier le Soleil, ont permis, comme SoHO, la découverte de nombreuses comètes rasantes.
- L'Agence spatiale européenne a prévu de lancer en 2028 la sonde spatiale Comet Interceptor qui sera dirigée vers une comète ou un objet interstellaire n'ayant jamais survolé le Soleil. En effet, jusque-là, les comètes étudiées ont toutes effectué plusieurs passages près du Soleil, ce qui a transformé leur structure et leur composition. Cette interception est rendue possible par l'existence d'observatoires terrestres permettant de découvrir de nouvelles comètes longtemps à l'avance.

Désignation

Avant la publication en 1705 d'Edmond Halley sur la comète portant son nom, ces petits corps du Système solaire étaient considérés comme des phénomènes isolés, uniques et non périodiques, aussi les comètes ne portaient pas de nom.

Mise à part la comète de Halley, ou celle de Encke, le nom d'une comète est attribué officiellement par une commission de l'Union astronomique internationale (UAI, IAU en anglais), dont le siège est à Washington, D.C.. Certaines comètes historiques, spectaculaires et aisément visibles à l'œil nu, n'ont aucun nom officiel et sont simplement désignée comme *grande comète*. Par exemple la grande comète de 1811.

Traditionnellement, on donne aux comètes le nom de son (ou de ses) découvreur(s), jusqu'à trois noms au maximum. Dans le cas des comètes Halley, Encke ou Lexell, il s'agit du nom des personnes qui ont déterminé la périodicité de ces astres. Quelques comètes sont nommées d'après le lieu de leur découverte (la comète Lulin) et un nombre de plus en plus important reçoit le nom d'un programme de recherche

automatique, comme LINEAR ou NEAT, ou bien celui d'un satellite artificiel, comme SOHO. En plus du nom, les comètes reçoivent une référence officielle dont l'attribution obéit à un nouveau procédé (préfixe selon la période suivie d'une désignation séquentielle suivant l'ordre des découvertes : l'année, puis une lettre majuscule identifiant le demi-mois de la découverte, puis un nombre indiquant l'ordre de la découverte dans ce demi-mois) depuis le 1er janvier 1995.

Ancien procédé

Avant le 1er janvier 1995 les comètes recevaient une désignation provisoire constituée par l'année de la découverte suivie d'une lettre en minuscule correspondant à l'ordre de la découverte. Par exemple, 1965f, sixième comète trouvée pendant l'année 1965. Plus tard, le nom définitif lui était attribué selon les critères suivants : l'année du passage au périhélie, suivie d'un numéro noté en chiffres romains indiquant l'ordre chronologique du passage au périhélie (exemple : 1994 IV, quatrième comète passée au périhélie en 1994). Ce procédé comportait de nombreux inconvénients : la multiplication des découvertes épuisait l'alphabet. Quand on découvrait une 27e comète dans l'année, il fallait recommencer l'alphabet en faisant suivre la lettre du chiffre 1 (comme 1991a1). Les découvertes de comètes après leur passage au périhélie rendaient difficile une désignation officielle cohérente. Les comètes à courte période multipliaient les désignations, car une nouvelle désignation était attribuée à chacun de leurs retours.

Nouveau procédé

Depuis le 1er janvier 1995, une nouvelle nomenclature, inspirée par celle appliquée aux astéroïdes, est attribuée comme ceci :

1. Une lettre servant à identifier le type de comète : C indique une comète à longue période (supérieure à 200 ans) ou non périodique. P indique une comète à courte période (inférieure à 200 ans). La lettre D est utilisée pour les comètes perdues. X pour une comète dont l'orbite n'a pu être calculée.
2. L'année de la découverte.
3. Une lettre majuscule correspondant à la quinzaine du mois de la découverte (Voir tableau).
4. Un chiffre précisant l'ordre chronologique de découverte durant cette quinzaine.
5. Le nom du (ou des) découvreur(s).

Ainsi pour C/1995 O1 Hale-Bopp :

- C/ indique qu'il s'agit d'une comète à longue période (éventuellement non périodique).
- 1995 indique que la comète a été découverte en 1995.
- O indique qu'elle a été découverte au cours de la deuxième quinzaine de juillet.
- 1 indique qu'il s'agit de la première comète découverte au cours de cette période.
- Hale-Bopp est le nom de ses deux découvreurs, Alan Hale et Thomas Bopp.

Lorsque plusieurs comètes portent le nom d'un même découvreur, un numéro est parfois ajouté pour les différencier (comète Hartley 2 par exemple).

Pour les comètes périodiques dont le retour a été observé au moins une fois, la désignation subit une légère modification.

Par exemple la comète P/2001 J1 (NEAT) a été retrouvée en 2008, conformément aux calculs de sa période orbitale. Sa périodicité ne faisant aucun doute, elle a reçu l'appellation définitive 207P/NEAT, indiquant qu'il s'agit de la 207e comète périodique confirmée.

Tableau de correspondance des lettres aux quinzaines

Note : les lettres I et Z ne sont pas utilisées.

Mois	Quinzaine	Lettre
Janvier	du 1er au 15	A
	du 16 au 31	B
Février	du 1er au 15	C
	du 16 au 28 ou 29	D
Mars	du 1er au 15	E
	du 16 au 31	F
Avril	du 1er au 15	G
	du 16 au 30	H
Mai	du 1er au 15	J
	du 16 au 31	K
Juin	du 1er au 15	L
	du 16 au 30	M
Juillet	du 1er au 15	N
	du 16 au 31	O
Août	du 1er au 15	P
	du 16 au 31	Q
Septembre	du 1er au 15	R
	du 16 au 30	S
Octobre	du 1er au 15	T
	du 16 au 31	U
Novembre	du 1er au 15	V
	du 16 au 30	W
Décembre	du 1er au 15	X
	du 16 au 31	Y

I) Liste de comètes

Le Centre des planètes mineures répertorie au 14 janvier 2020 4 352 comètes. L'une des plus célèbres est la comète de Halley, qui réapparaît tous les 75 ou 76 ans. Parmi les autres comètes les plus connues, on peut citer :

- C/2020 F3 (NEOWISE), visible à l'œil nu pendant le mois de juillet 2020, la plus brillante dans l'hémisphère Nord depuis 23 ans, découverte par NEOWISE.
- C/2006 P1 (McNaught), très brillante,
- C/1995 O1 (Hale-Bopp), probablement la comète la plus observée, ayant été visible pendant 18 mois,
- C/1996 B2 (Hyakutake), également baptisée Grande comète de 1996,
- D/1993 F2 (Shoemaker-Levy) (Shoemaker-Levy 9), détruite par collision avec Jupiter en juillet 1994,
- 109P/Swift-Tuttle,
- 55P/Tempel-Tuttle,
- 19P/Borrelly, visitée par la sonde Deep Space 1,
- 9P/Tempel, première comète à être visitée par deux sondes : Deep Impact en 2005, qui lui a envoyé un impacteur, et Stardust en 2011,
- 81P/Wild (Wild 2), survolée par la sonde Stardust,

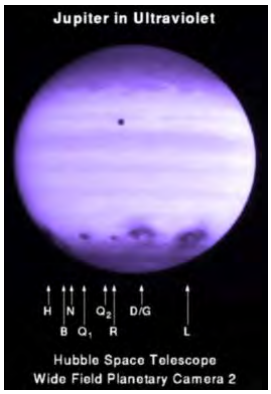
- 103P/Hartley (Hartley 2), survolée par la sonde Deep Impact.
- 67P/Tchourioumov-Guérassimenko, autour de laquelle la sonde Rosetta s'est mise en orbite en août 2014 et qui y a envoyé en novembre l'atterrisseur Philae, au terme d'une mission qui aura duré une dizaine d'années (cf. schéma ci-dessous).

J) D'où viennent les comètes ?

Elles viennent de trois principaux endroits de notre système solaire :

1 – Du système solaire interne.
Ce sont des corps en orbite héliocentrique mais qui ne vont pas plus loin que l'orbite de Neptune. Ce sont des comètes à très courte période. Une de leurs orbites autour du Soleil ne durera que quelques années (de 4 à 10/15 en général). Certaines ont un aphélie à 5 ou 6 unités astronomiques, aux environs de l'orbite de Jupiter. Elles ont des orbites fortement elliptiques. Ces comètes ne sont pas originaires de la zone où elles circulent. Ce sont des corps provenant des lointains horizons de la ceinture de Kuiper et/ou du nuage d'Oort qui ont été capturés par l'attraction gravitationnelle de l'une des géantes gazeuses et/ou du Soleil. Leur espérance de vie est assez courte (parfois quelques milliers d'années quand même) car leurs orbites et la périodicité de leur passage sont fortement influencés par l'attraction du Soleil et de Jupiter. De plus, en chauffant à chaque passage près du Soleil elles perdent de la matière, donc de la masse et sont encore plus vulnérables aux perturbations gravitationnelles. Elles finissent généralement leur vie en percutant le Soleil ou Jupiter. Elles pourraient également percuter une autre planète (dont la Terre), mais la probabilité d'un tel accident est heureusement beaucoup plus faible. Certaines comètes à très courte période peuvent exceptionnellement être capturées par Jupiter et ne plus tourner autour du Soleil. Ce fut le cas de la comète Schumaker-Levy9, qui avait frôlé Jupiter, avait été pulvérisée (par les forces de marée de la planète géante) en de nombreux fragments, dont le plus gros avait un diamètre d'environ 1,5 km et que, après une nouvelle et dernière orbite, ces morceaux allaient entrer en collision 2 ans plus tard avec Jupiter. Le spectacle fut grandiose, 21 morceaux de la comète brisée foncèrent vers Jupiter, pour s'écraser à sa surface, l'un après l'autre.

Les fragments de la comète Schumaker-Levy 9 en route vers Jupiter



Jupiter photographié en UV environ 2.5 heures après l'impact du fragment Robyn. Le point noir sur la partie haute est une lune qui transite devant la planète

Les taches sombres indiquent les sites d'impact sur l'hémisphère sud de Jupiter

Image prise par le télescope spatial Hubble le 23 juillet 2009, montrant une tache sombre d'environ 8 000 km de long

2 – De la ceinture de Kuiper.
Ces comètes ont le même type d'orbite autour du Soleil que les précédentes, sauf que leur périple est beaucoup plus lent car beaucoup plus long. Si leur périhélie les fait passer près du Soleil, à l'opposé, leur aphélie se situe très loin, dans la ceinture de Kuiper, à plus de 30 à 50 unités astronomiques. Ce sont des comètes à « courte période » orbitale, généralement de 20 à 200 ans. Il y a un grand nombre de comètes dans la ceinture de Kuiper. La plus célèbre d'entre-elles passe depuis longtemps nous voir tous les 76 ans ½, la comète de Halley (dernier passage en 1986, prochain en 2061). Ses passages ont été mentionnés depuis l'antiquité (notamment par les chinois depuis 611 av. J.C.) et l'image de son passage figure sur la célèbre Tapisserie de Bayeux décrivant la bataille d'Hastings en 1066.

3 – Du nuage d'Oort
Ces comètes à longue période orbitale mettent plus de 200 ans à revenir faire un tour du côté de notre Soleil. La plus belle comète des 100 dernières années est probablement la comète Hale-Bopp qui fut visible à l'œil nu de mai 1996 à fin 1997. C'était une grosse comète de 50 km de diamètre qui développait ses deux queues magnifiques. Elle vient du nuage d'Oort, parcourant un très long parcours qui ne la fera revenir qu'en 4385 !

De nombreuses de comètes viennent du nuage d'Oort, toutes celles dont deux passages successifs sont séparés d'au moins 200 à 300 ans. Il n'est pas forcément nécessaire d'attendre le prochain passage d'une comète par l'analyse détaillée des paramètres de son orbite quand elle passe aux environs de son périhélie. Sinon, comment savoir que Hale-Bopp ne reviendra (approximativement) qu'en 4385 ? Ce n'est que le fruit de calculs scientifiques sur les données mathématiques de son orbite.

Les comètes à très courte période peuvent avoir une durée orbitale de quelques années (parfois 2 ou 3 ans).

A l'inverse, certaines comètes ont une durée orbitale de plusieurs millions d'années. C'est ainsi qu'on a découvert en 1992 la comète C/1992 J1 (Spacewatch), qui est est une « comète non périodique » découverte le 1er mai 1992 par David Rabinowitz. L'orbite de cet astre fut calculée par Nakano. C'est la comète du système solaire connue qui s'éloigne le plus du Soleil, atteignant à son aphélie la distance de 154.202 UA, soit 2,44 années-lumière. Ce fut aussi la toute première comète découverte par le projet Spacewatch qui est un système automatique de détection des comètes, astéroïdes et autres petits corps.

La plupart des théories avancèrent que le nuage d'Oort devrait avoir une limite de 50.000 UA, voire même 100.000 UA mais aucune comète ne semblait être connue pour dépasser cette distance. Cela a changé avec C/1992 J1. Les premières observations furent effectuées le 1er mai 1992 par David Rabinowitz dans le cadre du projet Spacewatch. Cette découverte fut possible car l'astre s'approchait de son point le plus proche du Soleil. Cependant son périhélie n'a pas donné l'occasion d'avoir plus d'informations et l'orbite de la comète l'amenant aux confins du système solaire, il n'y aura sans doute aucune autre information à son sujet. Elle était au plus près du Soleil le 5 septembre 1993. On put l'observer durant deux ans mais le 2 février 1995, la comète fut trop loin de la Terre pour que l'on puisse l'observer. Il y eut au total 214 observations du corps durant 1007 jours.

Contrairement aux comètes périodiques que l'on retrouve souvent dans notre ciel comme la comète de Halley qui s'approche assez souvent de la Terre, cette comète ne va réapparaître que dans 21,4 millions d'années. Le demi-grand axe de l'orbite de C/1992 J1 est d'environ 77.102 ua. Ce demi-grand axe se trouve en plein milieu du nuage d'Oort et est d'une très rare importance. Mais du fait de l'excentricité très prononcée de cette orbite, **la distance entre la comète et le Soleil varie entre 3 ua au périhélie et 154.202 ua à l'aphélie.** On en déduit que l''année de ce corps (une orbite complète) couvre une période de 21,4 millions d'années terrestres, par l'application brute de la 3e loi de Képler.

La conséquence de ces mesures orbitales de C/1992 J1 (Spacewatch) est que l'extrémité lointaine du bord du nuage d'Oort se situerait donc à au moins 155.000 UA (ou 2,45 années-lumière), bien plus loin qu'on ne le pensait généralement !

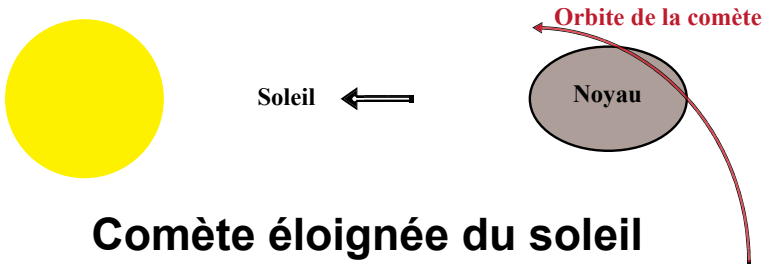
Durant son voyage, elle traverse la ceinture principale, les centaures, la ceinture de Kuiper, le nuage de Hills et le nuage d'Oort. Elle possède le plus grand demi-grand axe connu dans le système, qui équivaut à 1,22 année-lumière. Cette comète possède une inclinaison très forte sur le plan de l'écliptique (124,3187°) et une excentricité est de 0,999961. **Rappelons que si l'excentricité dépasse 1, la comète serait hyperbolique et ne reviendrait pas dans le système solaire**.

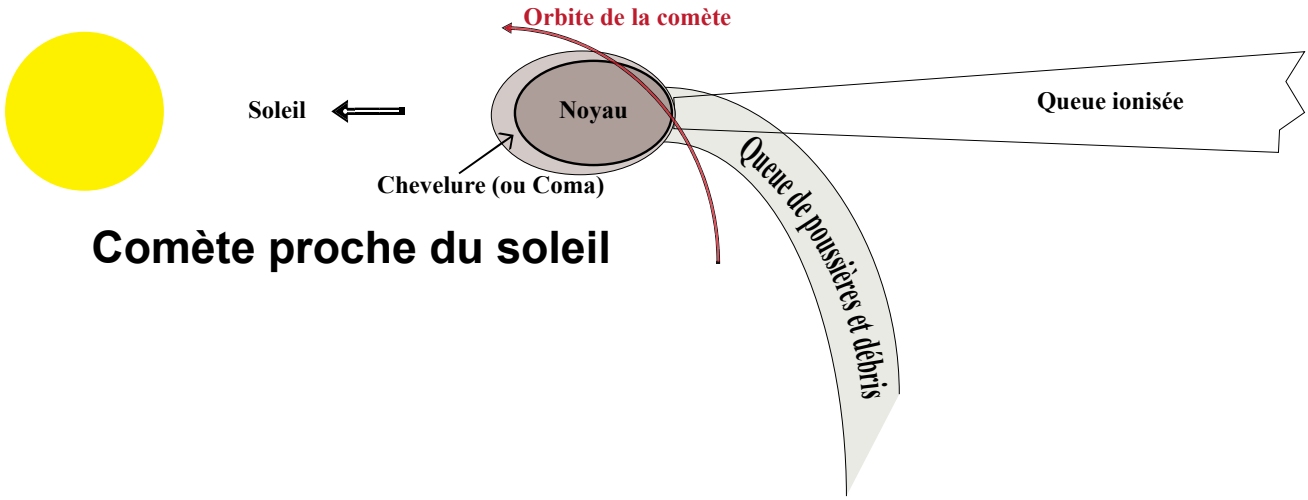
Certaines théories affirment que des comètes pourraient se trouver encore plus loin, à plus de 200 000 UA. Parmi ces comètes, certaines ont une orbite calculée à une distance bien plus grande. C'est le cas de la comète C/2008 C1, qui d'après le site Jet Propulsion Laboratory de la NASA, aurait un aphélie de 312.174 ua, ce qui place ce point en dehors du système solaire. Cependant, cette valeur correspondant à celle de l'orbite osculatrice, c'est-à-dire que c'est un point *mathématique* correspondant à l'extrapolation du mouvement de l'objet à une date donnée, point par lequel l'objet ne passera pas forcément réellement si son orbite est perturbée (à une telle distance, l'influence des objets hors du système solaire, en l'occurrence des autres étoiles les plus proches, ne sont plus négligeables et la comète quitterait peut-être le système solaire. L'orbite (osculatrice) serait alors hyperbolique avec un aphélie mathématiquement négatif).

K) Comètes et schémas

La comète Hale-Bopp

Hale-Bopp est passée près de Jupiter ce qui va ralentir sa course et la taille de son orbite. Auparavant elle allait jusqu'à 525 ua et une orbite durait 4200 ans. Maintenant elle n'ira plus qu'à 370 ua avec une orbite qui ne durera plus ***que*** *2533 ans !*





En s'approchant du Soleil, une comète va se réchauffer considérablement et va développer plusieurs éléments :

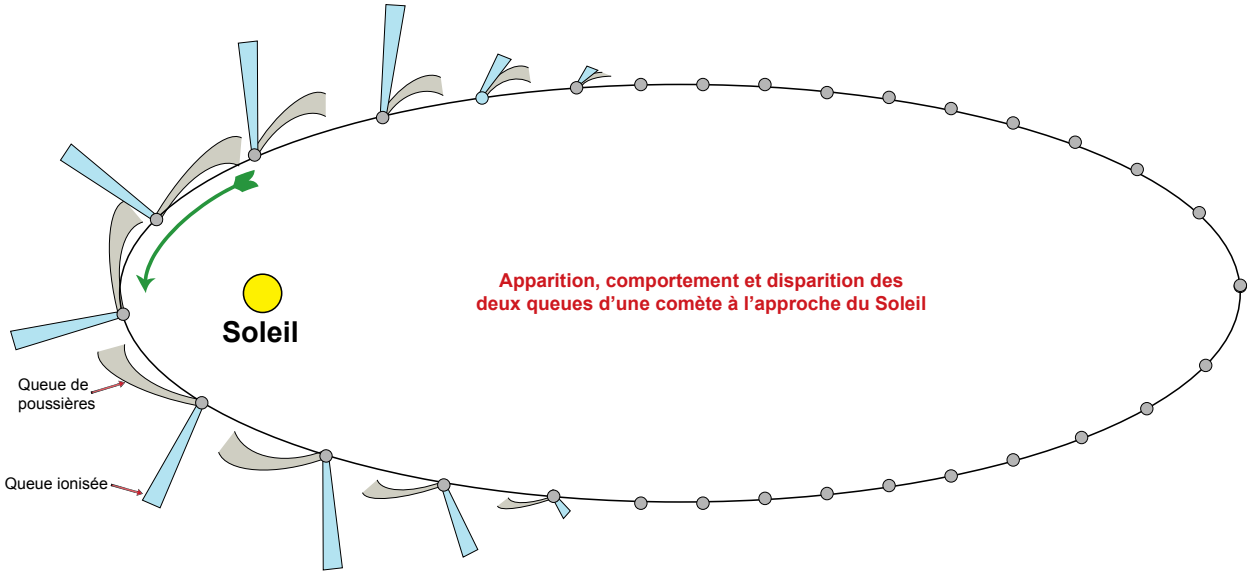
1 – Une coiffe, ou chevelure (ou coma) qui forme un halo à peu près sphérique entourant le noyau et constitué de particules neutres de gaz et de poussières issus de ce noyau. Ces particules sont libérés sous forme de jets lorsque la comète se rapproche du soleil, provoquant la sublimation des glaces du noyau. Cette chevelure est entourée d'un nuage d'hydrogène atomique produit par photodissociation d'un certain nombre d'éléments, principalement H_2O et OH.

2 – Des queues : *(en général on ne voit que les deux premières)*
a – Une queue large (généralement blanchâtre) constituée de poussières poussées par la pression de radiation solaire, et incurvée dans le plan de l'orbite par la gravité du soleil. Quand elle perd de la matière on dit que la comète « dégaze ».

b – Une queue (généralement bleuâtre) constituée d'un plasma, rectiligne et se maintenant à l'opposé du Soleil (comme une ombre), poussée à haute vitesse (de l'ordre de 500 km/s) par le vent solaire; les changements de polarité du vent solaire produisent des ruptures dans la queue de plasma qui se reconstitue dans les heures qui suivent.

c – Une troisième enveloppe, invisible avec des instruments optiques, mais décelée grâce à la radioastronomie, est la queue d'hydrogène qui s'étend sur des dimensions considérables.

d – Une anti-queue, (pratiquement invisible) constituée de gros grains qui, par effet de perspective lorsque la Terre traverse le plan de l'orbite cométaire, semble pointer vers le Soleil. Les dimensions des queues sont gigantesques : des longueurs de 30 à 80 millions de kilomètres sont relativement fréquentes.



La comète Hyakutake

La comète Hyakutake

Très petite comète (noyau de 2 à 3 km de diamètre), elle est passée près de la Terre (15 millions de km) en 1996. Elle a été visible peu de temps, mais intensément. On a pu vérifier que sa queue ionisée (bleue) s'étendait sur près de 500 millions de km ! Elle avait une période orbitale de 17.000 ans mais, perturbée par son dernier passage, elle ne devrait pas revenir avant environ 70.000 ans.

La comète Lovejoy (2014) - Période initiale de 11.000 ans, ramenée à 8.000 ans après son dernier passage

Noyau de la comète de Halley (1986)

La comète MacNaught (2006-2007) est curieuse : elle a déployé une sublime queue courbe lors de son passage près du Soleil. On hésite entre deux hypothèses à son sujet : 1) C'est une comète normale, à très longue période parabolique (92.000^{+} ans) avec une excentricité proche de 1. Ou bien, 2) c'est une comète dont l'excentricité dépasse 1, donc ce ne serait plus une comète périodique, car dotée d'une trajectoire hyperbolique. Dans ce dernier cas elle ressortira du système solaire pour ne jamais plus revenir.

Récemment, on a vu le passage de la comète C/2022 E3 (ZTF) en janvier/février 2023. C'est une comète venue de tellement loin qu'on pense qu'il s'agit probablement d'une comète hyperbolique, qui ne devrait pas revenir pas dans le système solaire, étant dotée d'une excentricité supérieure à 1.

Comète Néowise C/2020 F3 – 19 juillet 2020 par François Doffin du GAP47
Elle est repartie vers le lointain nuage de Oort d'où elle ne devrait revenir que dans 6.800 ans

La comète Swift-Tuttle, origine des Perséides

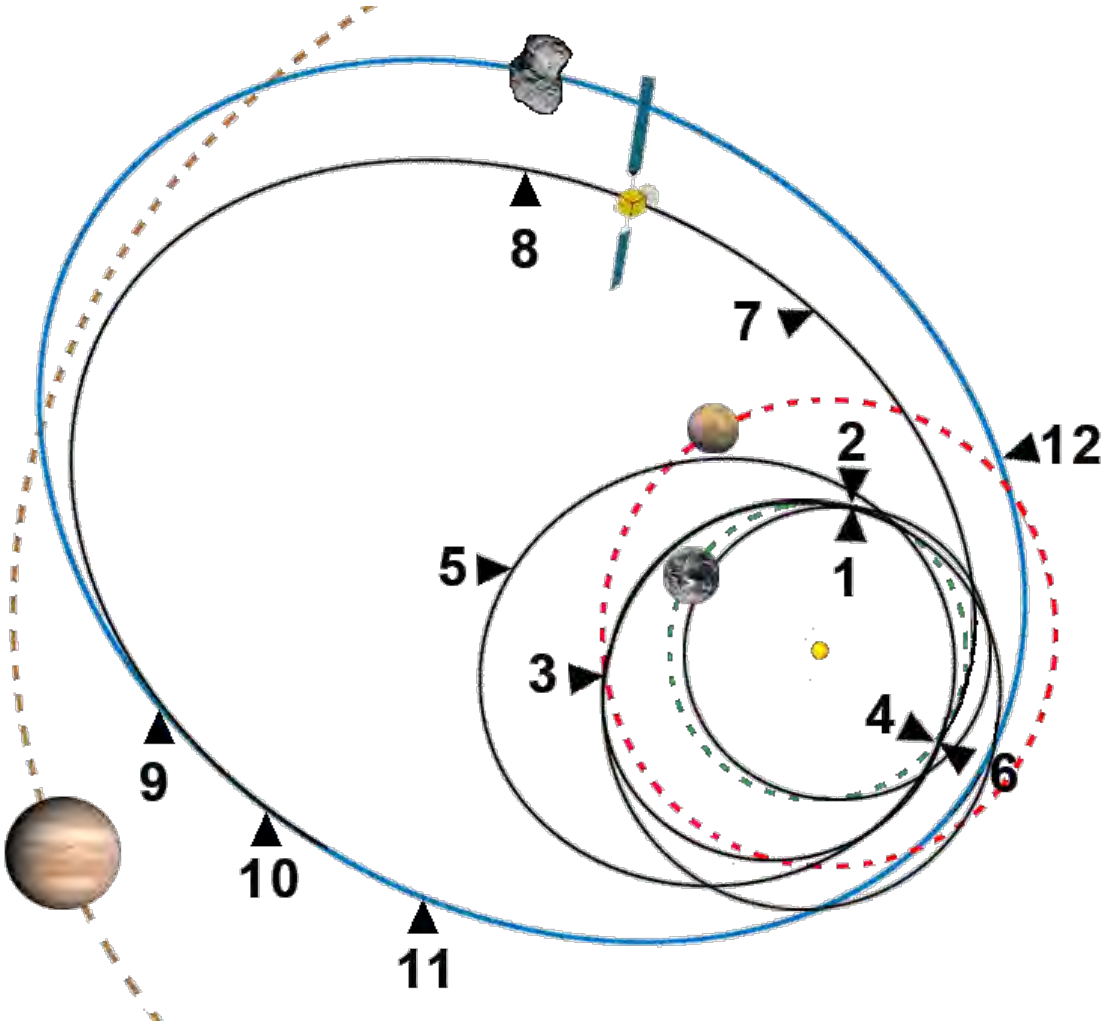
L) La sonde cométaire Rosetta et la comète 67/P Tchourioumov-Guérassimenko

A la fin des années 1990, l'agence Spatiale Européenne (ESA) décide d'envoyer une sonde se mettre en orbite autour d'une très petite comète, d'y déposer un atterrisseur et d'effectuer un maximum d'analyses pour mieux comprendre la nature et la composition des comètes.

La sonde *Rosetta* a été lancée par une fusée Ariane 5 G+ le 2 mars 2004 en direction de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko. Pour se placer sur une orbite identique à celle de la comète, la sonde spatiale a recours à quatre reprises à l'assistance gravitationnelle de la Terre et de Mars. Durant son périple, la sonde spatiale survole 2 astéroïdes (Šteins et Lutetia). Rosetta est ensuite mise en sommeil pendant 31 mois afin de réduire la consommation d'énergie durant la phase de sa trajectoire où elle se trouve la plus éloignée du Soleil. La sonde spatiale est réactivée en janvier 2014 puis se place sur une orbite identique à celle de la comète à moins de 100 kilomètres de celle-ci. Le 6 août 2014 la sonde spatiale débute les manœuvres devant la mener à son orbite finale autour de Tchourioumov-Guérassimenko. La mission de Rosetta est d'étudier, à l'aide des 21 instruments scientifiques embarqués sur l'atterrisseur et l'orbiteur, le lien qui existe entre les comètes et la matière interstellaire et le rôle joué par les comètes dans la formation du Système solaire. Les mesures effectuées par la sonde lorsqu'elle aura atteint la comète portent sur :

- les principales caractéristiques du noyau, son comportement dynamique, la composition et la morphologie de sa surface;
- la composition chimique, minéralogique et isotopique des matériaux volatils et solides du noyau;
- les caractéristiques physiques et les interactions entre les matériaux volatils et solides du noyau;
- le déroulement de l'activité de la comète (dégazage) et les processus à la surface et dans la chevelure (interactions entre la poussière et les gaz).

L'atterrisseur *Philae* s'est posé le 12 novembre 2014 sur le noyau de la comète pour étudier in situ les caractéristiques de celui-ci à l'aide des 10 instruments scientifiques dont il dispose.

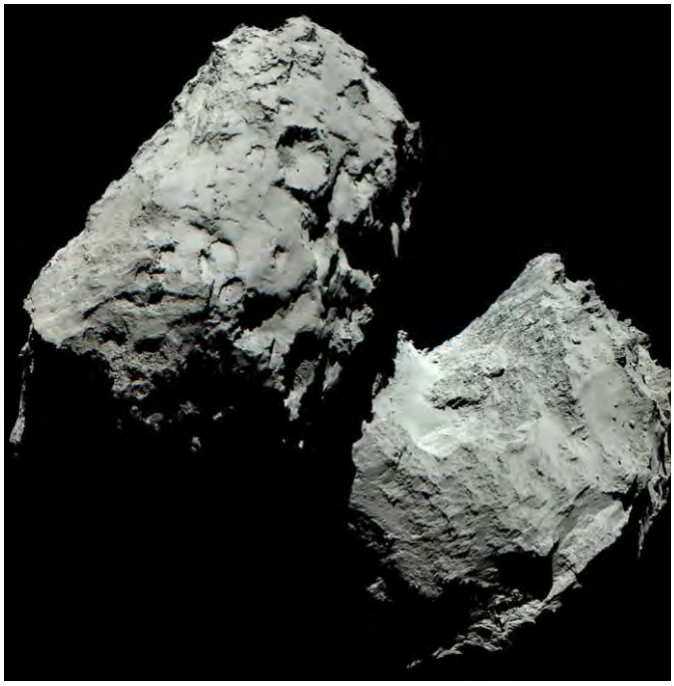


Déroulement de la mission Rosetta / Philæ :

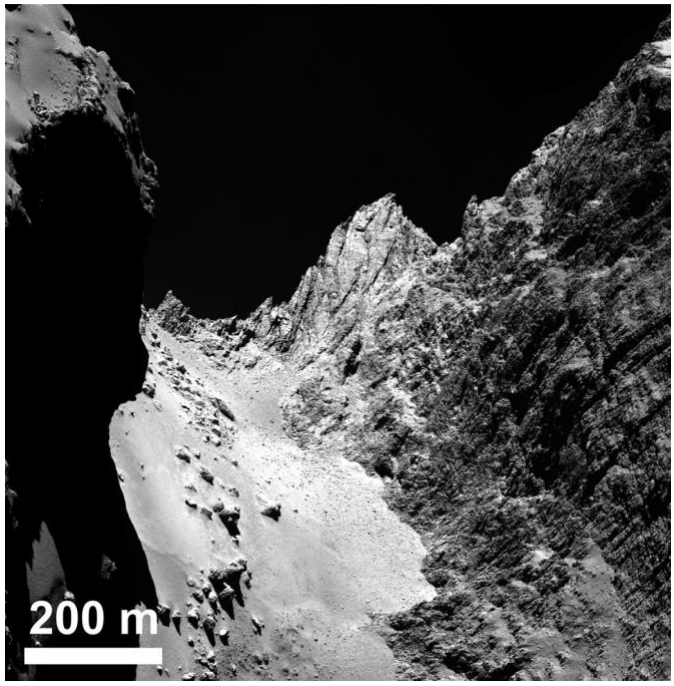
1. *mars 2004 : lancement de Rosetta*
2. *mars 2005 : première assistance gravitationnelle de la Terre*
3. *février 2007 : assistance gravitationnelle de Mars*
4. *novembre 2007 : deuxième assistance de la Terre*
5. *septembre 2008 : survol de l'astéroïde Šteins*
6. *novembre 2009 : 3ème et dernière assistance gravitationnelle de la Terre*
7. *juillet 2010 : rendez-vous avec l'astéroïde 21 Lutetia*
8. *juillet 2011 : mise en sommeil de la sonde*
9. *janvier 2014 : réactivation de la sonde*
10. *aout 2014 : mise en orbite autour de la comète*
11. *novembre 2014 : atterrissage Philæ à la surface de la comète*
12. *30 septembre 2016 : fin de la mission*

Après avoir parcouru plus de 600 millions de km en une dizaine d'années, la sonde Rosetta s'est mise en orbite autour de la comète 67/P Tchouryoumov-Guérassimenko, familièrement surnommée « Tchouri ». Exploit très difficile à réaliser car l'attraction gravitationnelle de ce tout petit corps (moins de 5 x 3 km) est extrêmement faible. Après quelques mois en orbite autour de la comète, Rosetta a largué l'atterrisseur Philæ qui devait se poser en douceur sur la comète en novembre 2014. L'approche se passe bien, mais l'atterrissage, qui devait donner lieu un amarrage avec des harpons pour plaquer Philæ au sol se passe mal : les harpons n'ont pas fonctionné et Philæ a rebondi 3 fois avant de s'encastrer dans une faille où ses panneaux solaires ne recevaient pas assez de lumière pour se recharger. Des résultats ont quand même été obtenus via Rosetta et Philæ (qui a fonctionné 60 heures) et ont fait considérablement avancer nos connaissances sur les comètes. La mission a pris fin avec la dépose de Rosetta sur Tchouri le 30/09/2016.

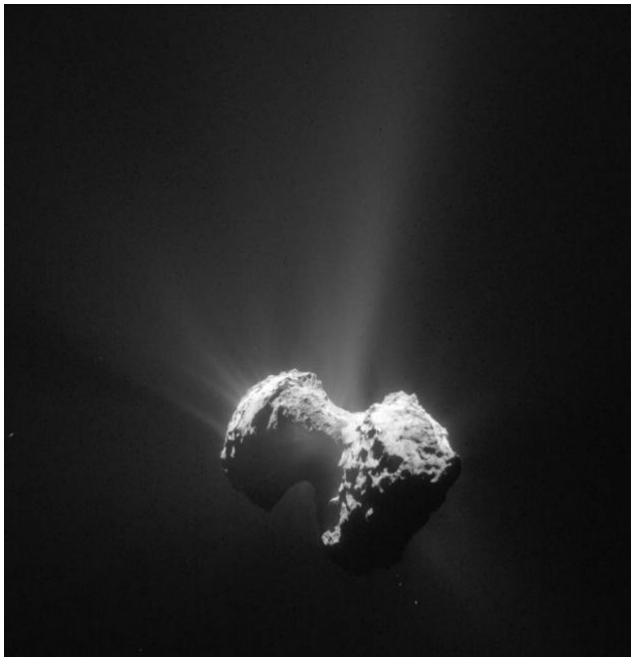
La comète 67/P Tchourioumov-Guérassimenko



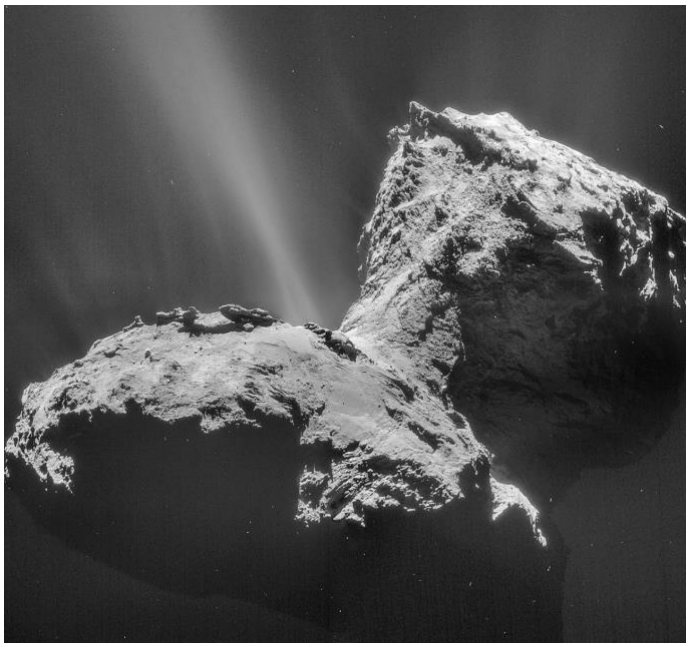
Autre vue de la comète et de ses deux lobes

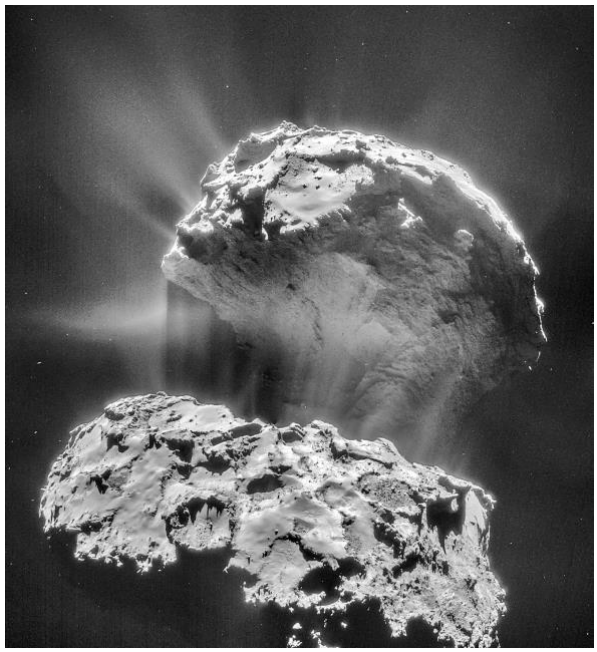


Des reliefs très accidentés par endroits



En s'approchant du Soleil, la comète chauffe et commence à « dégazer » poussières et gaz





Dégazage de plus en plus intense à proximité du Soleil, avant de repartir dans le vide glacé…

Résultats de la mission :

Premier enseignement : les comètes ne sont pas des « boules de neige sales », comme on le pensait. On a trouvé sur Tchouri des oxydes de carbone et des molécules organiques comme le méthane et l'ammoniac, ainsi qu'un acide aminé, la glycine, premier élément constitutif des protéines, véritables briques élémentaires du vivant. Ces découvertes renforcent la possibilité que les constituants du vivant aient pu exister avant la formation des planètes.

Deuxième apport de la mission : l'eau présente sur la comète n'a pas la même structure moléculaire que celle qu'on trouve dans nos océans. Jusque-là, les scientifiques privilégiaient l'hypothèse que notre eau provenait des comètes s'écrasant contre la Terre. La découverte de Rosetta ne remet pas totalement en cause cette version. Mais pour valider l'origine extraterrestre de l'eau, il faudra donc se tourner vers d'autres familles de comètes, ou vers les astéroïdes.

Enfin : la sonde a repéré de l'oxygène moléculaire (O_2) en quantité importante sur Tchouri. Une «surprise totale» pour les scientifiques puisqu'il s'agit de la première découverte jamais enregistré de dioxygène dans une comète. Celui-ci est par ailleurs plus âgé que notre système solaire, ce qui oblige à revoir le mécanisme de la formation de ce dernier.

La mission Rosetta/Philæ a été une prouesse technique extraordinaire qui a consisté à se mettre en orbite autour d'une comète de 5 x 3 km et y poser un atterrisseur (même si cette phase a plutôt été un semi-échec) après un voyage de plus de 600 millions de km ! D'autre part les enseignements scientifiques sur la composition de cette comète ont également été très riches. Après comparaison entre « Tchouri » et la composition d'autres comètes (mesurées à distance), nous avons appris que les comètes sont très différentes les unes des autres ; par exemple, la glace d'eau qu'on trouve sur les comètes peut avoir des compositions chimiques qui varient énormément.

M) Comètes et étoiles filantes, radiant, météores, bolides, etc.

D'où viennent les étoiles filantes ?
Ce ne sont pas, comme le disent certains enfants, la mort d'une étoile (une vraie)
Ce ne sont pas, généralement, des météorites qui traversent notre atmosphère (on se rapproche de la vérité)

C'est quand la Terre passe (sur son orbite) dans les débris issus de la queue d'une comète que vont se produire des étoiles filantes, provoquées par l'entrée de ces débris dans l'atmosphère terrestre : ces débris (de la taille d'un grain de sable à celle d'un petit pois) vont brûler en rentrant dans l'atmosphère à près de 70 km/s. Les étoiles filantes n'ont rien à voir avec des astéroïdes ou des météorites. Il y a des moments dans l'année terrestre où la Terre va passer à un endroit où une comète a laissé des débris. Comme la Terre passe au même endroit tous les ans à la même date, on peut prédire des « pics » dans le nombre d'étoiles filantes. La période la plus connue (mais il y en a d'autres) est celle qui va environ du 23 juillet au 20 août (maximum 12/13 août). On appelle cela les « Perséides » car le « radiant » (l'endroit d'où semblent venir ces étoiles filantes) est la constellation de Persée. Cette période correspond aux débris laissés par la comète Swift-Tuttle découverte en 1862. Elle est repassée en 1995 et ne repassera pas avant juillet 2126.

Au cours de l'année, on peut observer de nombreuses pluies d'étoiles filantes. Outre les Pérséides on a aussi d'autres périodes de l'année avec des phénomènes similaires. Ainsi, par exemple :

- les **Quadrantides** sont visibles dans les premiers jours de janvier ;
- les **Orionides** - poussières de la célèbre comète de Halley - s'observent plutôt lors de la deuxième quinzaine d'octobre ;
- les **Léonides** traversent le ciel fin novembre.

D'où leur viennent donc ces noms ? Tout simplement de la constellation dont elles semblent être issues : les Quarantides semblent venir de la constellation du Bouvier (qui s'appelait anciennement le Quadrant), les Léonides semblent venir de la constellation du Lion et les Orionides semblent venir de la constellation d'Orion !

A chaque passage dans ces débris la Terre « nettoie » un peu les particules de la comète, ce qui fait qu'il y aura de moins en moins d'étoiles filantes des perséides au fil des années… jusqu'à ce que la comète repasse près de nous, mais rien ne dit qu'elle repassera au même endroit, les orbites des comètes étant souvent modifiées par les perturbations gravitationnelles provoquées par les planètes (essentiellement Jupiter) et surtout par le Soleil.

Rappelons d'abord la signification précise de quelques mots, dont trois sont proches les uns des autres, mais de sens très différents : **Météoroïde**, **Météore**, **Bolide** et **Météorite**.
L'Union Astronomique Internationale les a définis très précisément :

a) un **météoroïde** est un objet céleste dont la masse est comprise entre 10^{-9} et 10^{8} kg avec un diamètre inférieur à 1 mètre, qui circule à plus de 85 km d'altitude au-dessus de la Terre. La fourchette est large car la masse est donc comprise entre 1 milliardième de kg (ou un millionième de gramme) et 100 millions de kg (ou 100.000 tonnes). Ces objets viennent presque toujours des comètes ou des astéroïdes.

b) un **météore** n'est pas un objet, mais seulement le phénomène lumineux qu'un objet provoque en entrant dans l'atmosphère. Un météoroïde entrant dans l'atmosphère engendrera une traînée lumineuse appelée météore entre 50 et 85 km d'altitude.

c) un **bolide** n'est pas non plus un objet, c'est un météore dont la trace lumineuse très importante de magnitude inférieure à -4 (identique ou supérieure à celle de Vénus), entre 12 et 80 km d'altitude, avec ou sans explosion (airburst) dans l'atmosphère. Le météoroïde à l'origine de cet objet est de taille plus importante que ce qui provoque une simple étoile filante.

d) une **météorite** est seulement la partie (ou les parties) d'un météoroïde qui percute le sol de la Terre. Un gros météoroïde, en entrant dans l'atmosphère, va se réchauffer considérablement. Il pourra disparaître complètement ou se briser (ou pas) en plusieurs morceaux plus petits. La ou les météorites sont exclusivement la (ou les) partie(s) du météoroïde qui arrive(nt) au sol.

Une **étoile filante** est le phénomène lumineux qui accompagne l'entrée dans l'atmosphère d'un corps appelé météoroïde. Il s'agit d'un petit corps circulant dans l'espace à une vitesse pouvant atteindre 42 km/s dans un référentiel lié au Soleil, lorsque son orbite croise celle de la Terre. Cette traînée lumineuse est causée par la vaporisation du corps et l'ionisation de l'air sur sa trajectoire, le météoroïde laissant derrière lui un sillage de gaz très chaud, ionisé et lumineux que l'on nomme un plasma. L'échauffement à l'origine du plasma est principalement dû à la compression de l'atmosphère en avant du corps supersonique et non à la friction.

L'étoile filante est due à une fine poussière cosmique qui est vaporisée entièrement avant d'atteindre le sol tandis que le bolide (causé par un météoroïde de masse et taille importantes) est perçu comme un disque lumineux intense lors de la rentrée atmosphérique du météoroïde, lequel peut se fragmenter ou atteindre le sol, devenant dans ce dernier cas une (ou plusieurs) météorite(s).

Les essaims ou pluies d'étoiles filantes.

C'est quand la Terre passe (sur son orbite) dans les débris issus de la queue d'une comète que vont se produire des étoiles filantes, provoquées par l'entrée de ces débris dans l'atmosphère terrestre : ces débris (de la taille d'un grain de sable à celle d'un petit pois) vont brûler en rentrant dans l'atmosphère à des vitesses allant de 11 à 72 km/s, vitesses hypersoniques supérieures à Mach 5. Sauf exceptions, les étoiles filantes n'ont généralement rien à voir avec des astéroïdes. Il y a des moments dans l'année terrestre où la Terre va passer à un endroit où une comète a laissé des débris. Comme la Terre passe au même endroit tous les ans à la même date, on peut prédire des « pics » dans le nombre d'étoiles filantes. Ces étoiles filantes semblent provenir d'un même point dans le ciel, **le radiant**.

La pluie d'étoiles filantes la plus connue (mais il y en a d'autres) est celle qui va environ du 23 juillet au 20 août (maximum 12/13 août). On appelle cela les « Perséides » car le « radiant » (l'endroit d'où semblent venir ces étoiles filantes) se situe dans la constellation de Persée. Cette période correspond aux débris laissés par la comète Swift-Tuttle découverte en 1862. Elle est repassée en 1995 et ne repassera pas avant juillet 2126. A chaque passage dans ces débris la Terre « nettoie » un peu les particules de la comète, ce qui fait qu'il y aura de moins en moins d'étoiles filantes dans les perséides au fil des années… jusqu'à ce que la comète repasse près de nous, mais rien ne dit qu'elle repassera au même endroit, les orbites des comètes étant souvent modifiées par les perturbations gravitationnelles provoquées par les planètes (essentiellement Jupiter) et surtout par le Soleil.

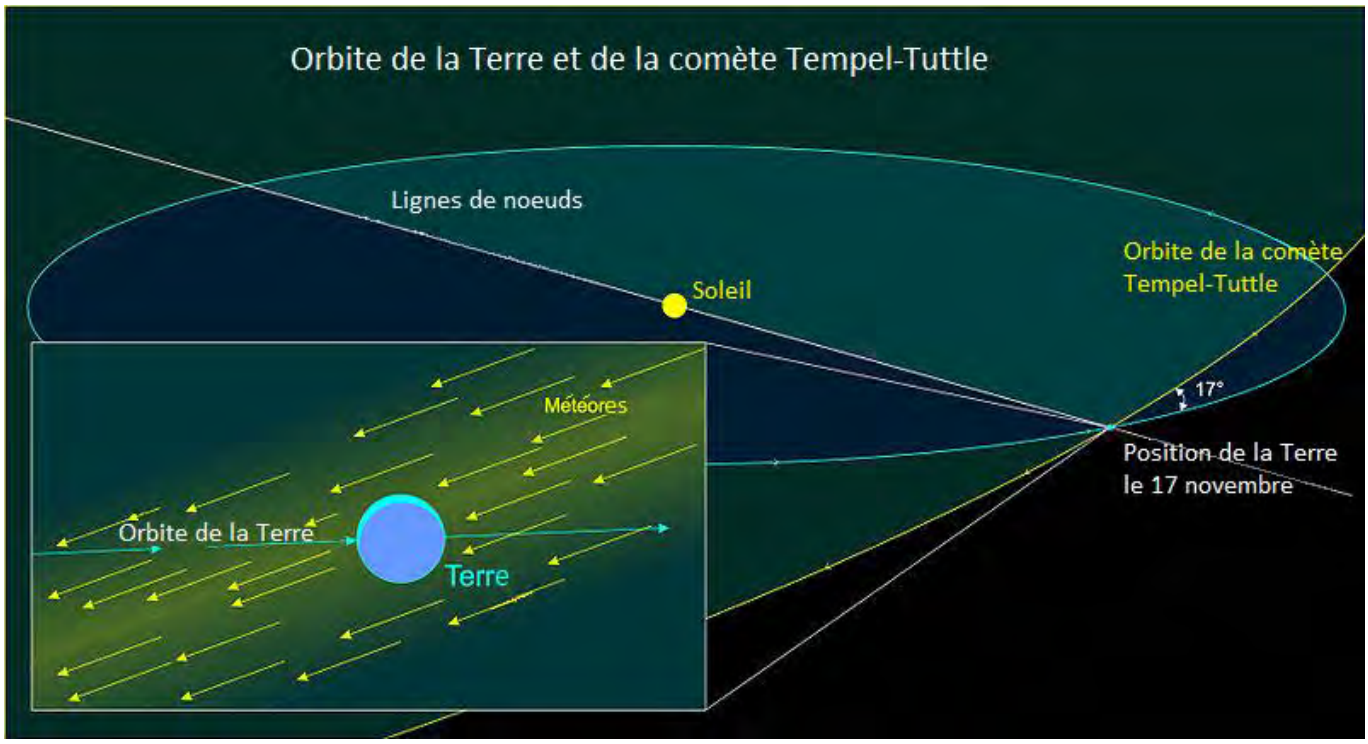
On recense plusieurs dizaines d'essaims (environ 75 dans l'année). Les noms de ces pluies d'étoiles filantes sont majoritairement dérivés de la constellation où se trouve leur radiant. Chaque essaim se produit chaque année à la même période avec une intensité variable.

Quelques essaims de météoroïdes

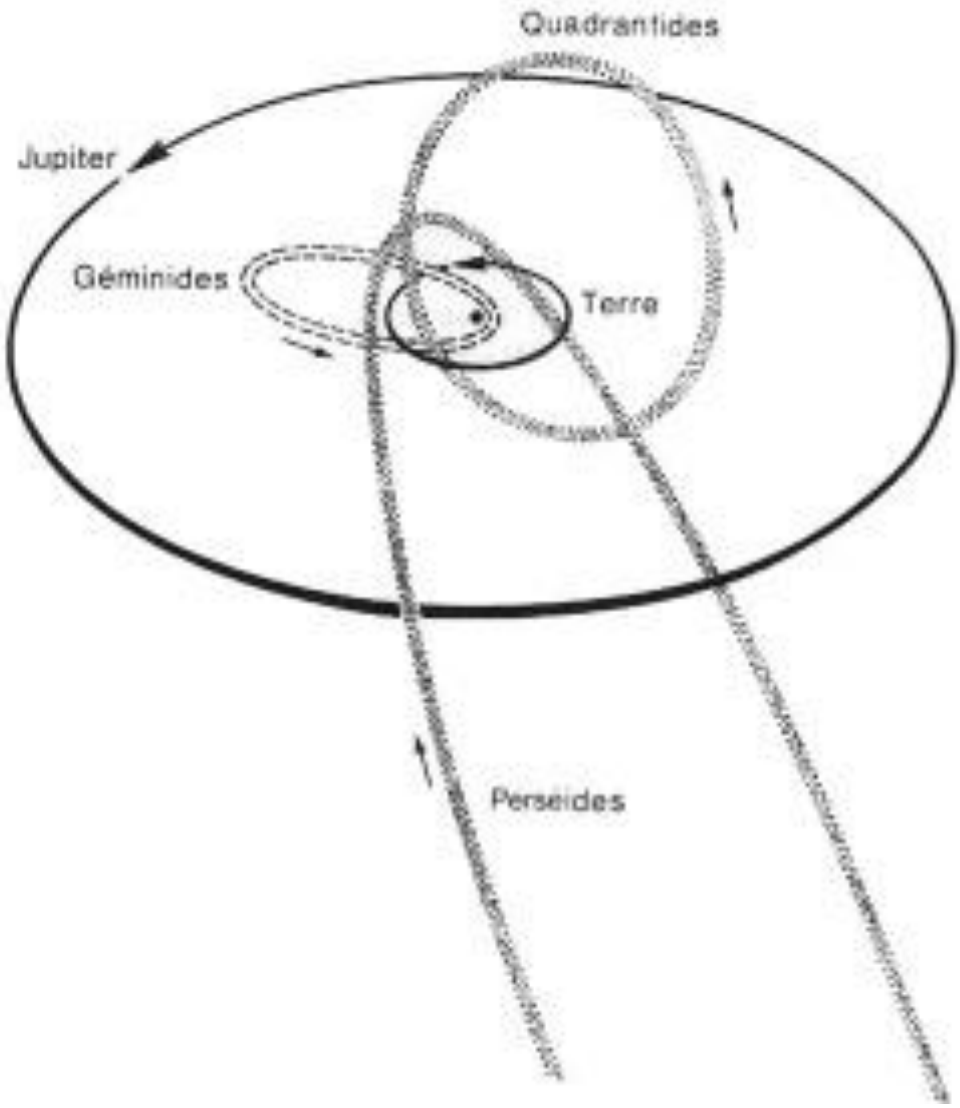
Nom	Dates	Pic	Ascension Droite	Déclinaison	Vitesse (km/s)	nbr/h	Intensité
Quadrantides	1er-5 janvier	03-janv	15° 20'	+49°	41	120	Intense
Lyrides	15-28 avril	22-avr	18° 04'	+34°	49	15	Intense
Êta aquarides	19 avril-28 mai	06-mai	22° 32'	-01°	66	60	Intense
Perséides	17 juillet-24 août	12-août	03° 04'	+58°	59	90	Intense
Orionides	2 octobre-7 novembre	21-oct	06° 20'	+16°	66	20	Intense
Léonides	14 novembre-21 novembre	17-nov	10° 12'	+22°	71	Variable	Irrégulière
Géminides	7 décembre-17 décembre	14-déc	07° 28'	+33°	35	120	Intense
Ursides	17 décembre-26 décembre	22-déc	14° 28'	+76°	33	10	Intense

(Les Géminides sont une exception. Ces pluies ne sont pas causées par une comète, mais par l'objet (3200) Phaéton, qu'on estime faire partie de la famille d'astéroïdes Apollon)

Ainsi, par exemple, la pluie de météores des Léonides se produit quand la Terre traverse l'orbite de la comète 55P/Tempel–Tuttle et que les débris suivant cette comète sont des météoroïdes qui se subliment et entrent dans l'atmosphère de la Terre.



Lors d'une pluie de météores, on peut apercevoir typiquement entre 5 et 50 météores en une heure. Ces météores sont dus aux météoroïdes qui entrent dans l'atmosphère à la même vitesse (qui varie de 11 à 72 km/s). Le phénomène peut durer de quelques heures à plusieurs jours, et revient habituellement annuellement.



Trajectoires des 2 comètes qui provoquent les pluies d'étoiles filantes (Perséides et Quadrantides) et de l'astéroïde (3200) Phaeton qui provoque les Géminides.

Les météores ne proviennent pas toujours nécessairement d'un essaim. Il arrive aussi que des météores dits « sporadiques » surviennent. Ce sont des météores isolés qui ne sont pas reliés à un nuage cométaire.

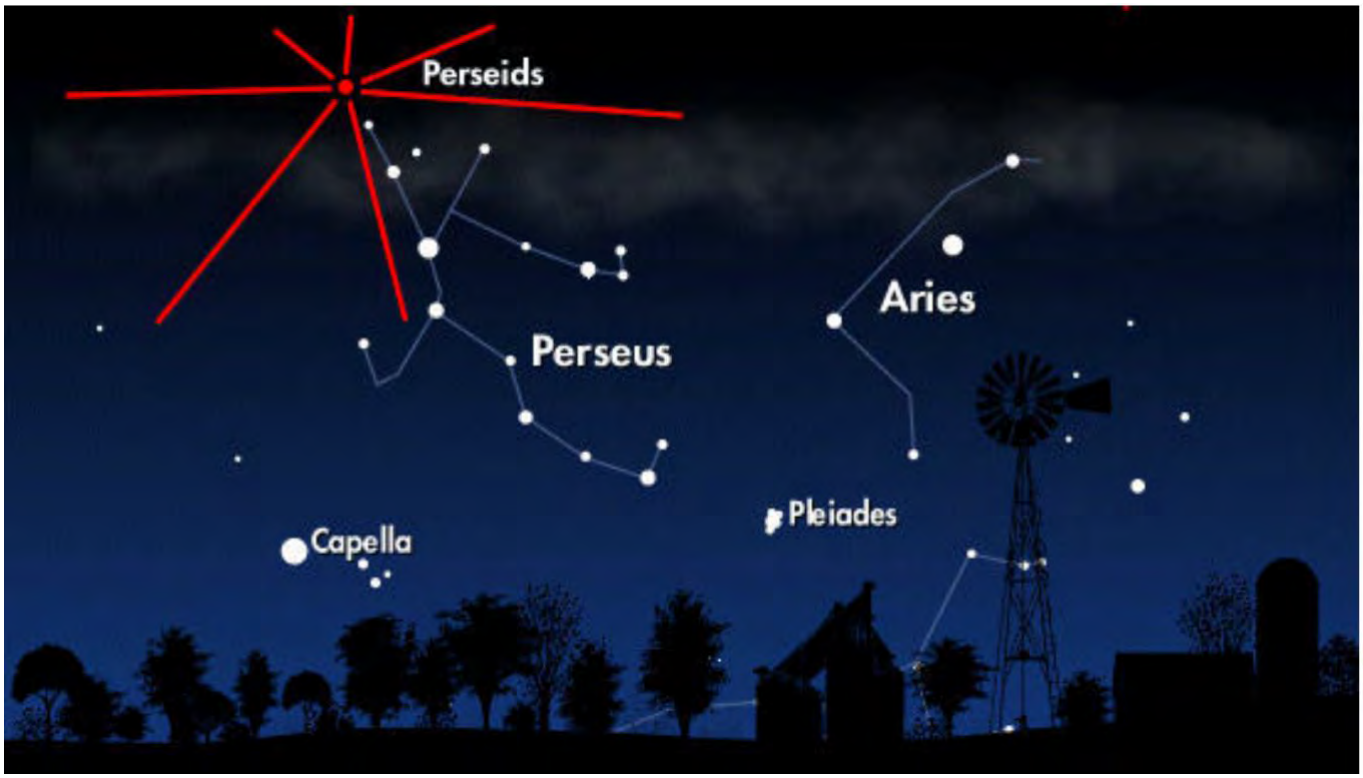
La vitesse à laquelle les débris de comètes entrent dans l'atmosphère terrestre est très variable car elle dépend de trois paramètres :

1. La vitesse de la comète originaire des débris (autour de 30 à 50 km/s), lesquels ont environ la même vitesse et la même direction que celles de la comète.
2. La vitesse de la Terre dans son orbite annuelle autour du Soleil (en moyenne 30 km/s).
3. Dans un référentiel commun en 3D (par exemple celui du Soleil), la direction des débris cométaires par rapport à la direction de la Terre au moment de la rencontre.

Si les débris sont dans la direction directement opposée à celle de la Terre, les vitesses vont d'additionner. S'ils sont dans la même direction elles vont se soustraire. Enfin si les débris et la Terre viennent de directions différentes (une infinité de possibilités) les vitesses vont s'agréger en fonction de leurs vitesses propres et surtout en fonction de l'angle d'attaque entre la direction des débris et celle de la Terre.

Le radiant

Radiant est un terme d'astronomie désignant le point de la voûte céleste d'où, par un effet d'optique dû à la perspective, l'essentiel des « étoiles filantes » provenant d'un même essaim semble venir. Habituellement, lorsque ce point est situé dans une constellation, l'essaim prend un nom dérivant de cette dernière. Ainsi, par exemple, le radiant de l'essaim des Orionides se situe dans (ou près) de la constellation d'Orion.



Radiant des Perséides

Le fait que tous les météores d'un essaim semblent provenir d'un même point de la voûte céleste est dû au même effet d'optique que l'illusion que l'on a, dans une voiture roulant vite sous la pluie ou la neige, de voir l'ensemble des gouttes de pluie ou des flocons de neige provenir d'un point situé exactement dans la direction où la voiture se déplace. Autrement dit, il s'agit du point de fuite associé à la direction d'arrivée des météoroïdes, relative à la Terre. Dans le cas d'une pluie d'étoiles filantes, cet effet d'optique est donc lié au mouvement de la Terre qui rencontre sur sa trajectoire l'essaim de grains de poussière qui leur donne naissance.

Plus précisément, cette poussière continue son chemin dans la direction du parcours de la comète et, lorsque la Terre se déplace au travers de ces débris, une pluie de météores en résulte. Puisque tous les débris se déplacent à peu près dans la même direction, les météores générés par les météoroïdes qui entrent en collision avec l'atmosphère « pointent » tous, plus ou moins, dans la direction de la trajectoire de la comète.

Quelques “pluies d’étoiles filantes” avec leurs radiants bien visibles :

Les Perséides

Les Géminides

Les Orionides

Essaims météoritiques observés jusqu'à septembre 2015									
#	Nom	Dates	Pic	Ascension droite	Déclinaison	Vitesse (km/s)	THZ (/h)	Intensité	Corps parent
1	Quadrantides	1er janvier - 5 janvier	03-janv	15° 20'	+49°	41	120	Intense	(196256) 2003 EH1
2	Gamma vélides	1er janvier - 15 janvier	05-janv	08° 20'	−47°	35	2	Faible	
3	Alpha crucides	6 janvier - 28 janvier	15-janv	12° 48'	−63°	50	3	Faible	
4	Delta cancrides	1er janvier - 31 janvier	17-janv	08° 40'	+20°	28	4	Moyenne	Inconnu ; peut-être 2001 YB5
5	Alpha hydrides	5 janvier - 14 février	19-janv	08° 52'	−11°	44	2	Faible	
6	Alpha carinides	24 janvier - 9 février	30-janv	06° 20'	−54°	25	2	Faible	
7	Delta vélides	22 janvier - 21 février	05-févr	08° 44'	−52°	35	1	Faible	
8	Alpha centaurides	28 janvier - 21 février	07-févr	14° 00'	−59°	56	6	Moyenne	
9	Omicron centaurides	31 janvier - 19 février	11-févr	11° 48'	−56°	51	2	Faible	
10	Thêta centaurides	23 janvier - 12 mars	21-févr	14° 00'	−41°	60	4	Faible	
11	Léonides de février	1er février - 28 février	multiple	11° 00'	+06°	30	5	Moyenne	
12	Delta léonides	15 février - 10 mars	24-févr	11° 12'	+16°	23	2	Moyenne	
13	Gamma normides	25 février - 22 mars	13-mars	16° 36'	−51°	56	8	Moyenne	
14	Virginides	1er mars - 15 avril	multiple	13° 00'	−04°	30	5	Moyenne	
15	Delta pavonides	11 mars - 16 avril	30-mars	13° 00'	−05°	31	5	Faible	
16	Alpha capricornides d'avril	07-avr	07-avr						
17	Librides	15 avr - 30 avr	multiple	15° 12'	−18°	30	5	Moyenne	
18	Lyrides	15 avr - 28 avr	22-avr	18° 04'	+34°	49	15	Intense	C/1861 G1 (Thatcher)
19	Pi puppides	15 avr - 28 avr	23-avr	07° 20'	−45°	18	Variable	Irrégulière	26P/Grigg-Skjellerup
20	Alpha bootides	14 avr - 12 mai	28-avr	14° 32'	+19°	20	2	Faible	
21	Mu virginides	1er avr - 12 mai	29-avr	15° 08'	−07°	30	2	Faible	
22	Oméga capricornides	19 avr - 15 mai	02-mai	21° 00'	−22°	50	2	Faible	
23	Êta aquarides	19 avr - 28 mai	06-mai	22° 32'	−01°	66	60	Intense	1P/Halley
24	Alpha scorpiides	1er mai-31 mai	16-mai	16° 12'	−21°	35	5	Moyenne	
25	Bêta Corona austrinides	23 avr - 30 mai	16-mai	18° 56'	−40°	45	3	Faible	
26	Camélopardalides de mai	24-mai	24-mai						209P/LINEAR
27	Oméga Scorpiides	23 mai - 15 jun	02-juin	15° 56'	−20°	21	5	Faible	
28	Ariétides	22 mai - 2 jul	07-juin	02° 56'	+24°	38	54	Faible	peut-être (1566) Icare ou 96P/Machholz
29	Sagittarides	1er jun - 15 jul	19-juin	18° 16'	−23°	30	5	Moyenne	
30	Tau cétides	18 jun - 4 jul	27-juin	01° 36'	−12°	66	4	Faible	
31	Bootides de juin	28 jun - 28 jun	28-juin	14° 36'	+49°	14	Variable	Irrégulière	7P/Pons-Winnecke
32	Tau aquarides	19 jun - 5 jul	28-juin	22° 48'	−12°	63	7	Faible	
33	Thêta ophiuchides	4 jun - 15 jul	29-juin	16° 36'	−15°	29	2	Faible	
34	Pégasides de juillet	7 jul - 13 jul	10-juil	22° 40'	+15°	70	3	Moyenne	
35	Phoenicides de juillet	10 jul - 16 jul	13-juil	02° 08'	−48°	47	Variable	Irrégulière	
36	Alpha cygnides	11 jul - 30 jul	18-juil	20° 20'	+47°	37	2	Faible	
37	Sigma capricornides	15 jul - 11 aoû	20-juil	20° 28'	−15°	30	5	Faible	
38	Pisces austrinides	15 jul - 10 aoû	28-juil	22° 44'	−30°	35	5	Moyenne	
39	Delta aquarides du Sud	12 jul - 19 aoû	28-juil	22° 36'	−16°	41	20	Intense	
40	Gamma draconides de juillet	?	28-juil						Inconnu
41	Alpha capricornides	3 jul - 15 août	30-juil	20° 28'	−10°	23	4	Moyenne	45P/Honda-Mrkos-Pajdusakova
42	Iota aquarides du Sud	25 jul - 15 aoû	04-août	22° 16'	−15°	34	2	Moyenne	
43	Delta aquarides du Nord	15 jul - 25 aoû	08-août	22° 20'	−05°	42	4	Moyenne	
44	Perséides	17 jul - 24 aoû	12-août	03° 04'	58	59	90	Intense	109P/Swift-Tuttle
45	Kappa cygnides	3 aoû - 25 aoû	17-août	19° 04'	59	25	3	Moyenne	
46	Iota aquarides du Nord	11 aoû - 31 aoû	20-août	21° 48'	−06°	31	3	Moyenne	
47	Pi éridanides	20 aoû - 5 sep	25-août	03° 28'	−15°	59	4	Faible	
48	Gamma doradides	19 aoû - 6 sep	28-août	04° 36'	−50°	41	5	Faible	
49	Alpha aurigides	25 aoû - 5 sep	1er sep	05° 36'	+42°	66	10	Moyenne	
50	Perséides de septembre	5 sep - 10 oct	08-sept	04° 00'	+47°	64	6	Moyenne	
51	Ariès-triangulides	9 sep - 16 sep	12-sept	02° 00'	+29°	35	3	Faible	
52	Chi cygnides					Moyenne			
53	Piscides	1er sep - 30 sep	20-sept	00° 32'	00°	26	3	Moyenne	
54	Kappa aquarides	8 sep - 30 sep	20-sept	22° 36'	−02°	16	3	Faible	
55	Camélopardalides d'octobre								
56	Ariétides d'octobre	1er oct - 31 oct	08-oct	02° 08'	+08°	28	5	Moyenne	
57	Draconides	6 oct - 10 oct	08-oct	17° 28'	+54°	20	Variable	Irrégulière	21P/Giacobini-Zinner
58	Delta aurigides	22 sep - 23 oct	10-oct	05° 40'	+52°	64	6	Moyenne	
59	Epsilon géminides	14 oct - 27 oct	18-oct	06° 56'	+27°	71	2	Moyenne	
60	Orionides	2 oct - 7 nov	21-oct	06° 20'	+16°	66	20	Intense	1P/Halley
61	Leo minorides	21 oct - 23 oct	22-oct	10° 48'	+37°	62	2	Faible	
62	Taurides du Sud	1er nov - 25 nov	05-nov	03° 28'	+13°	27	5	Moyenne	2P/Encke
63	Delta éridanides	6 nov - 29 nov	10-nov	03° 52'	−09°	31	2	Faible	
64	Taurides du Nord	1er nov - 25 nov	12-nov	03° 52'	+22°	29	5	Moyenne	2P/Encke
65	Zêta puppides	2 nov - 20 déc	13-nov	07° 48'	−42°	41	3	Faible	
66	Léonides	14 nov - 21 nov	17-nov	10° 12'	+22°	71	Variable	Irrégulière	55P/Tempel-Tuttle
67	Alpha monocérotides	15 nov - 25 nov	21-nov	07° 20'	+03°	60	Variable	Irrégulière	
68	Chi orionides	25 nov - 31 déc	02-déc	05° 28'	+23°	28	3	Moyenne	
69	Phoenicides	28 nov - 9 déc	06-déc	01° 12'	−53°	18	Variable	Irrégulière	
70	Monocérotides	27 nov - 17 déc	09-déc	06° 48'	+08°	43	3	Moyenne	
71	Sigma hydrides	3 déc - 15 déc	12-déc	08° 28'	+02°	58	2	Moyenne	
72	Puppides-vélides	2 déc - 16 déc	12-déc	09° 00'	−46°	40	4	Moyenne	
73	Géminides	7 déc - 17 déc	14-déc	07° 28'	+33°	35	120	Intense	(3200) Phaéton
74	Comae bérénicides de décembre	12 déc - 23 jan	20-déc	11° 04'	+25°	65	5	Moyenne	
75	Ursides	17 déc - 26 déc	22-déc	14° 28'	+76°	33	10	Intense	8P/Tuttle

Pluies de Météores — Liste d'essaims météoritiques

Virginides	Essaims de printemps
Delta pavonides	
Librides	
Lyrides	
Pi puppides	
Alpha bootides	
Mu virginides	
Oméga capricornides	
Êta aquarides	
Alpha scorpiides	
Bêta Corona austrinides	
Camélopardalides de mai	
Oméga Scorpiides	
Ariétides	
Sagittarides	

Tau cétides	Essaims d'été
Bootides de juin	
Tau aquarides	
Thêta ophiuchides	
Pégasides de juillet	
Phoenicides de juillet	
Alpha cygnides	
Sigma capricornides	
Pisces austrinides	
Delta aquarides du Sud	
Alpha capricornides	
Iota aquarides du Sud	
Delta aquarides du Nord	
Perséides	
Kappa cygnides	
Iota aquarides du Nord	
Pi éridanides	
Gamma doradides	
Alpha aurigides	
Perséides de septembre	
Ariès-triangulides	
Piscides	
Kappa aquarides	

Andromédides	Essaims d'automne
Ariétides d'octobre	
Draconides	
Delta aurigides	
Epsilon géminides	
Orionides	
Léo minorides	
Taurides du Sud	
Delta éridanides	
Taurides du Nord	
Zêta puppides	
Léonides	
Alpha monocérotides	
Chi orionides	
Phoenicides/Phénicides	
Monocérotides	
Sigma hydrides	
Puppides-vélides	
Géminides	
Coma bérénicides	
Ursides	
Camélopardalides d'octobre	

Quadrantides	Essaims d'hiver
Gamma vélides	
Alpha crucides	
Delta cancrides	
Alpha hydrides	
Alpha carinides	
Delta vélides	
Alpha centaurides	
Omicron centaurides	
Thêta centaurides	
Léonides de février	
Delta léonides	
Gamma normides	

Table des matières

Préambule : Qu'est ce qu'un petit corps ? 1

I Les astéroïdes 3

A) Les astéroïdes « classiques » 3
1) La ceinture principale d'astéroïdes 4
2) La ceinture de Kuiper 10
Les objets épars 10
3) Le nuage de Oort 15
B) Les satellites « géocroiseurs » 17
C) Les astéroïdes « troyens » 20

II Les « centaures » 24

III Les comètes 31

A) Que sont les comètes ? 32
B) Le noyau cométaire 33
C) La chevelure 34
D) Composition 38
E) Les queues 39
F) Orbites 42
G) Histoire 44
H) Connaissance moderne 45
I) Liste de comètes 49
J) D'où viennent les comètes 50
1) Du système solaire interne 50
2) De la ceinture de Kuiper 51
3) Du nuage de Oort 51
K) Comètes et schémas 53
L) La sonde cométaire Rosetta, 67/P Tchourioumov-Guérassimenko 59
M) Comètes et étoiles filantes, radiant, météores, bolides, etc. 63

IV Annexe 1 : Essaims météoritiques 70

V Annexe 2 : Pluies de météores – Liste d'essaims météoritiques 71

Table des matières 72