8 AUTRES OBJETS DU SYSTÈME SOLAIRE

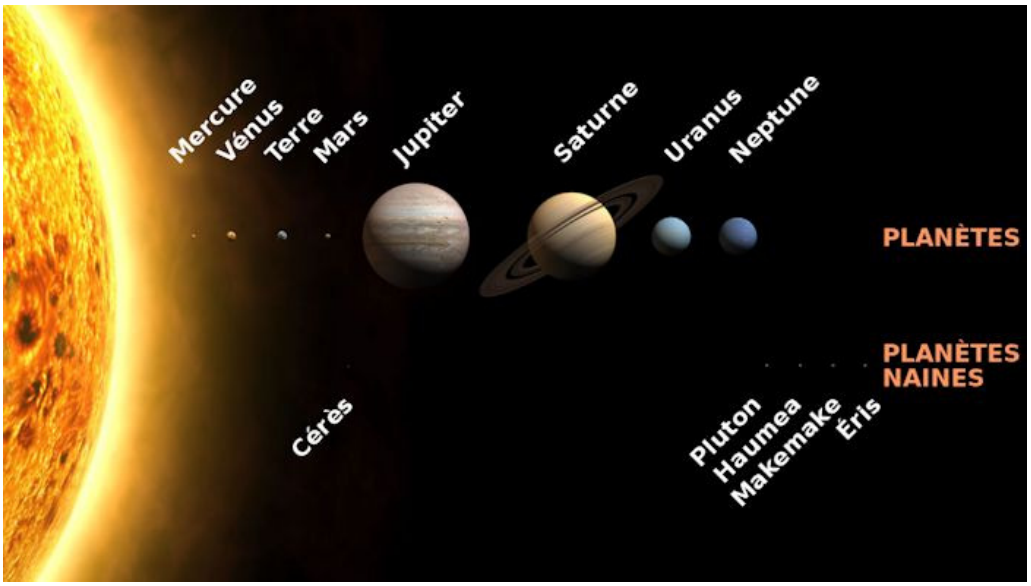
Quelles sont nos chances que la Terre soit détruite par un astéroïde ?

blog.urthecast.com/updates/asteroid-meteor-aftermath-tracking-space-rocks-is-essential-for-humanity/

Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre.

8.1 PLANÈTES NAINES ET PETITS OBJETS

Il n'y a pas que des planètes dans le Système solaire. Il y a aussi 5 planètes naines et une multitude de satellites et de petits objets.



fr.wikipedia.org/wiki/Système_solaire

Pour comprendre la distinction entre ces différentes composantes du Système solaire, voyons comment on les définit.

Définitions

Une **planète…**

- est en orbite autour du Soleil.
- possède une masse suffisante pour que sa propre gravité l'emporte sur les forces de cohésion du corps solide et le maintienne en équilibre hydrostatique. (Ce qui signifie qu'elle est de forme sphérique.)
- a fait une place nette dans son voisinage orbital. (Ce qui signifie qu'il n'y a pas d'autres objets ayant une masse se rapprochant de la masse de la planète sur la même orbite.)

Ce sont les 8 planètes du Système solaire qu'on a examinées au chapitre précédent.

Une **planète naine…**

- est en orbite autour du Soleil.
- possède une masse suffisante pour que sa propre gravité l'emporte sur les forces de cohésion du corps solide et le maintienne en équilibre hydrostatique. (Ce qui signifie qu'elle est de forme sphérique.)

- n'a pas fait une place nette dans son voisinage orbital. (Ce qui signifie qu'il y a un ou plusieurs autres objets ayant une masse se rapprochant de la masse de la planète naine sur la même orbite.)

Pour l'instant, il n'y a que 5 planètes naines officiellement reconnues dans le Système solaire : Cérès, Pluton, Éris, Hauméa et Makemake. Cependant, il y a de nombreux autres corps qui pourraient être classés comme étant des planètes naines quand on pourra confirmer qu'ils ont bien une forme sphérique. Les astronomes parlent souvent de Quaoar, Sedna, Orcus, Gonggong et Salacia comme si elles faisaient partie des planètes naines même s'il n'a pas été démontré qu'elles sont véritablement sphériques.

Les petits objets du système solaire…

- sont en orbite autour du Soleil.
- ne possèdent 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. (Ce qui signifie que le corps n'est pas de forme sphérique.)

On ne spécifie pas de taille minimale officielle, mais un diamètre de 50 m semble s'imposer. Si la taille est inférieure à 50 mètres, on parle plutôt d'un météoroïde.

Les satellites

Les objets en orbite autour d'une planète, d'une planète naine ou d'un petit corps sont des satellites, peu importe leur taille.

Taille minimale pour avoir une forme sphérique

Pour savoir si un objet céleste va prendre une forme sphérique et ainsi devenir une planète ou une planète naine, on doit déterminer si la pression au centre de la planète est suffisante pour déformer la matière. On peut supposer que la densité de la planète est constante et utiliser le résultat de la pression centrale obtenue dans notre modèle du Soleil à densité constante. Cette pression est

$$P_{centre} = \frac{3GM^2}{8\pi R^4}$$

Les matériaux se déforment si la pression dépasse une certaine valeur, appelée la contrainte ultime de compression, qu'on va noter S. Voici la valeur de S pour quelques matériaux.

Matériau	S (Pa)
Fer	4×10^8
Roche	2×10^8
Glace	1×10^7

Pour avoir une forme sphérique, on doit donc avoir

$$\frac{3GM^2}{8\pi R^4} > S$$

La formule serait plus utile si on utilisait la densité du matériau plutôt que la masse de la planète. Puisque la masse est la densité multipliée par le volume, on arrive à

$$\frac{3G\left(\rho \frac{4}{3}\pi R^3\right)^2}{8\pi R^4} > S$$

En isolant R, on arrive à

Condition pour avoir une planète ou une planète naine

$$R > \sqrt{\frac{3S}{2\pi G\rho^2}}$$

Avec une planète entièrement faite de fer (dont la densité est de 7900 kg/m³), la formule donne

$$R > 216km$$

Avec une planète entièrement faite de roche (dont la densité est environ 2300 kg/m³), la formule donne

$$R > 520km$$

Avec une planète entièrement faite de glace (dont la densité est de 1000 kg/m³), la formule donne

$$R > 267km$$

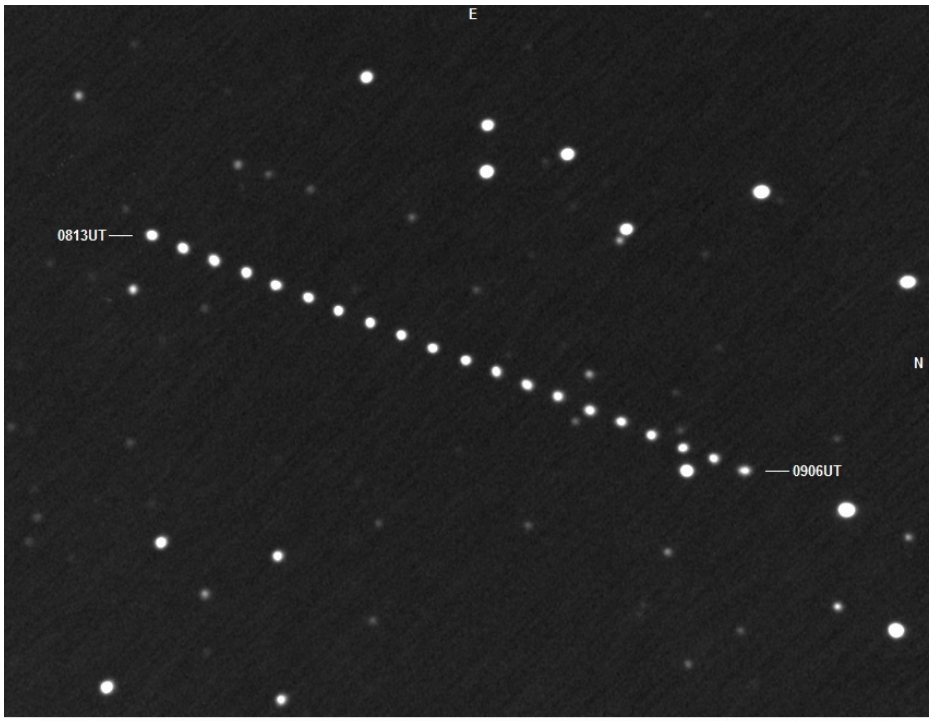
Ces valeurs sont approximatives puisque la densité n'est pas vraiment constante. Elles indiquent quand même qu'une planète ou un satellite deviendra sphérique si son rayon est plus grand qu'une valeur se situant entre 200 km et 500 km, selon la composition du corps. Voici les extrêmes dans le Système solaire : l'astéroïde Pallas est le plus gros qui n'est pas sphérique avec des dimensions de 582 km x 556 km x 500 km, alors qu'un satellite de Saturne (Mimas) est le plus petit qui est sphérique avec un diamètre de 200 km.

8.2 LA MESURE DE LA DISTANCE DES PETITS OBJETS DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

À part les planètes et les satellites, tous les objets du Système solaire ressemblent à de simples points lumineux dans un télescope (du moins jusqu'à récemment). On ne peut pas trouver énormément d'informations à partir de ces observations, mais on peut déterminer la distance de l'objet.

On pourrait faire une étude beaucoup plus complète, mais ici on va se contenter de faire le calcul de la distance quand on fait une observation de l'objet quand il est en opposition avec le Soleil en supposant que l'orbite est circulaire. Pour trouver sa distance, il suffit alors de déterminer de combien se déplace l'objet par rapport aux étoiles plus lointaines (en degrés par jour par exemple).

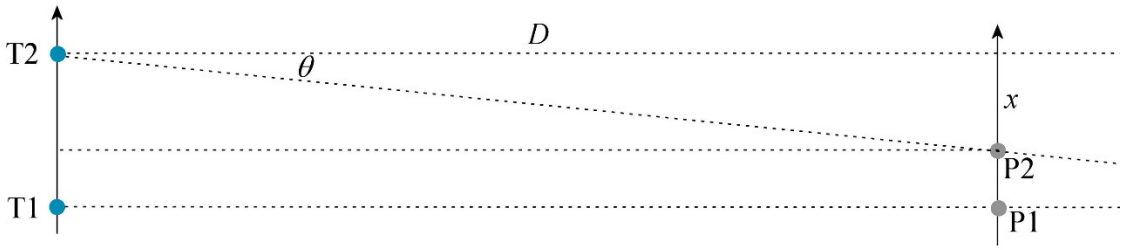
Par exemple, voici le déplacement d'un petit objet (l'astéroïde Florence) sur une période de 53 minutes.



Asteroid Florence (3122), m=9.6, 2017/08/27 0813-0906UT, FOV 17'x13', 11"SCT f/6.4 STF-8300M 1.24"/pixel, Altitude 9° to 4°
This image is an average of twenty 15 second images, the asteroid positions are 2.8 minutes apart, the asteroid is moving 13.9'/Hour
In this image the asteroid moved 12.2' in 53 minutes and was 5.8 Million Miles from Earth Mike Olason, Denver Colorado

skyandtelescope.org/online-gallery/approaching-asteroid-florence-3122-is-5-8-million-miles-from-earth/

Durant un temps Δt, l'objet lointain et la Terre se déplacent d'une distance égale à leur vitesse multipliée par le temps. On va supposer que le temps est suffisamment court pour qu'on puisse considérer que les trajectoires des deux planètes sont des lignes droites. Voici donc les déplacements de la Terre et de la planète sur leur orbite respective.



Entre les instants 1 et 2, la Terre passe de la position T1 à la position T2 pendant que la planète lointaine passe de la position P1 à P2. La vitesse de la planète est plus petite que celle de la Terre puisqu'elle est plus loin du Soleil. L'angle θ sur la figure correspond au changement de position angulaire de la planète. Cet angle (en radians) est

$$\tan\theta = \frac{x}{D}$$

Comme l'angle sera petit, on peut écrire tan $\theta \approx \theta$. On a alors

$$\theta = \frac{x}{D}$$

La valeur de x est le déplacement de plus qu'a fait la Terre par rapport à la planète, C'est donc

$$\begin{aligned} x &= x_T - x_p \\ &= v_T \Delta t - v \Delta t \end{aligned}$$

On utilise un indice T pour la Terre et aucun indice pour la planète. Les vitesses de la Terre et de la planète dues à leur mouvement autour du Soleil (si on suppose que les orbites sont circulaires) sont

$$v_T = \sqrt{\frac{GM_c}{r_T}} \qquad\qquad v = \sqrt{\frac{GM_c}{r}}$$

La valeur de x est donc

$$\begin{aligned} x &= v_T \Delta t - v \Delta t \\ &= \sqrt{\frac{GM_c}{r_T}}\Delta t - \sqrt{\frac{GM_c}{r}}\Delta t \\ &= \sqrt{\frac{GM_c}{r_T}}\Delta t - \sqrt{\frac{GM_c}{r_T}}\sqrt{\frac{r_T}{r}}\Delta t \\ &= \sqrt{\frac{GM_c}{r_T}}\Delta t\left(1 - \sqrt{\frac{r_T}{r}}\right) \end{aligned}$$

Quand l'objet lointain est à l'opposition, sa distance est

$$D = r - r_T$$

L'angle est donc

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{x}{D} \\ &= \sqrt{\frac{GM_c}{r_T}}\Delta t \frac{1}{r - r_T}\left(1 - \sqrt{\frac{r_T}{r}}\right) \\ &= \sqrt{\frac{GM_c}{r_T}}\Delta t \frac{1}{r}\frac{1}{1 - \frac{r_T}{r}}\left(1 - \sqrt{\frac{r_T}{r}}\right) \end{aligned}$$

Or,

$$\frac{1-\sqrt{\frac{r_T}{r}}}{1-\frac{r_T}{r}} = \frac{1-\sqrt{\frac{r_T}{r}}}{\left(1+\sqrt{\frac{r_T}{r}}\right)\left(1-\sqrt{\frac{r_T}{r}}\right)}$$
$$= \frac{1}{1+\sqrt{\frac{r_T}{r}}}$$

Le changement d'angle par unité de temps est donc

$$\frac{\theta}{\Delta t} = \frac{1}{r}\frac{1}{1+\sqrt{\frac{r_T}{r}}}\sqrt{\frac{GM_c}{r_T}}$$
$$= \frac{\frac{r_T}{r}}{1+\sqrt{\frac{r_T}{r}}}\sqrt{\frac{GM_c}{r_T^3}}$$

Mais puisque la période de rotation de la Terre autour du Soleil est

$$T_\oplus = 2\pi\sqrt{\frac{r_T^3}{GM_c}}$$

on a

$$\frac{\theta}{\Delta t} = \frac{\frac{r_T}{r}}{1+\sqrt{\frac{r_T}{r}}}\frac{2\pi}{T_\oplus}$$

Comme $T_\oplus$ = 365,25 jours et r_T = 1 UA, on a

$$\frac{\theta}{\Delta t} = \frac{2\pi rad}{365,25\,j}\cdot\frac{\frac{1UA}{r}}{1+\sqrt{\frac{1UA}{r}}}$$

Si on change les radians en degrés, on obtient cette équation.

Rythme de changement d'angle d'une planète par rapport aux étoiles (à l'opposition)

$$\frac{\theta}{\Delta t} = \frac{360°}{365,25\,j}\cdot\frac{\frac{1UA}{r}}{1+\sqrt{\frac{1UA}{r}}}$$

Pour un objet sur une orbite ayant un rayon de 40 UA, le rythme de changement est

$$\frac{\theta}{\Delta t} = \frac{360°}{365,25\,j}\cdot\frac{\frac{1UA}{40UA}}{1+\sqrt{\frac{1UA}{40UA}}}$$
$$= 0,0212\,\frac{°}{j}$$

Pour un objet sur une orbite ayant un rayon de 2,8 UA, le rythme de changement est

$$\frac{\theta}{\Delta t} = \frac{2\pi rad}{365,25\,j} \cdot \frac{\frac{1UA}{2,8UA}}{1+\sqrt{\frac{1UA}{2,8UA}}}$$
$$= 0,220\,\tfrac{\circ}{j}$$

On voit que plus l'objet est près du Soleil, plus le rythme de changement d'angle est grand.

Exemple 8.2.1

On remarque qu'un petit point lumineux se déplace au rythme de 0,01° par jour par rapport aux étoiles quand il est en opposition avec le Soleil. Quelle est la distance entre cet objet et le Soleil ?

On a

$$0,01\,\tfrac{\circ}{j} = \frac{360°}{365,25\,j} \cdot \frac{\frac{1UA}{r}}{1+\sqrt{\frac{1UA}{r}}}$$
$$\frac{0,01\,\tfrac{\circ}{j} \cdot 365,25\,j}{360°} = \frac{\frac{1UA}{r}}{1+\sqrt{\frac{1UA}{r}}}$$
$$0,010146 = \frac{\frac{1UA}{r}}{1+\sqrt{\frac{1UA}{r}}}$$

Il ne reste qu'à isoler la distance. Pour y arriver, on va poser que

$$u = \sqrt{\frac{1UA}{r}}$$

On a alors

$$0,010146 = \frac{u^2}{1+u}$$
$$0,010146 \cdot (1+u) = u^2$$
$$0 = u^2 - 0,010146 \cdot u - 0,010146$$

La solution de cette équation quadratique est u = 0,1059. (Il y a aussi une solution négative, qui n'a pas de sens ici.) On a donc

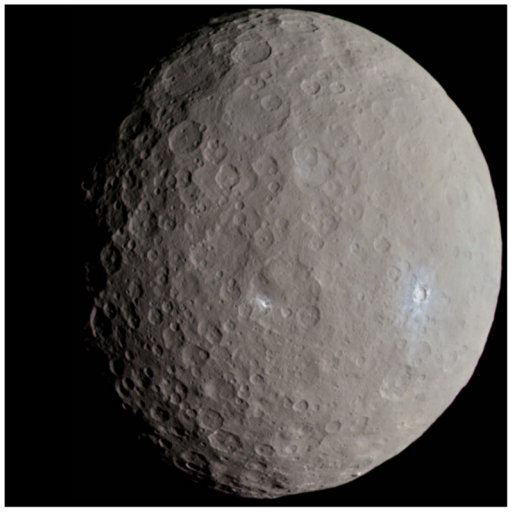
$$0,1059 = \sqrt{\frac{1UA}{r}}$$
$$r = 89,1UA$$

L'objet est donc sur une orbite ayant un rayon de 89,1 UA

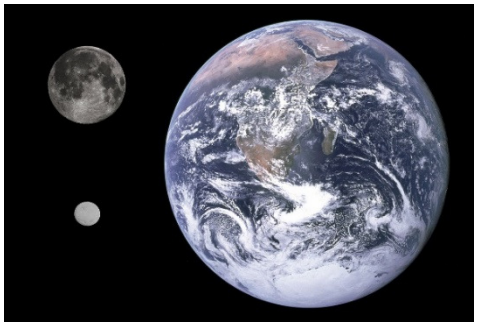
8.3 LA CEINTURE D'ASTÉROÏDES

Cérès

Le premier janvier 1801, Guiseppe Piazzi observe un objet dans le ciel près d'une étoile qu'il voulait observer. Comme cet objet ne devait pas être là selon les cartes du ciel, il décide de continuer l'observation de cet objet mystérieux pendant quelques jours. Il se rend compte assez vite que cet objet se déplace par rapport aux étoiles. On pense initialement que c'est une nouvelle comète, mais les astronomes sont convaincus, vers la fin de l'année, qu'il s'agit plutôt d'une nouvelle planète. Ils venaient de découvrir Cérès, une planète naine dont l'orbite a un demi-grand axe de 2,77 UA et une excentricité de 0,079, ce qui la place entre Mars et Jupiter. Elle fait le tour du Soleil en 4,60 ans.



en.wikipedia.org/wiki/Ceres_(dwarf_planet)



Cérès n'est pas une planète très grosse. Avec un rayon de seulement 475 km, elle n'a que 1,2 % de la masse de la Lune. C'est une planète naine de type ganymédien (le quart de sa masse vient de la glace d'eau).

en.wikipedia.org/wiki/Ceres_(dwarf_planet)

Malgré sa petite taille, Cérès avait le statut de planète du Système solaire durant la première moitié du 19e siècle pour ensuite perdre ce titre quand on a découvert que Cérès n'est pas seule entre Mars et Jupiter.

La découverte des autres astéroïdes

En 1802, alors qu'il cherche Cérès, Heinrich Wilhelm Olbers découvre un autre objet se déplaçant par rapport aux étoiles. Il s'agit de Pallas, dont le diamètre moyen est de 545 km. (Pallas est trop petit pour être sphérique et les largeurs sont de 582 km, 556 km et 500 km selon les directions.) L'orbite a un demi-grand axe de 2,77 UA et une excentricité de 0,231. Le demi-grand axe de l'orbite de Pallas est donc identique à celui de Cérès. (Petite note historique : Les éléments cérium et palladium, découverts au début de 19e siècle, ont été nommés ainsi pour souligner les découvertes de Cérès et Pallas.)

On découvre ensuite deux d'autres objets entre Mars et Jupiter. Ce sont Junon, découvert en 1804 (diamètre moyen de 233 km), et Vesta, découvert en 1807 (diamètre moyen de

525 km). À part leur mouvement dans le ciel, ces objets ressemblaient à des étoiles parce que même en zoomant au télescope, ces objets restaient ponctuels, comme les étoiles. William Herschell proposa donc, en 1802, de les appeler *astéroïdes*, ce qui signifie *ressemblant à des étoiles*.

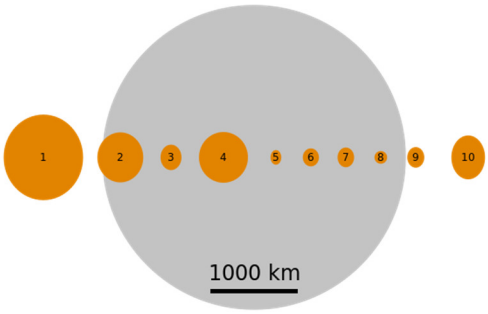
On en reste là jusqu'en 1845, année de la découverte de l'astéroïde Astrée. À partir de cette date, on découvre de nouveaux objets entre Mars et Jupiter pratiquement chaque année. Le 12 décembre 2024, on en comptait 1 424 211. Vous pouvez voir la liste complète sur ce site.
https://minorplanetcenter.net/mpc/summary
On estime qu'il pourrait y avoir entre 700 000 et 1 700 000 astéroïdes ayant un diamètre moyen (ils ne sont pas sphériques) de 1 km et plus.

Chaque astéroïde possède un numéro, donné dans l'ordre de la découverte. Les 10 premiers astéroïdes sont donc

1 Cérès	6 Hébé
2 Pallas	7 Iris
3 Junon	8 Flora
4 Vesta	9 Métis
5 Astrée	10 Hygie

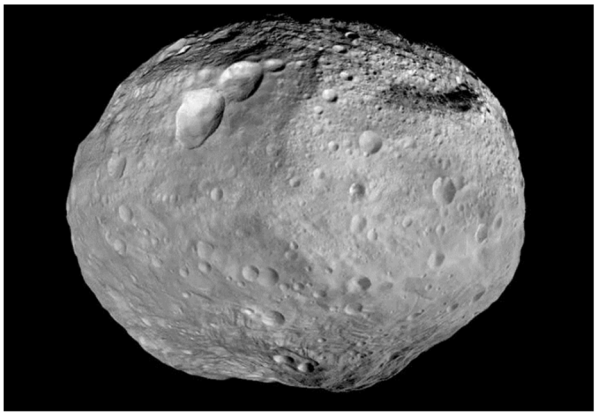
Ce ne sont pas tous les astéroïdes qui ont un nom en plus d'un numéro. Le premier n'ayant pas de nom est l'astéroïde 3708.

Les astéroïdes ne sont généralement pas très gros. Voici la taille des astéroïdes 1 à 10 par rapport à la Lune.



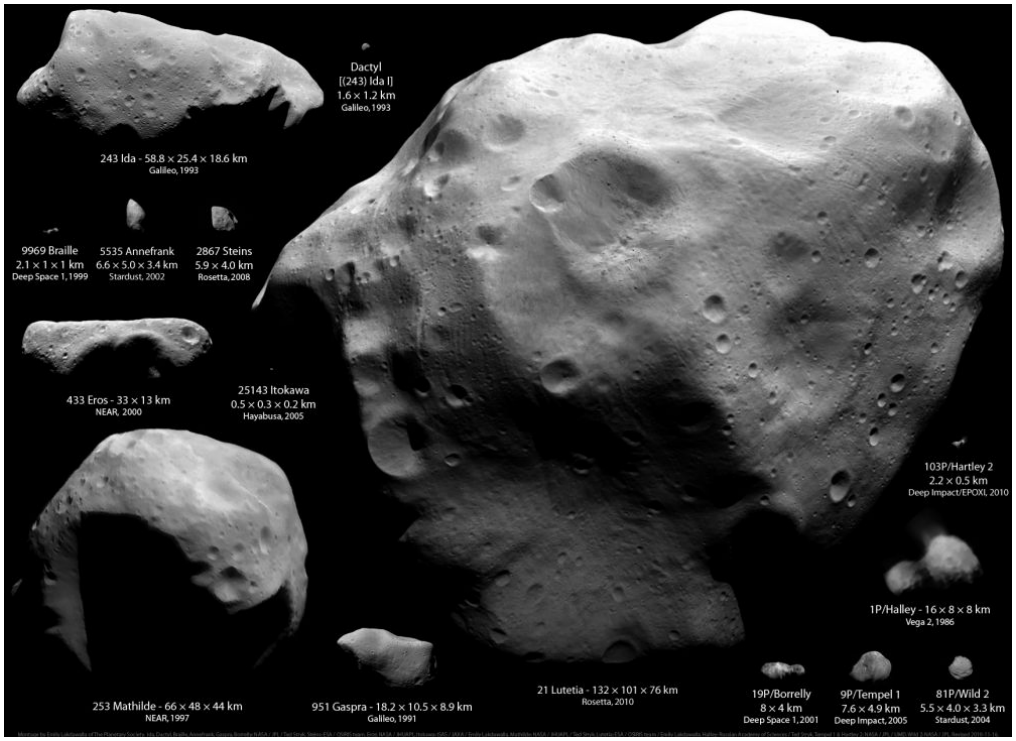
en.wikipedia.org/wiki/Asteroid

Il y a environ 240 astéroïdes qui ont un diamètre moyen supérieur à 100 km. Le nombre d'astéroïdes d'une certaine taille augmente de 100 quand on diminue la taille d'un facteur 10. Cela signifie, par exemple, qu'il y a 100 fois plus d'astéroïdes ayant un diamètre de 10 m qu'il y en a qui ont un diamètre de 100 m. La masse totale des astéroïdes se situe aux environs de 4 % de la masse de la Lune, et près de la moitié de cette masse se retrouve dans les astéroïdes Cérès, Junon, Vesta et Hygie. Même en mettant tous les astéroïdes ensemble pour en faire une planète, elle n'aurait qu'un diamètre de 1500 km, ce qui n'est pas tellement plus gros que Cérès, qui a un diamètre de 950 km. À part Cérès, les astéroïdes ont une forme plutôt irrégulière. L'image de gauche montre Vesta.


en.wikipedia.org/wiki/4_Vesta

Voici un film montrant l'astéroïde Bennu avec beaucoup de détails (c'est en fait l'objet du Système solaire le mieux cartographié)
https://www.youtube.com/watch?v=QunVAWABQSc

Voici des photos de quelques autres astéroïdes.



www.universetoday.com/37425/what-are-asteroids-made-of/

La plupart des astéroïdes sont composés de roche et de métal. Les astéroïdes ayant une orbite dont le demi-grand axe est plus grand que celui de Jupiter peuvent être composés de roche et de métal, mais aussi de glace. Cérès est une exception, puisqu'elle est de type ganymédien. Il y a quelques astéroïdes qui sont presque entièrement métalliques.

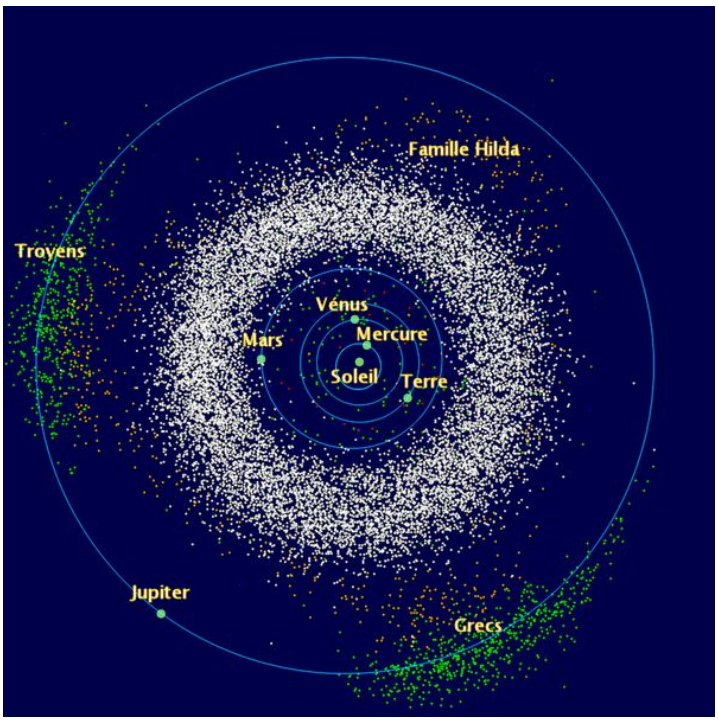
Les astéroïdes sont couverts de cratère et sont recouverts de régolite, cette poussière rocheuse ayant la texture de la poudre de ciment.

Avec la découverte d'autant d'astéroïdes, Cérès, Pallas, Junon et Vesta ont perdu leur statut de planète au milieu du 19e siècle pour être considérées simplement comme des astéroïdes parmi d'autres. Quand il a fallu clarifier ce qu'est une planète en 2006, Cérès retrouva son statut de planète puisqu'elle est de forme sphérique. Toutefois, elle est classée comme une planète naine parce qu'elle partage son orbite avec de nombreux autres objets.

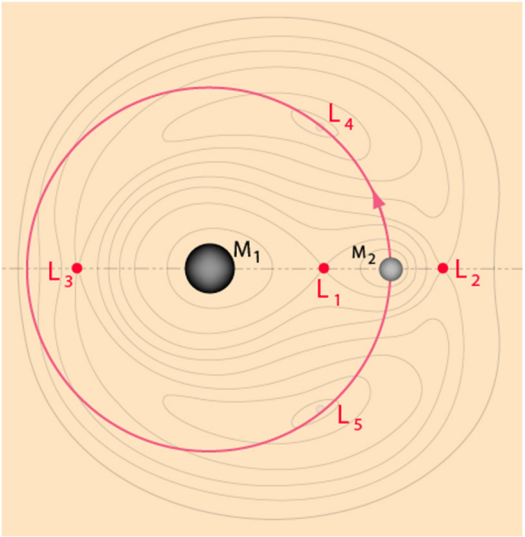
La ceinture d'astéroïdes

Voici une image montrant la distribution des astéroïdes dans le Système solaire.

On remarque une concentration importante d'astéroïdes entre Mars et Jupiter (en blanc). 93 % des astéroïdes se situent à une distance du Soleil variant entre 2,06 UA et 3,27 UA (Mars est à 1,5 UA du Soleil et Jupiter à 5,2 UA du Soleil) et ont une excentricité inférieure à 0,33 et une inclinaison orbitale par rapport à l'écliptique inférieure à 20°. On appelle cette région *la ceinture d'astéroïdes.* Les 12 astéroïdes ayant un diamètre moyen supérieur à 250 km se trouvent tous dans la ceinture d'astéroïdes.



www.aufildusavoir.fr/emissions/depoussierer-les-etoiles/attachment/innersolarsystem-fr/



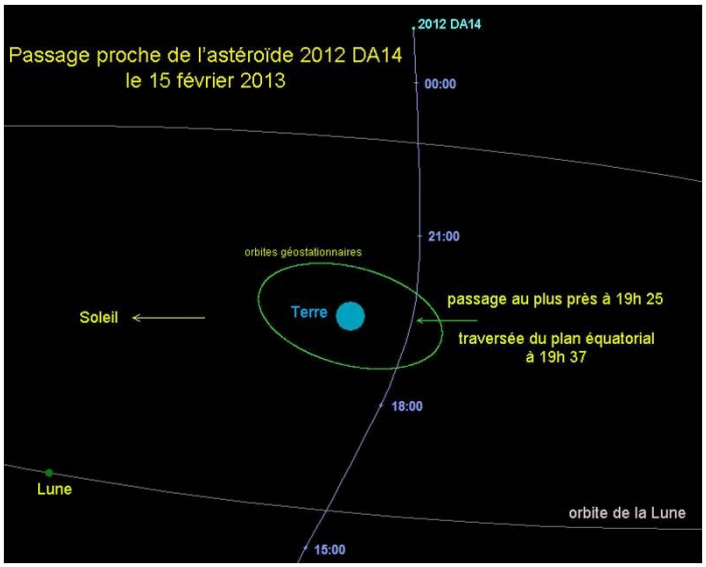
On remarque aussi des groupes d'astéroïdes, appelés les astéroïdes *troyens* (14 947 astéroïdes au 12 décembre 2024 pour cette catégorie qui, sur la figure, sont appelés les Grecs et les Troyens) et les astéroïdes de la *famille Hilda* (6357 astéroïdes au 12 décembre 2024). Ces astéroïdes sont associés aux points de Lagrange de Jupiter. Ces 5 points de Lagrange sont les endroits où il y a une certaine stabilité dans le système Soleil-Jupiter. Voici les positions des 5 points de Lagrange.

pastparsnip.com/the-lagrange-method/

Les astéroïdes troyens sont en équilibre au point de Lagrange L_4 et L_5. Quant aux astéroïdes de la famille Hilda, ils se promènent en passant sans cesse des points L_3, L_5, L_4, L_3, L_5, L_4 … et ainsi de suite. L'animation suivante montre les mouvements de ces trois groupes (vous verrez premièrement la famille Hilda, pour ensuite voir les troyens et les grecs).
https://www.youtube.com/watch?v=yt1qPCiOq-8
Notez que d'autres planètes ont aussi des astéroïdes troyens prisonniers aux points de Lagrange L_4 et L_5. Neptune en a 17, Mars en a 7, Uranus en a 2, Vénus en a 1 et la Terre en a 1.

On remarque finalement qu'il y a aussi d'autres astéroïdes un peu partout dans le Système solaire. Il y a premièrement 95 160 astéroïdes à l'intérieur de la ceinture d'astéroïdes (12 décembre 2024). Il y en a même qui s'approche assez près de la Terre. On les appelle les *astéroïdes géocroiseurs*. En décembre 2024, on connaissait 36 972 de ces astéroïdes géocroiseurs, ayant des tailles allant de 1 m à 34 km (1036 Ganymède). Il y en a 856 ayant un diamètre moyen supérieur à 1 km. Ces astéroïdes ne croisent pas tous l'orbite de la Terre, mais certains la croisent et risquent un jour d'entrer en collision avec la Terre. Il y a 2469 astéroïdes qui sont classés comme étant « potentiellement dangereux ».

Le 15 février 2013, l'astéroïde 2012 DA_{14} est même passé assez près de la Terre. Il est passé à seulement 27 700 km de la surface de la Terre, un record pour un astéroïde de cette taille (diamètre de 50 m). Vous pouvez suivre les probabilités de collision entre la Terre et un astéroïde sur ce site. https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/



www.imcce.fr/fr/presentation/equipes/GAP/2012da14/2012da14.html

Il y a aussi 5994 astéroïdes (12 décembre 2024), qui ont des orbites dont le demi-grand axe est plus grand que celui de l'orbite Jupiter. Selon les estimations, il pourrait y avoir environ 45 000 de ces astéroïdes ayant 1 km et plus de diamètre. Notez que les 2 plus gros (Charilko et Chiron) de ces astéroïdes ont des anneaux. Ces anneaux sont très étroits et discontinus (ce sont plus des arcs que des anneaux entiers).

Erreur dans les films

Dans *Star Wars*, les ceintures d'astéroïdes sont très denses et il faut être un pilote incroyable pour éviter d'en frapper un.

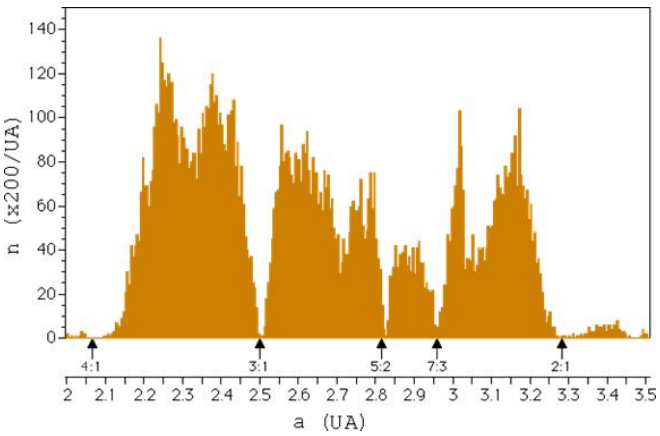
starwarsvisualizer.ff0000.com/scene/214

La ceinture d'astéroïde du Système solaire est loin d'être aussi dense. La distance moyenne entre les astéroïdes ayant un diamètre de 1 km et plus est de 5 millions de km ! C'est un peu comme si on avait des balles de baseball séparées les unes des autres par une distance de 350 km ! Si on traverse la ceinture d'astéroïdes les yeux fermés, on a une chance sur

10^{17} de frapper un astéroïde par hasard, ce qui équivaut à gagner à la loto 6/49 3 de fois de suite. Quand on envoie une sonde à travers la ceinture d'astéroïdes, on ne s'occupe même pas de l'éventualité d'une collision avec un astéroïde. La plupart des sondes qui ont traversé la ceinture n'ont même pas pu photographier le moindre astéroïde, à moins qu'on ait fait passer intentionnellement la sonde près d'un astéroïde. C'est ainsi que la sonde Galileo prit des photos des astéroïdes Gaspra et Ida en 1993.

Les résonances orbitales

Examinons premièrement un graphique montrant le nombre d'astéroïdes en fonction du demi-grand axe de l'orbite.



commons.wikimedia.org/wiki/File:Kirkwood_Gaps.png

On remarque qu'il n'y a pratiquement pas d'astéroïdes qui ont un demi-grand axe valant 2,06 UA, 2,50 UA, 2,82 UA, 2,96 UA ou 3,27 UA. Il en est ainsi parce qu'il y a quelques résonances orbitales avec Jupiter dans la ceinture d'astéroïdes.

Les valeurs de *a* pour lesquelles il y a très peu d'astéroïdes portent le nom de *lacune de Kirkwood*. Cela ne veut pas dire qu'il n'y a aucun astéroïde à une distance de 2,5 UA puisque l'orbite de beaucoup d'astéroïdes est assez excentrique, ce qui fait qu'ils sont parfois à 2,5 UA, même si leur demi-grand axe ne vaut pas 2,5 UA. À un moment donné, la densité d'astéroïde à 2,5 UA n'est pas vraiment différente de celle des régions voisines. D'ailleurs, on ne voyait pas cette zone vide dans l'image montrant la distribution des astéroïdes.

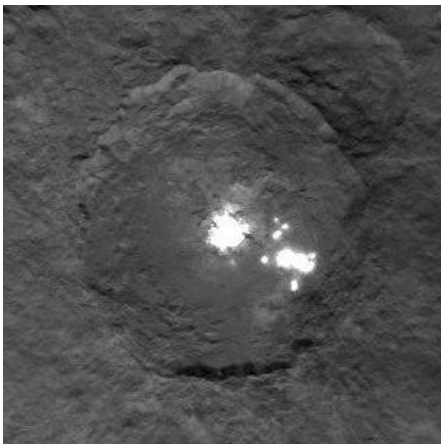
On considère que la ceinture d'astéroïde commence à la résonance 4 : 1 (à 2,06 UA) et se termine à la résonance 2 : 1 (à 3,27 UA).

Cérès ne s'est pas formé dans la ceinture d'astéroïdes

Les images de Cérès montrent qu'il y a des taches blanches au fond des cratères sur Cérès. Ces taches blanches sont formées de différents sels. Cela laisse croire qu'il y a (ou qu'il y a eu) une couche d'eau très salée assez près de la surface et que ce liquide peut parfois

atteindre la surface. Quand cela se produit, l'eau s'évapore très rapidement (parce qu'il n'y a pas d'atmosphère) laissant ainsi une tache de sel. L'image suivante montre une de ces taches.

Dans certaines régions, on retrouve des sels d'ammoniums dans certaines taches blanches. La présence de ce type de sel supporte l'idée que Cérès ne s'est pas formé dans la ceinture d'astéroïdes. En effet, ces sels ne peuvent pas se former si près du Soleil, ils doivent se former un peu plus loin où la température est plus basse. On pense donc que Cérès s'est formé quelque part entre Jupiter et Saturne (certains disent même au-delà de l'orbite de Neptune) et que les perturbations gravitationnelles faites par Jupiter ont fini par amener Cérès dans la ceinture d'astéroïdes. Il se pourrait aussi que Vesta, Pallas et Ida se soient également formés en dehors de la ceinture d'astéroïdes.



fr.wikipedia.org/wiki/(1)_Cérès

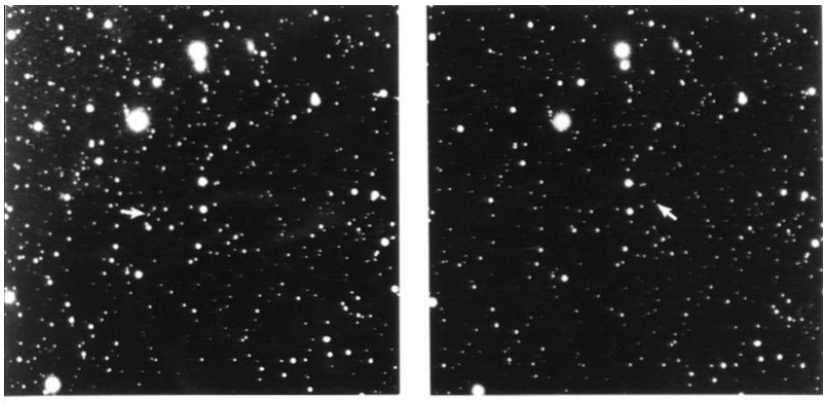
8.4 LA CEINTURE DE KUIPER

Pluton

À son arrivée à l'observatoire Lowell en Arizona en 1929, Clyde Tombaugh a la pénible tâche de chercher une nouvelle planète en comparant des photographies du ciel prises à différents moments pour voir si un des points lumineux n'aurait pas changé de position par rapport aux étoiles comme le font les planètes. Avec des images prises à environ une semaine d'intervalle, il cherche un petit point lumineux qui s'est déplacé d'environ 0,15°.

Après presque un an de recherche, il découvre finalement, le 18 février 1930, une nouvelle planète, qu'on finira par appeler Pluton. Pluton devenait la 9e planète du Système solaire. Avec un déplacement de 9 minutes d'arc en une semaine, on pouvait en déduire que la distance de la planète était de près de 40 UA.

On peut voir avec les images de la découverte qu'il fallait être bien attentif pour découvrir Pluton.



January 23, 1930 January 29, 1930

en.wikipedia.org/wiki/Pluto

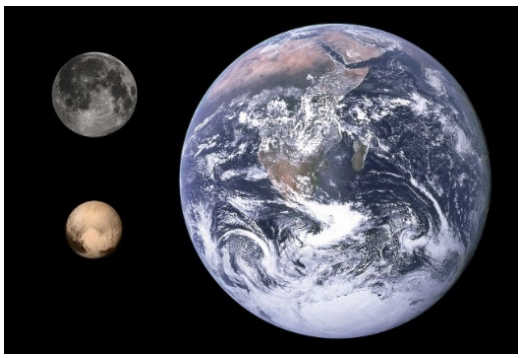
Pluton se retrouvait sur 15 photographies du ciel plus anciennes, la plus ancienne datant de 1909, mais on ne s'était pas rendu compte qu'il s'agissait d'une planète.

Pluton est de type ganymédien et a une structure similaire à celle de Triton, le plus gros satellite de Neptune.

Voici une image de Pluton prise par la sonde New Horizons en 2015.

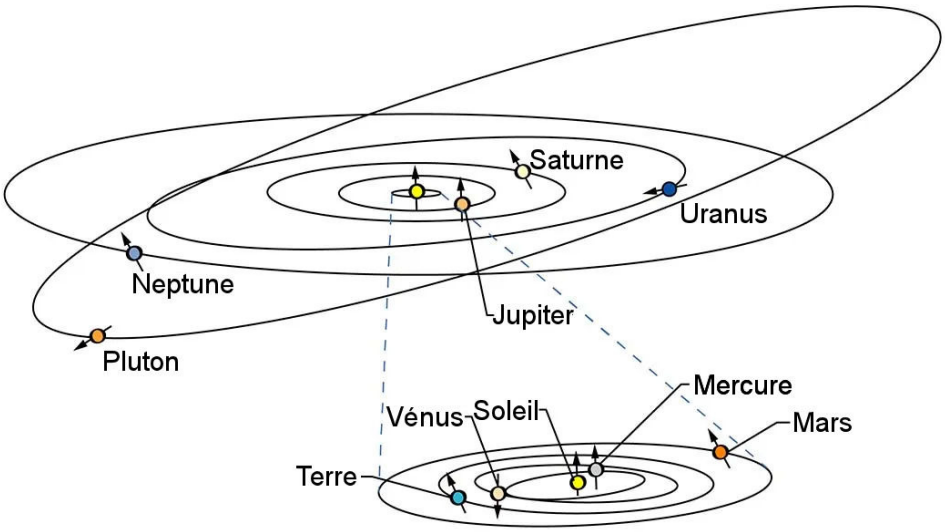
en.wikipedia.org/wiki/Pluto

Pluton n'est cependant pas une bien grosse planète. Avec un diamètre de 2377 km, elle est même plus petite que la Lune (diamètre de 3470 km). Elle n'a que 17,7 % de la masse de la Lune. Elle est plus petite que 7 satellites du Système solaire.



en.wikipedia.org/wiki/Pluto

Pluton fait le tour du Soleil en 247,94 ans. L'orbite de Pluton est très inclinée par rapport au plan de l'orbite terrestre (15,2°) et a une excentricité élevée (0,2488). La distance entre Pluton et le Soleil varie donc entre 29,658 UA et 49,305 UA. Cela fait en sorte que Pluton est plus près du Soleil que Neptune pendant 20 ans pendant une révolution autour du Soleil. Cela s'est produit pour la dernière fois entre 1979 et 1999.



www.nasa.gov/learning-resources/for-kids-and-students/what-is-pluto-grades-5-8/

On pourrait alors penser que Neptune et Pluton pourraient entrer en collision puisque leurs orbites se croisent. En fait, il n'y a aucune chance que cela se produise. Premièrement, la forte inclinaison de l'orbite de Pluton ne permet pas de rencontre entre les deux planètes. Deuxièmement, la résonance orbitale 3:2 (Pluton fait exactement 2 tours autour du Soleil pendant que Neptune fait exactement 3 tours) fait en sorte que Neptune et Pluton sont pris dans une configuration dans laquelle les 2 planètes restent toujours relativement éloignées l'un de l'autre. La distance minimale entre les deux planètes est de 18,9 UA. En fait, Pluton peut s'approcher davantage d'Uranus (12 UA) que de Neptune ! Notez également que l'interaction gravitationnelle entre Pluton et Neptune fait varier le demi-grand axe de l'orbite de Pluton entre 39,3 UA et 39,6 UA.

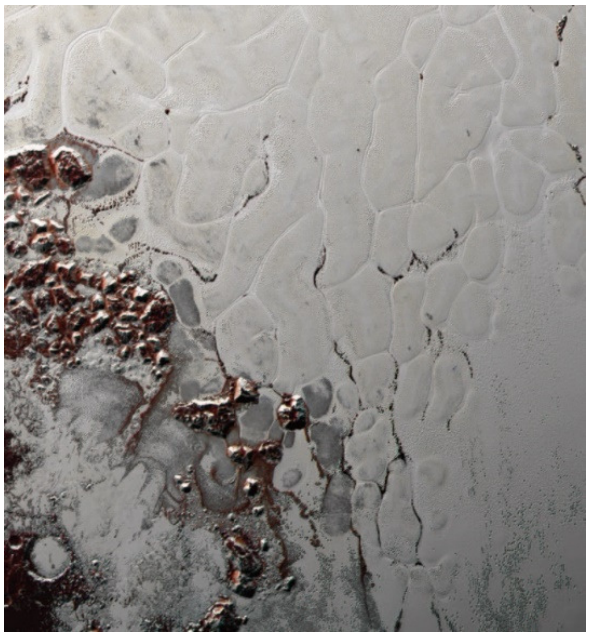
La surface de Pluton est très contrastée. On y retrouve des zones très sombres et des zones très claires. La température de surface est aux environs de -213 °C dans les zones sombres et aux environs de -235 °C dans les zones claires. La surface est composée à 98 % d'azote gelé et les montagnes sont formées de glace d'eau.

On note premièrement que les zones sombres ont une teinte plutôt rougeâtre. Cette coloration particulière est faite par des composées qui se déposent à la surface de la planète. En effet, selon la thermodynamique, les glaces de la surface doivent être en équilibre avec une atmosphère. Cela signifie qu'il doit y avoir une atmosphère sur Pluton. Cette atmosphère est composée d'azote (90 %), le monoxyde de carbone (10 %) et d'un peu de méthane. La pression au sol n'est évidemment pas bien grande (1 Pa, soit environ 1/100 000 de la pression à la surface de la Terre). Toutefois, le méthane de l'atmosphère est transformé en composés organiques plus complexes par le rayonnement solaire. Ces composés forment alors une brume dans l'atmosphère et ils se déposent ensuite à la surface. Ce sont ces composés qui donnent une teinte rougeâtre à la surface.

Il y a aussi des zones très claires. Notons cette zone très claire en forme de cœur (Tombaugh Regio) à la surface. Cette partie de la surface est très lisse et très jeune (puisqu'il n'y a aucun cratère.)

Une partie de cette région en forme de cœur (le lobe occidental) est particulièrement intéressante. On y retrouve des motifs montrés sur la figure de droite.

On pense qu'il s'agit d'un lac d'azote qui aurait rempli un cratère. Une source de chaleur interne chauffe l'azote pour qu'il soit liquide et fait aussi apparaitre de la convection. Sur la photo, on voit le dessus de ces zones de convections à la surface du lac.

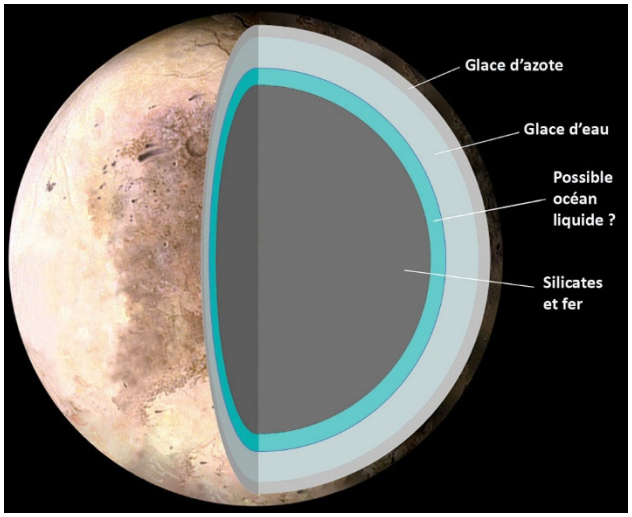


en.wikipedia.org/wiki/Pluto#/media /File:Pluto's_Heart_-_Like_a_Cosmic_Lava_Lamp.jpg

Mais d'où provient cette chaleur à l'origine de cette convection ? Pluton est tellement petite qu'elle aurait dû se refroidir très rapidement après sa formation. On pense donc qu'il doit y avoir une couche très isolante à l'intérieur de Pluton qui aurait permis à Pluton de garder une bonne partie de sa chaleur originelle. Cette couche serait formée d'hydrates de méthane, un composé qui laisse difficilement passer la chaleur.

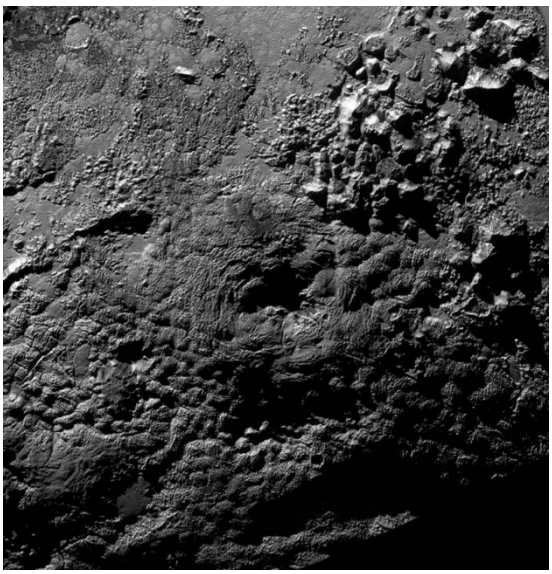
Si l'intérieur de Pluton est encore chaud, il se pourrait alors qu'il y ait un océan liquide sous la surface gelée de Pluton.

Sur l'image, on indique qu'on aurait essentiellement de la glace d'eau sous la couche de glace d'azote. En fait, cette partie serait composée à 50 % d'eau et à 50 % des autres types de glace (azote, méthane et oxyde de carbone).



planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/Pluton-Charon-New-Horizons-aout-2015.xml

En tout cas, tout laisse croire qu'il y a déjà eu un tel océan liquide sous la surface. Deux structures (les monts Wright et Piccard) à la surface de Pluton pourraient être des cryovolcans. Ces derniers ressemblent à des volcans, mais ils sont formés de glace d'eau. Ils n'éjectent pas de lave, mais de l'ammoniaque (c'est-à-dire de l'eau contenant de l'ammoniac) qui reste liquide même à de très basses températures. À droite, on peut voir le mont Wright. Il se pourrait que ces volcans soient encore actifs.



fr.wikipedia.org/wiki/Pluton_(plan%C3%A8te_naine)

Notons finalement que Pluton tourne sur elle-même en 6,387 jours terrestres. L'axe de rotation est très incliné (120°) par rapport au plan de l'orbite, ce qui provoque des saisons extrêmes. Au solstice, un quart de la surface est constamment exposée au Soleil et un quart de la surface est constamment dans l'obscurité.

Charon

En 1978, on découvre Charon, un satellite de Pluton.

En fait, Charon est tellement gros par rapport à Pluton qu'on a plutôt affaire à une planète double. Pluton et Charon tournent autour du centre de masse du système. Avec des masses assez similaires et une distance entre les planètes assez petite (19 571 km, soit seulement 4,4 % de la distance Terre-Lune), les forces de marée ont arrêté la rotation des deux planètes. Chaque planète a toujours la même face tournée vers l'autre planète. C'est le seul exemple connu pour lequel les deux objets du système se montrent toujours la même face.

solarsystem.nasa.gov/resources/697/pluto-and-charon-strikingly-different-worlds/

Contrairement à Pluton, la surface de Charon semble être surtout composée de glace d'eau.

La découverte des autres objets transneptuniens

En 1987, une équipe du MIT se lance dans la recherche d'autres planètes dans le Système solaire. Au bout de 5 ans, on détecte une nouvelle planète, puis une autre en 1993. Assez rapidement, on découvre encore plus d'objets situés au-delà de l'orbite de Neptune. On a appelé ces objets les *objets transneptuniens*.

Les plus gros objets transneptuniens sont

	Diamètre (km) approximatif	Demi-grand axe (UA)	Excentricité
Pluton	2375	39,3	0,245
Éris	2325	68,0	0,436
Hauméa	1595	43,1	0,195
Makemake	1440	45,8	0,159
Gonggong	1420	67,2	0,500
Charon (satellite de Pluton)	1200	39,3	0,245
Quaoar	1085	43,4	0,039
Sedna	995	519	0,853
Orcus	910	39,2	0,227
Salacia	866	42,3	0,100

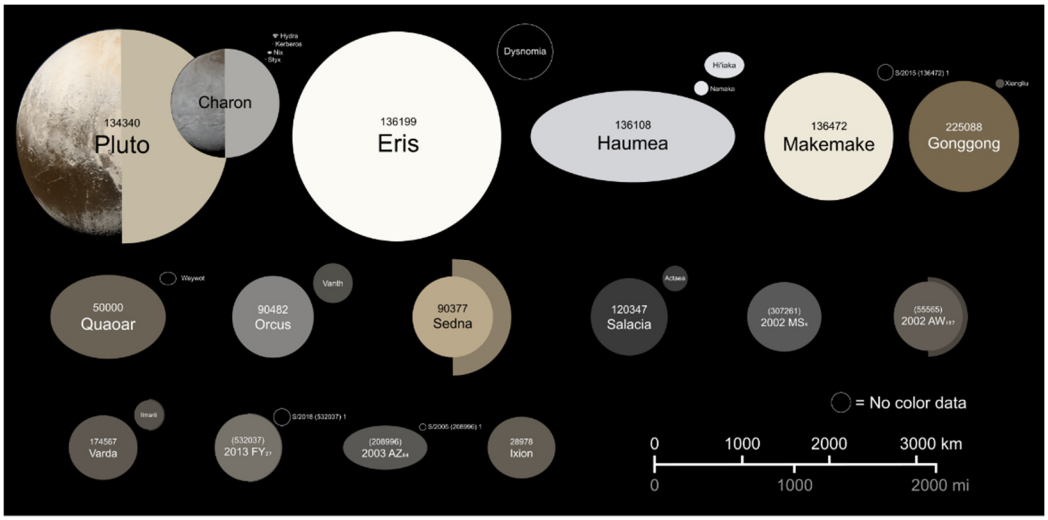
On pense que Triton (diamètre = 2700 km) est un objet transneptunien capturé par Neptune, ce qui expliquerait son orbite rétrograde.

Hauméa, en plus d'avoir 2 satellites (Hi'iaka et Namaka), a un anneau. Hauméa tourne également très rapidement sur elle-même (3,9 h). Parmi toutes les planètes et les planètes

naines, Hauméa a la rotation la plus rapide de tout le Système solaire. Cette rotation rapide lui donne un impressionnant aplatissement. (L'image suivante est un dessin d'artiste, pas une photographie.)

www.sci.news/astronomy/dwarf-planet-haumea-formation-evolution-11303.html

Les désignations provisoires des petits objets du Système solaire, qui inclut les astéroïdes et les objets transneptuniens, sont formées de l'année de découverte suivie d'une première lettre majuscule indiquant le demi-mois de la découverte, en sautant la lettre *I*. Par exemple, Q correspond à la deuxième moitié du mois d'aout. On a ensuite une autre lettre et parfois un chiffre en indice qui indique l'ordre de la découverte dans ce demi-mois. On commence par *A, B, C,…,Z* (on saute toujours *I*), puis A_1, B_1, C_1,…,Z_1, puis A_2, B_2,…, et ainsi de suite. Ainsi, 2007 OR_{10} fut le 267e objet découvert dans la deuxième moitié du mois de juillet 2007.

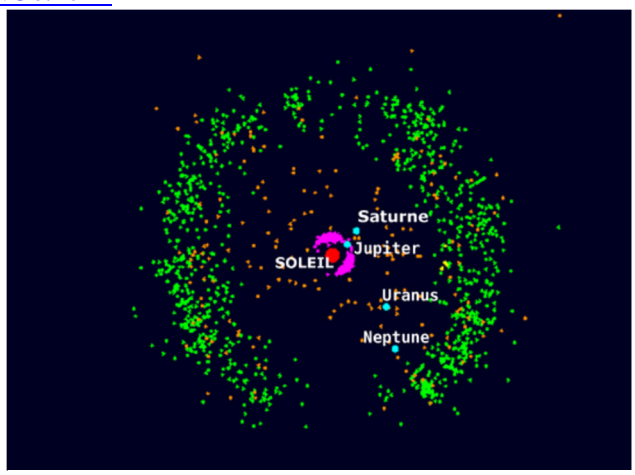


en.wikipedia.org/wiki/List_of_trans-Neptunian_objects

Ces découvertes ont forcé l'union astronomique internationale à revoir sa définition de planète en 2006. Pluton a ainsi perdu son statut de planète parce qu'elle n'est pas seule sur son orbite, comme Cérès dans la ceinture d'astéroïde. Elle est alors devenue une planète naine. Parmi les objets transneptuniens, seuls Pluton, Éris, Makemake et Hauméa ont actuellement le statut de planète naine, bien que plusieurs autres pourront accéder à ce titre au cours des prochaines années.

Distribution des objets transneptuniens

On connait actuellement 3549 objets transneptuniens (12 décembre 2024).
https://minorplanetcenter.net/iau/lists/TNOs.html



commons.wikimedia.org/wiki/File:Outersolarsystem_objectpositions_labels_comp-fr.png

L'image montre la distribution de ces objets dans le système solaire. Les objets transneptuniens sont en vert alors que les astéroïdes au-delà de l'orbite de Jupiter sont en orange. Généralement, les objets transneptuniens ont des demi-grands axes se situant entre 30 et 50 UA, dans une région appelée la *ceinture de Kuiper*. Cela ressemble à la ceinture d'astéroïdes, mais étendue sur une zone beaucoup plus vaste. On estime que cette région pourrait contenir jusqu'à 100 000 objets de plus de 100 km de diamètre et que la masse totale de la ceinture de Kuiper pourrait atteindre 200 fois la masse de la ceinture d'astéroïde (bien que cela ne représente que 10 % de la masse de la Terre).

Le nombre d'objets dans la ceinture de Kuiper s'effondre brutalement à une distance de 50 UA du Soleil. On ne sait pas pourquoi il en est ainsi. Il y a peut-être une planète plus importante qui « fait le ménage » dans cette région.

On estime qu'il pourrait y avoir 200 planètes naines dans la ceinture de Kuiper et 10 000 en tout au-delà de l'orbite de Neptune.

8.5 LES COMÈTES

Historique

À l'occasion, un spectacle incroyable est visible dans le ciel. Il s'agit d'une comète. L'image vous montre la comète de Hale-Bopp, visible en 1997. Le nom de comète vient du grec *kome*, signifiant cheveux.

apod.nasa.gov/apod/image/1310/970401C_lodriguss_960.jpg

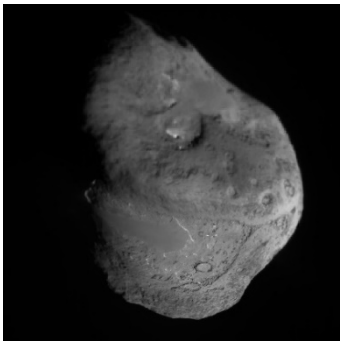
Avant le 16e siècle, on pense généralement que rien ne peut changer dans les cieux, que les cieux sont immuables. On pense donc que les comètes sont un quelconque phénomène météorologique. Les observations d'une comète par Tycho Brahe en 1577 ne laissent cependant aucun doute : les comètes ne sont pas un phénomène météorologique puisque les mesures de Brahe indiquent que la comète de 1577 est au moins 4 fois plus loin que la Lune.

En 1610, William Lower propose que les comètes suivent aussi les lois de Kepler et se déplacent sur des orbites elliptiques autour du Soleil. Il lance ainsi un débat sur la trajectoire des comètes qui n'a été vraiment résolu qu'avec la publication des lois de Newton en 1687. À partir de ce moment, il devient clair que les orbites des comètes suivent les mêmes règles que celles des planètes. Cependant, les orbites des comètes sont généralement des ellipses beaucoup plus excentriques avec un périhélie tout près du Soleil et un aphélie loin et parfois même très loin, du Soleil.

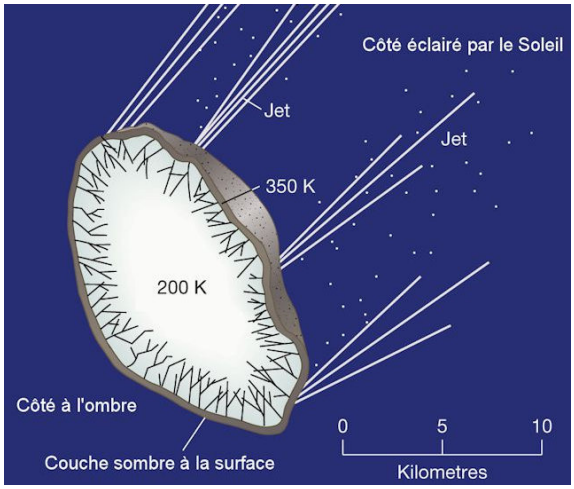
En 1705, Edmund Halley applique les méthodes découvertes par Newton pour déterminer l'orbite de 23 comètes visibles dans le ciel entre 1337 et 1698. Il note alors que 3 de ces comètes (visibles en 1531, 1607 et 1682) ont des orbites passablement identiques. En attribuant les petites différences aux effets perturbateurs de Jupiter, il en vient à la conclusion qu'il doit s'agir de 3 passages de la même comète. Halley peut alors prévoir les détails du retour de sa comète en 1759. Quand elle revient effectivement à cette date et passe à l'endroit prévu par Halley dans le ciel, on lui donne alors le nom de comète de Halley (Halley était mort depuis 1742).

Nature des comètes

Parlons premièrement du noyau de la comète. Les noyaux sont des petits objets formés de roche et de glace, ayant une composition similaire aux astéroïdes situés au-delà de Jupiter. À la surface, on retrouve une croute de roche et de poussière très sombre, ce qui donne au noyau un albédo très faible. C'est pour cela qu'on dit souvent que ce sont comme des grosses boules de neige sales. Ces noyaux ont des « diamètres » variant d'une centaine de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres. Par exemple, la comète de Halley est un petit corps dont les dimensions sont de 16 km x 8 km x 7 km. L'image de droite montre le noyau de la comète Tempel 1, dont le diamètre moyen est d'environ 6 km.



en.wikipedia.org/wiki/Tempel_1



physics.uoregon.edu/~jimbrau/astr121/Notes/Chapter14.html

Quand la comète est loin du Soleil, le noyau suit simplement son orbite, et il n'est pas très différent d'un astéroïde. Le noyau est alors très difficile à voir puisque sa surface réfléchit peu la lumière. Le noyau de la comète de Halley ne reflète que 4 % de la lumière qu'il reçoit.

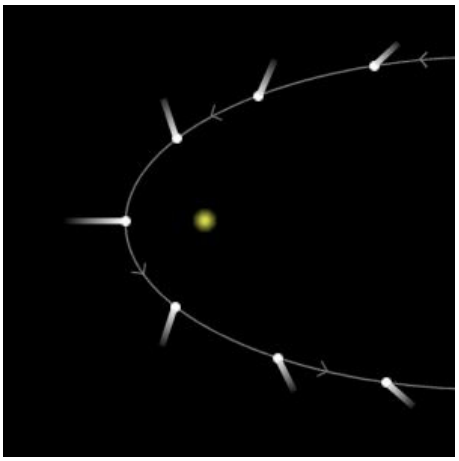
En s'approchant du Soleil, la température du noyau augmente de telle sorte que la glace commence à se sublimer quand la comète est à moins de 4 UA du Soleil. Plus précisément, le Soleil chauffe la croute

sombre à la surface, ce qui réchauffe la glace sous cette croute. La glace se sublime alors et traverse la croute en formant des jets, un peu comme des geysers de vapeur. Ces jets de gaz entrainent aussi de la poussière avec eux.

Le rythme de perte de masse du noyau est généralement autour de 20 tonnes par seconde pour le gaz et de 5 tonnes par secondes pour la poussière. Au bout de plusieurs passages, il n'y aura plus de glace et la comète deviendra un simple astéroïde rocheux. Cette façon de perdre de la masse donne une structure très poreuse au noyau et une faible densité de l'ordre de 100 kg/m².

La vapeur d'eau dégagée par le noyau commence à former une atmosphère très peu dense autour du noyau, appelée la *chevelure ou coma*. La chevelure peut atteindre presque la taille du Soleil. Une partie des gaz est ionisée par le rayonnement UV du Soleil, ce qui rend la chevelure très brillante.

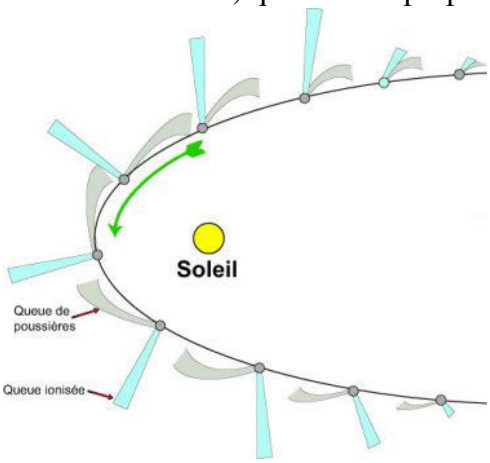
www.devoir-de-philosophie.com/dissertation-cometes-sciences-techniques-118358.html



chez.pierrot.perso.neuf.fr/astro10.html

Une partie de la chevelure est repoussée par le vent solaire et la pression de radiation du Soleil pour s'étirer et former la queue de la comète. La queue peut ainsi s'étirer pour avoir une longueur allant jusqu'à 300 millions de km (2 UA). La direction de la queue n'a rien à voir avec la direction vers laquelle la comète se déplace. Comme c'est le Soleil qui repousse le gaz, la queue est toujours dans la direction opposée au Soleil.

En fait, il peut y avoir deux queues pointant dans des directions différentes. Il y a premièrement la queue d'ions (les molécules sont ionisées par le rayonnement ultraviolet du Soleil) qui émet sa propre lumière bleue très brillante et qui est dans la direction opposée au Soleil puisque les ions sont très facilement poussés par le vent solaire. L'autre queue est faite de poussière. Elle ne fait que refléter la lumière du Soleil ce qui lui donne une teinte blanchâtre. Ces grains de poussière ont plutôt tendance à rester sur l'orbite de la comète, bien qu'ils soient aussi poussés par le vent solaire.



gap47.astrosurf.com/index.php/astro-debutants/lecons/cometes-et-asteroides/

On peut très bien voir ces deux queues sur l'image de la comète Hale-Bopp.

Le 29 mai 2023, 4526 comètes étaient répertoriées.
https://minorplanetcenter.net/mpc/summary

L'orbite des comètes

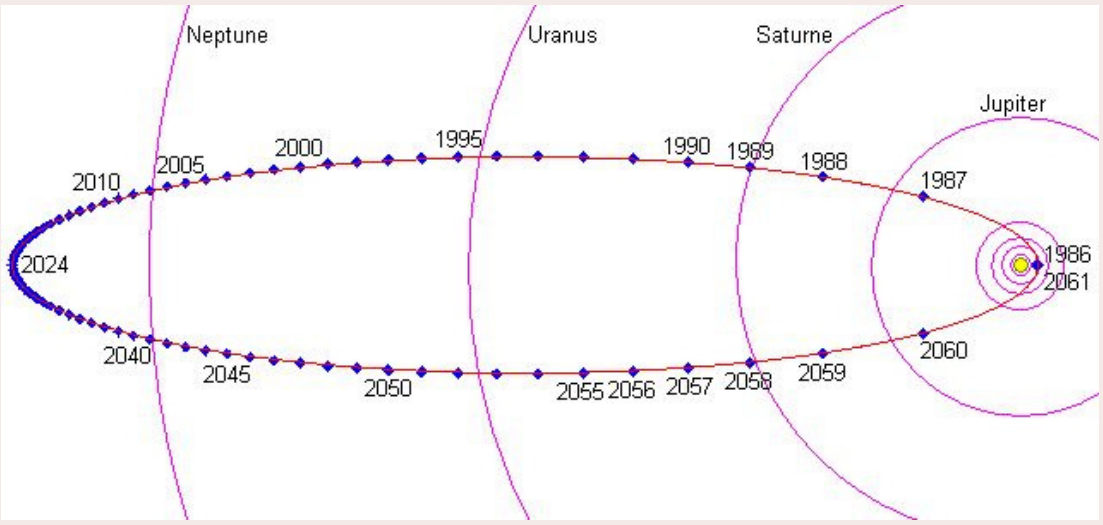
Les orbites elliptiques

Les comètes qui ont une orbite elliptique ont presque toujours des excentricités très élevées (mais rappelez-vous que l'excentricité des orbites elliptiques ne dépasse pas 1). La très grande majorité de comètes est sur des orbites avec des excentricités supérieures à 0,900.

Par exemple, la comète de Halley est une de ces comètes qui suivent une orbite elliptique. La distance entre la comète et le Soleil au périgée est de 0,586 UA alors qu'elle est de 35,1 UA à l'aphélie, pour une excentricité de 0,967.

Exemple 8.5.1

La comète de Halley se déplace sur orbite dont les distances à l'aphélie et au périhélie sont de r_a = 35,295 UA et r_p = 0,587 UA. (La masse du Soleil est 1,9885 x 10^{30} kg et l'unité astronomique est 1,496 x 10^{11} m.)



www.uwgb.edu/dutchs/PLANETS/Comets.HTM

a) Quelle est l'excentricité de cette orbite ?

L'excentricité est

$$\begin{aligned} e &= \frac{r_a - r_p}{r_a + r_p} \\ &= \frac{35,295UA - 0,587UA}{35,295UA + 0,587UA} \\ &= 0,9673 \end{aligned}$$

b) Quel est le demi-grand axe (a) de cette orbite ?

Le demi-grand axe est

$$\begin{aligned} a &= \frac{r_a + r_p}{2} \\ &= \frac{35,295UA + 0,587UA}{2} \\ &= 17,941UA \end{aligned}$$

c) Quelle est la période de la comète ?

La période vaut

$$\begin{aligned} T &= 2\pi\sqrt{\frac{a^3}{GM_c}} \\ &= 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\left(17,941UA \cdot 1,496\times10^{11}\,\frac{m}{UA}\right)^3}{6,6743\times10^{-11}\,\frac{Nm^2}{kg^2} \cdot 1,9885\times10^{30}\,kg}} \\ &= 2,398\times10^9\,s \\ &= 75,99 \text{ ans} \end{aligned}$$

d) Quelle est la vitesse au périhélie ?

La vitesse au périhélie est

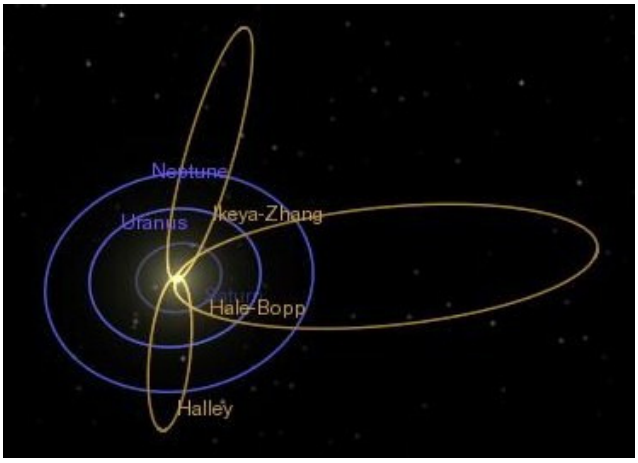
$$\begin{aligned} v_p &= \sqrt{\frac{GM_c}{a}\frac{1+e}{1-e}} \\ &= \sqrt{\frac{6,6743\times10^{-11}\,\frac{Nm^2}{kg^2} \cdot 1,9885\times10^{30}\,kg}{17,941UA \cdot 1,496\times10^{11}\,\frac{m}{UA}} \cdot \frac{1+0,9673}{1-0,9673}} \\ &= 54,53\,\frac{km}{s} \end{aligned}$$

e) Quelle est la vitesse à l'aphélie ?

La vitesse à l'aphélie est

$$v_a = \sqrt{\frac{GM_c}{a}\frac{1-e}{1+e}}$$
$$= \sqrt{\frac{6,6743\times10^{-11}\,\frac{Nm^2}{kg^2}\cdot 1,9885\times10^{30}\,kg}{17,941UA\cdot 1,496\times10^{11}\,\frac{m}{UA}}\cdot\frac{1-0,9673}{1+0,9673}}$$
$$= 0,907\,\frac{km}{s}$$

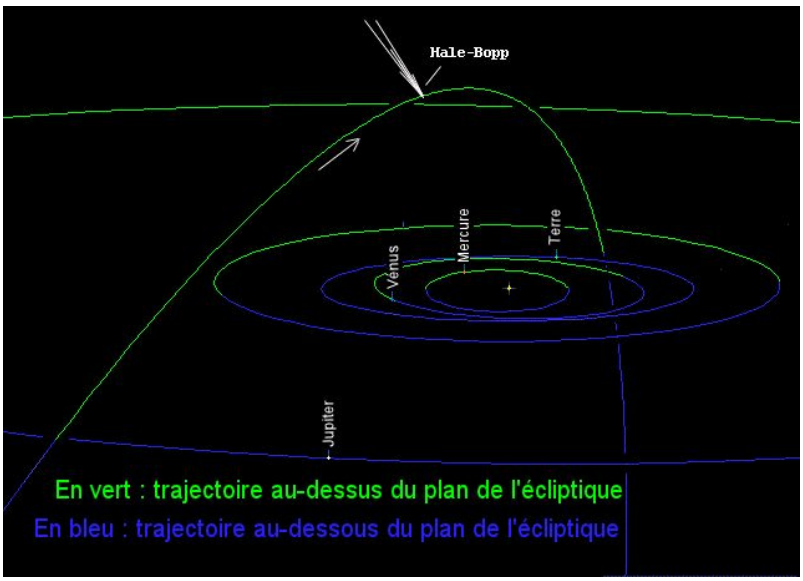
Voici quelques comètes sur des orbites elliptiques.



www.wingmakers.co.nz/universe/solar_system/Comets.html

Certaines ont des périodes assez courtes. Les comètes ayant une période inférieure à 200 ans sont appelées les comètes à courte période. La comète de Halley, avec une période de 76 ans, est une comète à courte période. Très souvent, le plan de leur orbite est assez près du plan de l'écliptique. Un peu plus de 500 comètes à courtes périodes sont connues.

Si la période est supérieure à 200 ans, on parle d'une comète à longue période. Les périodes peuvent même atteindre quelques millions d'années. Par exemple, la comète de Hale-Bopp a une période d'un peu plus de 2500 ans, ce qui l'amènera à une distance de 371 UA du Soleil à l'aphélie. Les orbites de ces comètes ne sont pas nécessairement dans le plan de l'écliptique. Voyez, par exemple, la trajectoire de la comète Hale-Bopp. Le plan de l'orbite de cette comète est très incliné par rapport au plan de l'écliptique.



eduscol.education.fr/planeto/pedago/systsol/cometes.htm

Autres trajectoires possibles

On se rappelle que la position d'un objet près d'une masse centrale est donnée par

$$r = r_p \frac{1+e}{1+e\cos\theta}$$

où e est l'excentricité qui vaut

$$e = \frac{v_p^2 r_p}{GM_c} - 1$$

On a déjà examiné les cas $e = 0$ (orbite circulaire) et $0 > e > 1$ (orbite elliptique).

Toutefois, il existe deux autres possibilités. Ce sont les cas où $e = 1$ (trajectoire parabolique) et où $e > 1$ (trajectoire hyperbolique). (Notez que ces 2 formules sont encore bonnes avec les trajectoires paraboliques et hyperboliques.)

Les trajectoires paraboliques

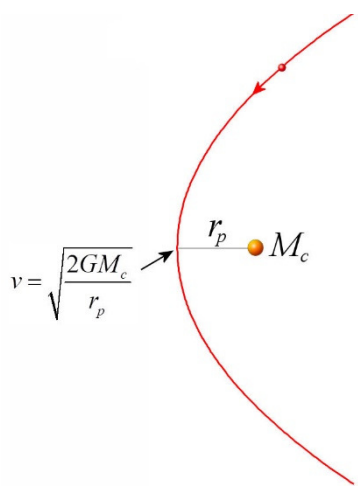
Si l'excentricité est exactement égale à 1, alors la forme de la trajectoire est une parabole. (En voici la preuve : https://physique.merici.ca/astro/parabolecartesien.pdf)
La masse centrale est au foyer de la parabole.

Si $e = 1$, alors on a

$$\frac{v_p^2 r_p}{GM_c} - 1 = 1$$

Si on isole la vitesse, on arrive à la formule suivante.

$$v_p = \sqrt{\frac{2GM_c}{r_p}}$$



C'est la vitesse de libération.

L'énergie de l'objet sur la trajectoire parabolique est

$$E_{mec} = -\frac{GM_c m(1-e)}{2r_p}$$

Puisque l'excentricité est 1, on arrive à une énergie mécanique nulle.

Le fait que la vitesse soit égale à la vitesse de libération et que l'énergie soit nulle indique que l'objet n'est pas lié à la masse centrale. L'objet fait donc un seul passage près de la masse centrale et ne revient plus jamais. Cela nous indique aussi que la vitesse est pratiquement nulle quand la comète est très loin de la masse centrale.

Avec une énergie mécanique nulle, la vitesse de l'objet se trouve facilement à partir de la position en utilisant la formule de l'énergie mécanique

$$0 = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GM_c m}{r}$$

Ce qui donne

Équation de la conservation de l'énergie pour un objet sur une trajectoire parabolique

$$v^2 = \frac{2GM_c}{r}$$

Exemple 8.5.2

Une comète suit une trajectoire parabolique autour du Soleil. Au point le plus près du Soleil, la vitesse de la comète est de 80 km/s.

a) Quelle est la distance entre le Soleil et la comète quand celle-ci est au plus près du Soleil (en UA) ?

Selon la conservation de l'énergie, on a

$$v_p^2 = \frac{2GM_c}{r_p}$$

$$\left(80\,000\,\tfrac{m}{s}\right)^2 = \frac{2 \cdot 6,6743\times10^{-11}\,\tfrac{kgm^2}{s^2} \cdot 1,9885\times10^{30}\,kg}{r_p}$$

$$r_p = 4,147\times10^{10}\,m$$

$$r_p = 0,2772\,UA$$

b) Quelle est la vitesse de la comète quand elle est à 2 UA du Soleil (en km/s) ?

Selon la conservation de l'énergie, on a

$$v^2 = \frac{2GM_c}{r}$$

$$v^2 = \frac{2 \cdot 6,6743\times10^{-11}\,\tfrac{kgm^2}{s^2} \cdot 1,9885\times10^{30}\,kg}{2 \cdot 1,496\times10^{11}\,m}$$

$$v^2 = 8,872\times10^{8}\,\tfrac{m^2}{s^2}$$

$$v = 29,79\,\tfrac{km}{s}$$

Les trajectoires hyperboliques

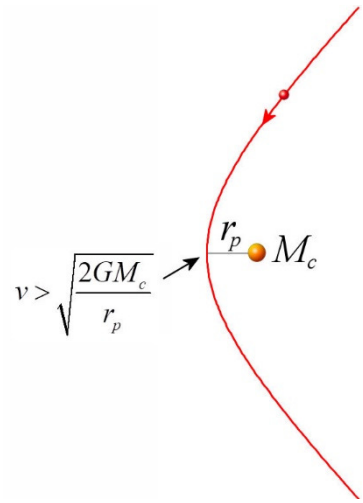
Si l'excentricité est supérieure à 1, alors la forme de la trajectoire est une hyperbole. (En voici la preuve : https://physique.merici.ca/astro/hyperbolecartesien.pdf)

Si $e > 1$, alors on a

$$\frac{v_p^2 r_p}{GM_c} - 1 > 1$$

Si on isole la vitesse, on arrive à

$$v_p > \sqrt{\frac{2GM_c}{r_p}}$$



La vitesse de l'objet au point le plus près est donc plus grande que la vitesse de libération.

L'énergie de l'objet sur la trajectoire hyperbolique est

$$E_{mec} = -\frac{GM_c m(1-e)}{2r_p}$$

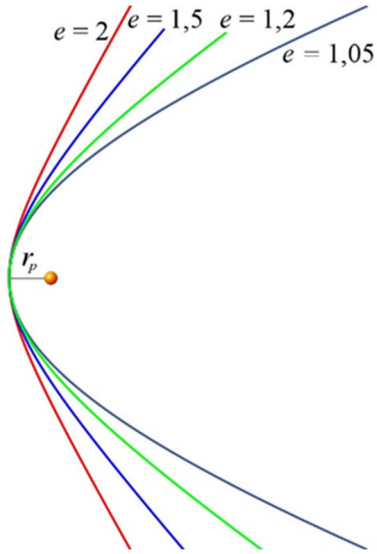
Puisque l'excentricité est supérieure à 1, l'énergie est positive

Le fait que la vitesse soit plus grande que la vitesse de libération et que l'énergie soit positive indique que l'objet n'est pas lié à la masse centrale. L'objet fait donc un seul passage près de la masse centrale et ne revient plus jamais.

L'excentricité

Comme toujours, l'excentricité est donnée par

$$e = \frac{v_p^2 r_p}{GM_c} - 1$$



La figure de droite montre comment change la forme de l'orbite hyperbolique en fonction de l'excentricité.

Les vitesses v_p et v_∞

Dans cette orbite, il y a deux vitesses importantes : la vitesse de l'objet quand il est au point le plus près de la masse centrale (v_p) et la vitesse de l'objet quand il est très loin de la masse centrale (v_∞). Avec une orbite parabolique, cette vitesse est $v_\infty = 0$. Avec une orbite hyperbolique, l'objet a encore de la vitesse quand il est très loin de la masse centrale.

On peut faire un lien entre v_∞ et v_p avec la loi de la conservation de l'énergie. Selon la conservation de l'énergie, on a

$$\frac{1}{2}mv_\infty^2 - \frac{GM_c m}{\infty} = \frac{1}{2}mv_p^2 - \frac{GM_c m}{r_p}$$

Cette équation nous donne la formule suivante.

Lien entre v_∞ et v_p

$$v_\infty^2 = v_p^2 - \frac{2GM_c}{r_p}$$

On peut aussi calculer l'excentricité à partir de ces vitesses. Pour y arriver, partons de la formule de l'excentricité de l'orbite

$$e = \frac{v_p^2 r_p}{GM_c} - 1$$

pour obtenir

$$\frac{GM_c}{r_p} = \frac{v_p^2}{e+1}$$

En utilisant cette valeur dans l'équation de la conservation de l'énergie, on obtient

$$\begin{aligned}
v_\infty^2 &= v_p^2 - \frac{2GM_c}{r_p} \\
&= v_p^2 - \frac{2v_p^2}{e+1} \\
&= v_p^2\left(1 - \frac{2}{e+1}\right) \\
&= v_p^2\left(\frac{1+e}{e+1} - \frac{2}{e+1}\right) \\
&= v_p^2\left(\frac{e+1-2}{e+1}\right) \\
&= v_p^2\left(\frac{e-1}{e+1}\right)
\end{aligned}$$

De là, on a

$$\begin{aligned}
v_\infty^2(e+1) &= v_p^2(e-1) \\
v_\infty^2 \cdot e + v_\infty^2 &= v_p^2 e - v_p^2 \\
v_\infty^2 e - v_p^2 e &= -v_\infty^2 - v_p^2
\end{aligned}$$

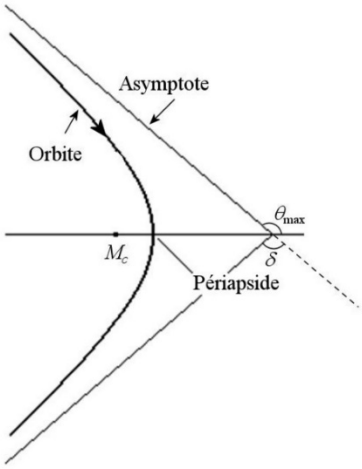
$$e\left(v_\infty^2 - v_p^2\right) = -v_\infty^2 - v_p^2$$

Si on isole e, on arrive à l'équation suivante.

Excentricité à partir de v_∞ et v_p pour un objet sur une trajectoire hyperbolique

$$e = \frac{v_p^2 + v_\infty^2}{v_p^2 - v_\infty^2}$$

L'angle maximum



Dans une hyperbole, il y a des lignes droites qui sont des asymptotes. Cela signifie que loin de la masse centrale, la trajectoire est pratiquement une ligne droite.

On peut assez facilement trouver l'angle $\theta_{\max}$ sur la figure. L'asymptote se trouve en sachant que l'objet est à une distance infinie dans cette direction. (De façon correcte, l'angle dans notre formule est mesuré à partir de la masse centrale et non pas à partir du croisement des deux asymptotes. Toutefois, quand l'objet est très loin de la masse centrale, l'angle mesuré à partir de la masse centrale et l'angle mesuré à partir du croisement des asymptotes sont pratiquement égaux.)

Si l'objet est à une distance infinie dans cette direction, alors le diviseur dans la formule de la distance en fonction de l'angle

$$r = r_p \frac{1+e}{1+e\cos\theta}$$

doit être nul. À l'angle maximum, on a donc

$$1 + e\cos\theta_{\max} = 0$$

On arrive donc à

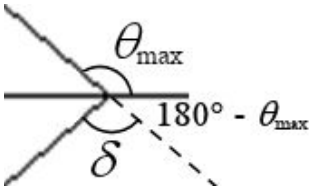
Valeur maximale de θ pour une trajectoire hyperbolique

$$\cos\theta_{\max} = -\frac{1}{e}$$

L'angle de déviation de l'objet

On peut alors trouver l'angle entre les deux asymptotes. Cet angle correspond à l'angle de déviation de l'objet en orbite (δ sur la figure).

Selon cette figure, on a



$$\delta + (180° - \theta_{max}) = \theta_{max}$$

Si on isole l'angle maximum, on a

$$\theta_{max} = \frac{\delta}{2} + 90°$$

On peut alors écrire

$$\cos\theta_{max} = \cos\left(\frac{\delta}{2} + 90°\right)$$

$$-\frac{1}{e} = \cos\left(\frac{\delta}{2} + 90°\right)$$

Puisque cos (x + 90°) = - sin x, on a

Changement de direction pour un objet sur une trajectoire hyperbolique

$$\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) = \frac{1}{e}$$

Exemple 8.5.3

Une comète sur une orbite hyperbolique ayant une excentricité de 1,25 a une vitesse de 20 km/s quand elle est très loin du Soleil.

a) Quelle sera la vitesse de la comète quand elle sera au plus près du Soleil ?

Cette vitesse est v_p. On peut trouver cette vitesse à partir de la formule de l'excentricité.

$$e = \frac{v_p^2 + v_\infty^2}{v_p^2 - v_\infty^2}$$

$$e\left(v_p^2 - v_\infty^2\right) = v_p^2 + v_\infty^2$$

$$ev_p^2 - ev_\infty^2 = v_p^2 + v_\infty^2$$

$$ev_p^2 - v_p^2 = v_\infty^2 + ev_\infty^2$$

$$v_p^2(e-1) = v_\infty^2(1+e)$$

$$v_p^2 = v_\infty^2\left(\frac{e+1}{e-1}\right)$$

$$v_p^2 = \left(20\,000\,\tfrac{m}{s}\right)^2\left(\frac{1,25+1}{1,25-1}\right)$$

$$v_p^2 = 3,6\times10^9 \tfrac{m^2}{s^2}$$
$$v_p = 60 \tfrac{km}{s}$$

b) Quelle sera la petite distance entre cette comète et le Soleil sur l'orbite ?

La plus petite distance est r_p. Pour trouver cette distance, on va utiliser l'équation de la conservation de l'énergie mécanique.

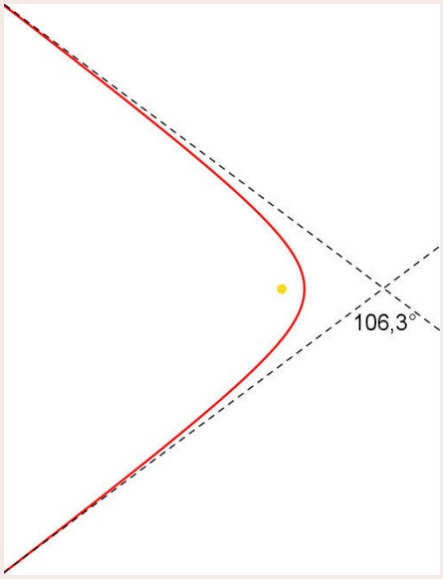
$$v_\infty^2 = v_p^2 - \frac{2GM_\odot}{r_p}$$
$$\left(2\times10^4 \tfrac{m}{s}\right)^2 = \left(6\times10^4 \tfrac{m}{s}\right)^2 - \frac{2\cdot 6,6743\times10^{-11} \tfrac{kgm^2}{s^2}\cdot 1,9885\times10^{30}\,kg}{r_p}$$
$$r_p = 8,2949\times10^{10}\,m$$
$$r_p = 0,5545UA$$

c) Quel est l'angle de déviation de la trajectoire de cette comète ?

L'angle est donné par

$$\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) = \frac{1}{e}$$
$$\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) = \frac{1}{1,25}$$
$$\delta = 106,3°$$

On peut voir cette orbite sur la figure de droite.



Les trajectoires possibles

On peut donc résumer les différentes trajectoires possibles avec le tableau suivant.

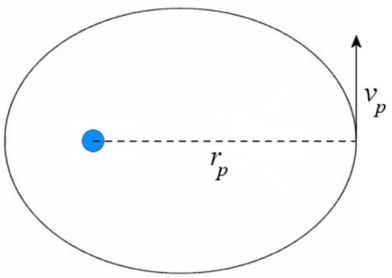
Vitesse	Trajectoire	Excentricité	Énergie mécanique
$v_p = \sqrt{\frac{GM_c}{r_p}}$	Circulaire	$e = 0$	Négative

$\sqrt{\frac{GM_c}{r_p}} < v_p < \sqrt{\frac{2GM_c}{r_p}}$	Elliptique	$0 < e < 1$	Négative
$v_p = \sqrt{\frac{2GM_c}{r_p}}$	Parabolique	$e = 1$	Nulle
$v_p > \sqrt{\frac{2GM_c}{r_p}}$	Hyperbolique	$e > 1$	Positive

On peut alors se demander ce qui arrive si

$$v_p < \sqrt{\frac{GM_c}{r_p}}$$

En fait, cette situation est impossible. Si on a une vitesse inférieure à celle qu'on doit avoir pour une orbite circulaire, alors il y a trop de force centripète par rapport à ce qu'on doit avoir pour avoir une orbite circulaire à cette vitesse et l'objet va se rapprocher de la masse centrale. On obtiendra alors l'orbite elliptique montrée à droite.



Cette situation est impossible parce qu'on a défini r_p comme étant la distance la plus près de la masse centrale, ce qui n'est pas le cas sur cette figure. On ne peut donc pas avoir une vitesse inférieure à celle de l'orbite circulaire au point le plus près de la masse centrale.

Qu'est-ce qui détermine la trajectoire que va suivre une comète ?

Les comètes sur des orbites circulaires ou elliptiques ont des énergies négatives. Cela signifie que l'objet qui suit une orbite de ce type ne peut pas s'éloigner infiniment du Soleil. Rappelez-vous, un objet ne peut pas aller à un endroit où l'énergie potentielle est supérieure à son énergie mécanique. Comme l'énergie gravitationnelle du Soleil est nulle quand on est très loin du Soleil, les objets qui ont une énergie négative doivent rester près du Soleil. Les mouvements des comètes sur ces orbites sont donc périodiques, ce qui signifie que ces comètes reviennent près du Soleil à intervalle régulier. C'est ce genre d'orbite qui va suivre une comète qui s'est formée dans le Système solaire.

Avec une trajectoire parabolique, l'énergie est nulle. Cela signifie qu'une comète sur une orbite parabolique a une vitesse pratiquement nulle quand elle est très loin du Soleil. Cela suggère fortement que ces comètes proviennent du Système solaire, mais qu'elles se sont formées très loin du Soleil. La comète, initialement très loin du Soleil avec une vitesse très petite, s'approche alors du Soleil pour faire un seul passage. Elle s'éloigne ensuite pour retourner à une distance très grande où elle arrivera avec une vitesse pratiquement nulle. L'objet ne revient pas puisque son énergie n'est pas négative, ce qui signifie que l'objet n'est pas lié à la masse centrale.

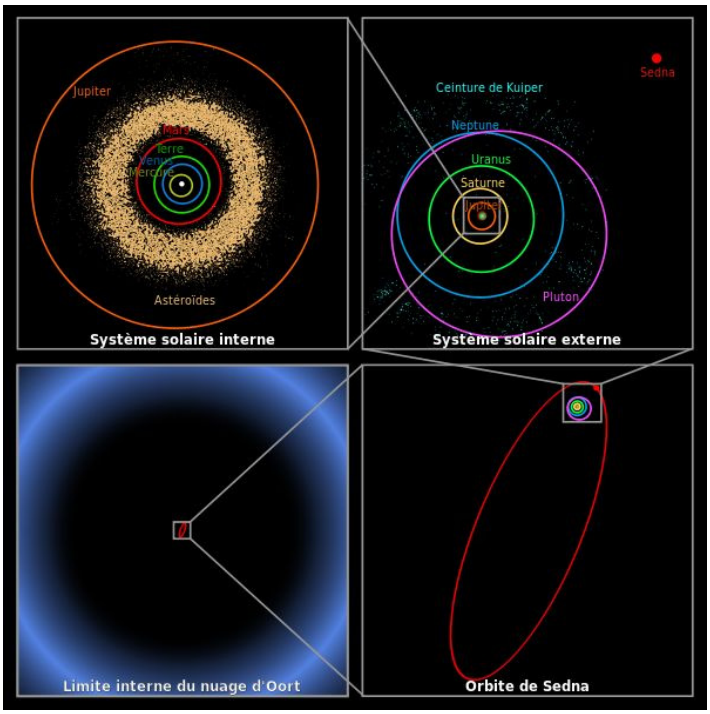
Avec une trajectoire hyperbolique, l'énergie est positive. Cela signifie que les comètes sur des trajectoires hyperboliques ont une certaine vitesse même quand elles sont très loin du Soleil. Cela laisse penser que les objets qui suivent une trajectoire hyperbolique arrivent de l'extérieur du Système solaire pour faire un seul passage près du Soleil pour repartir ensuite très loin du Soleil et ne jamais revenir.

Origine des comètes

Plusieurs comètes suivent des orbites elliptiques et ces comètes devraient provenir du Système solaire. Mais même les comètes qui suivent des orbites hyperboliques semblent provenir du Système solaire puisque l'excentricité de ces comètes ne dépasse pas beaucoup la valeur de 1. Par exemple, la comète Morehouse (comète visible en 1908) était une comète possédant une des plus grandes excentricités observées et elle avait une excentricité de 1,00073. Même si la valeur de l'excentricité est supérieure à 1, elle n'est pas assez loin de 1 pour qu'on puisse conclure sans l'ombre d'un doute que cette comète provient de l'extérieur du Système solaire. Peut-être qu'une perturbation faite par une planète a modifié la trajectoire pour faire augmenter l'excentricité légèrement au-dessus de 1. C'est possible puisque c'est d'ailleurs une perturbation faite par Jupiter qui a fait augmenter l'excentricité de la comète C/1980 E1. Son excentricité monta alors jusqu'à 1,057, la plus grande observée avant 2017.

Ainsi, on pense que les comètes proviennent d'une vaste zone sphérique en périphérie du Système solaire, une région appelée le *nuage de Oort*. Ce nuage commencerait peut-être à une distance de 2000 UA pour se terminer à une distance de 70 000 UA (0,8 al) du Soleil.

Il y aurait plusieurs milliers de milliards de noyaux de comète avec un diamètre supérieur à 1 km dans le nuage de Oort. Cependant, la masse totale de tous ces noyaux serait à peine égale à 5 fois la masse de la Terre.



commons.wikimedia.org/wiki/File:Oort_cloud_Sedna_orbit-fr.svg

Des perturbations entre les objets du nuage de Oort ou faites par des objets à l'extérieur du Système solaire pourraient changer le mouvement d'un des noyaux de comète dans le nuage de Oort pour le diriger vers le Soleil où il deviendra une comète à longue période ou avec une orbite hyperbolique avec une excentricité à peine supérieure à 1. Un passage trop

près d'une planète jovienne peut ensuite complètement transformer l'orbite de la comète pour qu'elle devienne une comète à courte période.

On a observé seulement 2 objets qui semblent provenir de l'extérieur du Système solaire. Le 19 octobre 2017, on observa un objet, qu'on nomma plus tard 'Oumuamua, qui avait une excentricité de 1,197. Cette fois-ci, l'excentricité était assez grande pour qu'on considère que l'objet provient de l'extérieur du Système solaire (d'autant plus qu'il ne passa pas près d'une planète qui aurait pu faire augmenter son excentricité). Même si l'objet passa à 0,254 UA du Soleil, il n'y eut jamais de queue. Ce n'est donc pas une comète, mais plutôt quelque chose qui ressemble à un astéroïde. Le 30 aout 2019, on découvre un 2e objet provenant de l'extérieur du Système solaire. Cette fois-ci, c'est une comète, la comète Borissov. Avec une excentricité de 3,357, elle arrive sans l'ombre d'un doute de l'extérieur du Système solaire. Elle est passée au plus près du Soleil (à 2,01 UA) le 19 décembre 2019. Cette trajectoire signifie que la vitesse à l'infini (v_∞) de cette comète est de 30,1 km/s.

8.6 LES MÉTÉOROÏDES

Il y a de nombreux astéroïdes dans le Système solaire, mais il y a encore plus de météoroïdes. Les météoroïdes sont des petits objets du Système solaire qui ont une taille se situant entre 0,1 mm et 50 m.

Beaucoup de ces météoroïdes entrent en collision avec la Terre chaque année. On estime que 25 millions de ces météoroïdes frappent la Terre chaque jour, pour une masse totale de 100 tonnes par jour. La très grande partie de cette matière qui tombe n'est constituée que de minuscules grains de poussière, mais parfois on a affaire à des objets un peu plus gros. En moyenne, il tombe un météoroïde de la taille d'un ballon de basketball chaque jour et un météoroïde de la taille d'une petite voiture tous les 8 mois.

Ces météoroïdes arrivent dans l'atmosphère avec des vitesses de l'ordre de plusieurs kilomètres par seconde (entre 11 et 72 km/s).

Étoiles filantes, météores et bolides

Quand un météoroïde arrivant de l'espace traverse l'atmosphère à grande vitesse, il s'échauffe rapidement et trace dans le ciel une trajectoire lumineuse. La trainée lumineuse sera plus ou moins importante selon la taille et la composition du météoroïde.

apod.nasa.gov/apod/ap081011.html

Voici les noms donnés à ces trainées lumineuses selon la masse de l'objet traversant l'atmosphère.

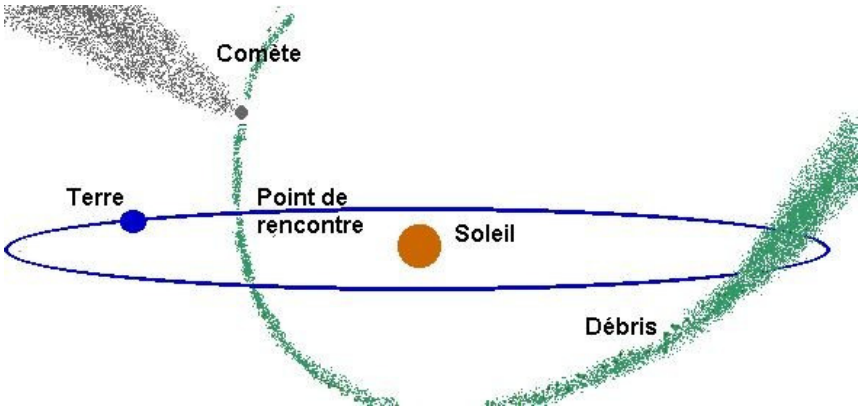
Phénomène	Masse	Altitude de la trainée lumineuse	Durée de la trainée lumineuse
Étoile filante	Ordre du gramme	110-80 km	1 à 2 s
Météore	Ordre du kilogramme	80-50 km	2 à 5 s
Bolide	De 0,5 T à 10T, parfois encore plus	80-13 km	5 à 40 s

Après cette phase lumineuse dans l'atmosphère, il est possible que le météoroïde se soit complètement volatilisé. Parfois, il arrive qu'une partie de l'objet survive à cette traversée et aille heurter le sol. On parle alors de *météorite.*

Les pluies d'étoiles filantes

Bien qu'on puisse observer une étoile filante à tout moment de l'année, il y a des moments de l'année où il y a des pluies d'étoiles filantes. Il y a une pluie d'étoiles filantes quand la Terre passe assez près (si c'est possible) de la trajectoire d'une comète.

Quand la glace d'une comète s'évapore, elle entraine avec elle beaucoup de poussière et de petites roches qui couvrent la surface de la comète. Ces débris finissent par se retrouver en orbite autour du Soleil en suivant l'orbite de la comète. Quand la Terre passe près de l'orbite de la comète, plusieurs de ces débris de comète entrent en collision avec la Terre.



www.faaq.org/bibliotheque/systemesolaire/bellt700.htm

Les débris d'une comète rencontrent la Terre toujours au même endroit sur l'orbite de la Terre, ce qui veut dire que les pluies dues à une certaine comète reviennent à la même date chaque année. Le 12 aout, la Terre passe près de la trajectoire de la comète de Swift-Tuttle et il y a une pluie d'étoiles filantes. Cette comète a une période de 133 ans et elle passa au périhélie pour la dernière fois en 1992.

De plus, les particules sur l'orbite de la comète frappent toutes la Terre avec le même angle, ce qui donne l'impression que les étoiles filantes proviennent toutes du même endroit dans le ciel.

Voici, par exemple, des étoiles filantes faisant partie des perséides. Ces étoiles filantes semblent toutes provenir d'un point, appelé *radiant,* dans la constellation de Persée, d'où le nom de perséides. C'est le nom donné à la pluie d'étoiles filantes du 12 aout. On peut observer en moyenne 100 étoiles filantes à l'heure au maximum de l'intensité des perséides.

espacepourlavie.ca/perseides

Il y a 70 pluies d'étoiles filantes chaque année. Vous pouvez en voir la liste sur ce site.
https://fr.wikipedia.org/wiki/Pluie_de_m%C3%A9t%C3%A9ores

Les météorites

Qu'est-ce qu'un météorite ?

On a un météorite si une partie du météoroïde atteint le sol. L'image de droite montre un gros météorite métallique tombé en Namibie.

quirkytravelguy.com/wp-content/uploads/2018/08/worlds-largest-meteorite-hoba.jpg

Les météoroïdes sont généralement des morceaux d'astéroïdes ou de comètes. La plupart des météoroïdes qui frappent la Terre proviennent de comètes et sont complètement vaporisés lors de la traversée de l'atmosphère. Par contre, les météoroïdes qui survivent à la traversée de l'atmosphère sont très souvent des morceaux d'astéroïdes. On a donc la règle suivante.

La plupart des météoroïdes proviennent de comètes.
La plupart des météorites proviennent d'astéroïdes.

Composition

Il y a 3 principaux types de météorites : les météorites rocheux, les météorites métalliques et les sidérolites.

Météorites rocheux : Ils sont composés de roches ayant des compositions similaires à celles de la Terre les plus courantes, mais avec un peu de fer et de nickel. Ils ont une densité d'environ 3000 kg/m³. 93 % des météorites sont rocheux.

Météorites métalliques : Ils sont souvent faits d'un alliage de 85 % de fer et de 15 % de nickel. 6 % des météorites sont métalliques.

Sidérolites ou météorites mixtes : Ils sont composés presque à parts égales de roches et de métaux. Seulement 1 % des météorites sont des sidérolites.

Environ 80 % des météorites rocheux font partie de la sous-catégorie des chondrites. Les chondres sont des petites sphères formées dans l'espace à partir de gouttelettes de roches partiellement ou totalement fondues. Les chondrites sont donc des météorites formés de ces petites sphères, ce qui signifie qu'elles ont une composition hétérogène. Les chondrites carbonées sont riches en carbone et en molécules contenant du carbone (incluant même des acides aminés, qui sont à la base de la vie). Ces molécules sont fragiles et auraient été détruites si la température du météorite avait dépassé 500 K pour une durée de temps significative. Cela montre que ces météorites n'ont pas subi de transformations majeures et que leur composition devrait ressembler à la composition originale du Système solaire.

en.wikipedia.org/wiki/Chondrite

On pense que les météorites métalliques proviennent du cœur métallique d'une planète alors que les météorites rocheux proviennent du manteau ou de coulées volcaniques d'une planète. En étudiant la grosseur des cristaux dans les météorites métalliques, on peut déduire le rythme de refroidissement du métal, ce qui permet de déterminer la taille de la planète d'origine. Selon toute vraisemblance, elles proviennent de planètes ayant des rayons entre 300 et 600 km qui ont été détruites par les nombreuses collisions qu'il y a eu lors de la formation du Système solaire.

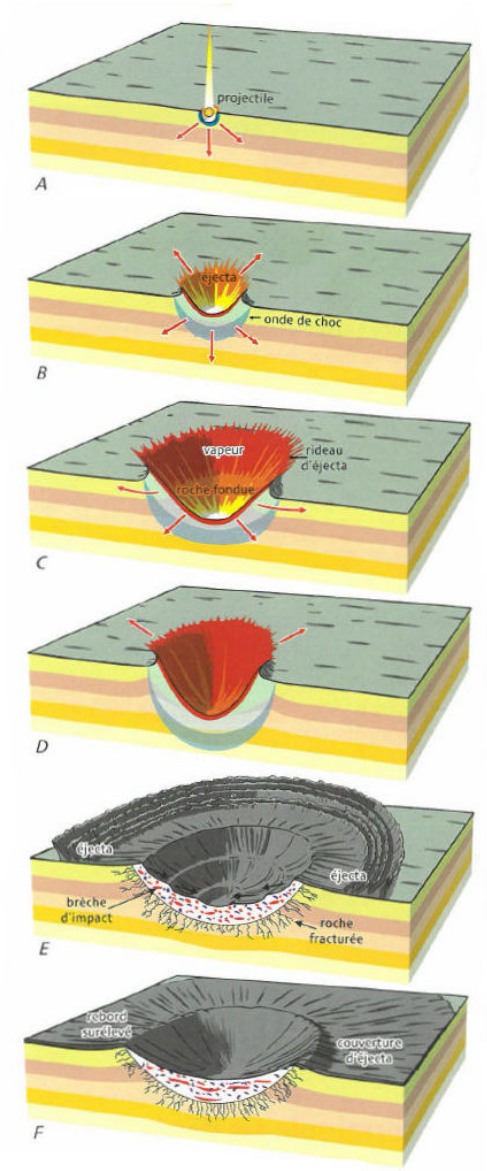
Certains météorites proviennent même directement de la Lune ou de Mars. Ces météorites ont été créés quand un violent impact sur la Lune ou sur Mars a projeté des roches de la surface dans l'espace.

Cratère

En frappant le sol, le météorite va créer un cratère. Voici le cratère créé par un météorite de 3 m de diamètre le 15 septembre 2007 à Carancas au Pérou.

www.otsimrat.net/kraater/Carancas_crater.html

Quand il y a un impact avec le sol, il se forme un cratère qui a un diamètre 10 à 25 fois plus grand que le diamètre du météorite selon la vitesse et l'angle d'impact.



L'image de gauche montre comment se forme les cratères formés par des météorites ayant au maximum un diamètre de 200 m et qui vont former un cratère ayant jusqu'à 5 km de diamètre.

Les étapes de la formation sont : l'impact (*A*), l'excavation (*B* à *D*) et la modification (*E* et *F*). Tout cela se passe en quelques secondes.

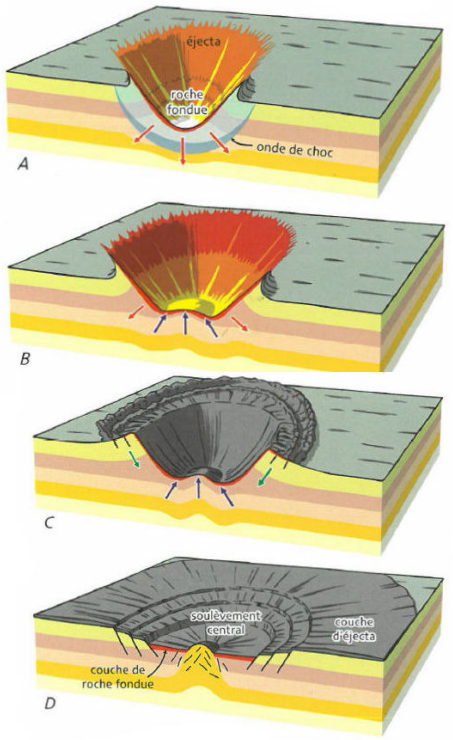
L'impact crée une onde de choc qui se propage dans le sol durant la période d'excavation. Pendant ce temps, de la matière provenant de la surface et du météorite est projetée dans les airs pour former un éjecta ou un rideau d'éjecta. Cette matière peut avoir été vaporisée, fondue ou choquée par l'impact.

En *D*, le bol formé par l'impact a atteint sa taille maximale et les bords du cratère commencent à s'effondrer dans le fond du cratère pour former la brèche d'impact (un agglomérat de débris). Sous la brèche d'impact, l'onde de choc a formé de nombreuses fractures dans les roches.

Une bonne partie de l'éjecta retombe finalement tout autour du cratère. En moyenne, la profondeur du cratère sera de 1/6e du diamètre du cratère.

Fédération canadienne des sciences de la Terre, Quatre milliards d'années d'histoire, Éditions multimondes pour toutes les figures de formation de cratères

Le résultat est un peu différent pour des cratères ayant plus de 3 km de diamètre.

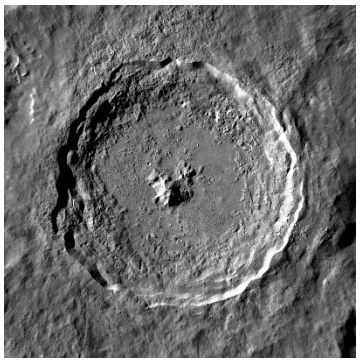


Comme avec les météorites plus petites, il y a excavation et formation d'un éjecta. Cependant, le centre du fond du cratère va rebondir et commencer à se soulever à la fin de la période d'excavation.

Les roches environnantes (plusieurs dizaines de km) doivent s'ajuster en formant de grandes fractures.

Dans sa forme finale (figure *D*), qui prendra quelques années pour se stabiliser, on a un pic central entouré d'une zone plate recouverte de roche fondue puis d'un rebord fortement fissuré. La couche de roche fondue peut prendre des centaines de millions à se cristalliser entièrement pour les plus gros cratères.

L'éjecta peut couvrir une zone importante. Pour de très gros météorites, l'éjecta peut même recouvrir la planète entière.



La remontée du pic centrale se produit parce que l'impact compresse beaucoup les roches et la croute au centre du cratère. Quand ces roches et la croute se décompressent par la suite, le centre du cratère remonte, formant un pic rocheux au centre du cratère. On remarque ces pics rocheux dans tous les grands cratères, incluant ceux sur la Lune, comme on peut le voir sur cette image du cratère Tycho.

en.wikipedia.org/wiki/Tycho_(lunar_crater)

On connait actuellement 190 cratères d'impact sur Terre (12 décembre 2024).

https://www.passc.net/EarthImpactDatabase/New%20website_05-2018/Index.html

www.nyrockman.com/peekskill_metorite_car.htm

Parfois, on n'est pas trop chanceux, et le cratère se fait sur notre Chevrolet, comme cela s'est produit en 1992 à Peekskill en Pennsylvanie.

Tcheliabinsk 2013

Le 15 février 2013, un objet dont la masse se situe entre 7000 et 10 000 tonnes (diamètre de 15 à 17 mètres) arrivant de l'espace traverse l'atmosphère au-dessus de Tcheliabinsk en Russie.

www.francetvinfo.fr/monde/europe/video-la-pluie-de-meteorites-a-seme-la-panique-en-russie_251405.html

Ce météoroïde a toutefois explosé avant d'atteindre le sol. L'explosion, équivalent à 30 fois la bombe atomique d'Hiroshima, s'est produite à une altitude de 20 km au-dessus de la ville. Près d'une minute après avoir vu l'explosion, l'onde de choc arrivait sur la ville, produisant des dommages assez importants.

Comme beaucoup de Russes ont des caméras vidéo dans leur auto, on a beaucoup de films de la traversée du bolide dans l'atmosphère et de l'arrivée de l'onde de choc.
https://www.youtube.com/watch?v=EhNL-YJFxOM
https://www.youtube.com/watch?v=tq02C_3FvFo

Le superbolide de Tcheliabinsk n'a aucun lien avec le passage de l'astéroïde 2012 DA_{14} très près de la Terre, même si ces deux évènements se sont produits le même jour.

8.7 DES IMPACTS PLUS IMPORTANTS

Il peut arriver qu'un objet plus gros qu'un météoroïde (donc ayant un diamètre supérieur à 50 m) frappe la Terre. L'énergie libérée est alors plus importante et le cratère d'impact, appelé *astroblème*, sera beaucoup plus imposant.

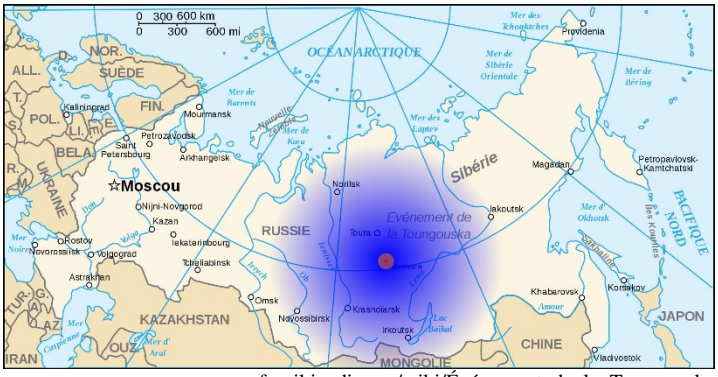
Le cratère de Barrington

Il y a 50 000 ans, un météorite de 50 mètres de diamètre frappait le sol en Arizona. L'explosion résultante, d'une puissance de 150 fois la bombe atomique d'Hiroshima, créa un cratère d'un diamètre variant entre 1200 et 1400 m et d'une profondeur de 170 m.

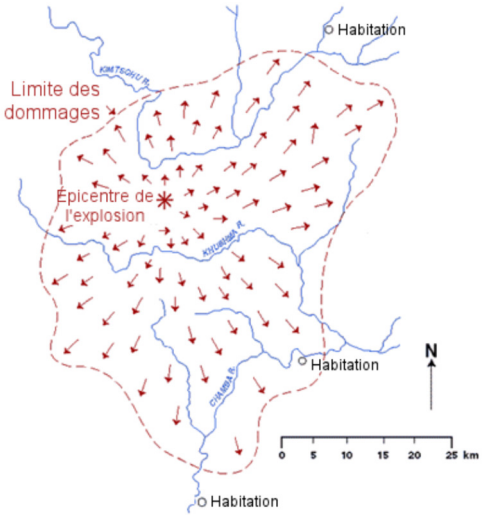
twistedsifter.com/2012/04/barringer-meteor-crater-arizona-usa/

Toungouska

Le 30 juin 1908, un objet d'environ 100 000 tonnes arrivant de l'espace traverse l'atmosphère au-dessus de Toungouska en Sibérie.



fr.wikipedia.org/wiki/Événement_de_la_Toungouska



www.sott.net/article/148819-Tunguska-the-Horns-of-the-Moon-and-Evolution

En traversant l'atmosphère, le bolide a explosé à une altitude de 8 km. Cette explosion a libéré l'équivalent de 1000 fois la bombe atomique d'Hiroshima. L'explosion rasa la toundra jusqu'à une distance maximale de 45 km de l'explosion.

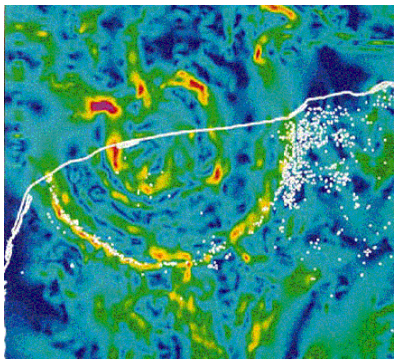
passeurdesciences.blog.lemonde.fr/2013/02/15/le-jour-ou-un-meteore-a-vraiment-devaste-une-region-russe/

Chixulub

Ce cratère, d'un diamètre de 180 km, aurait été créé par la collision d'un météorite d'environ 10 km de diamètre il y a 65 millions d'années.

La collision libéra beaucoup d'énergie et eut de vastes conséquences à la surface de la Terre. Une telle collision projette une quantité importante de débris dans l'atmosphère qui, après l'enfer de l'explosion, bloqueront les rayons solaires provoquant la mort des plantes et un refroidissement de la planète. Les conséquences de cet impact furent responsables, du moins en partie, de l'extinction des dinosaures.

www.sciencephoto.com/media/1005465/view/chicxulub-crater-map



Le cratère est assez difficile à voir aujourd'hui, mais on détecte sa présence par les variations du champ gravitationnel (figure de gauche).

Il est important de noter que ce ne sont pas tous les paléontologues qui pensent que l'extinction des dinosaures a été provoquée par la chute d'un météorite. D'autres mécanismes d'extinction probables ont été proposés et le débat se poursuit.

www.sheppardsoftware.com/Mexicoweb/factfile/Unique-facts-Mexico4.htm

Les cratères au Québec

Il y a plusieurs cratères au Québec. Examinons-en 3 ici.

www.miguasha.ca/mig-fr/lextinction_de_la_fin_du_devonien.php

fr.wikipedia.org/wiki/Cratère_des_Pingualuit

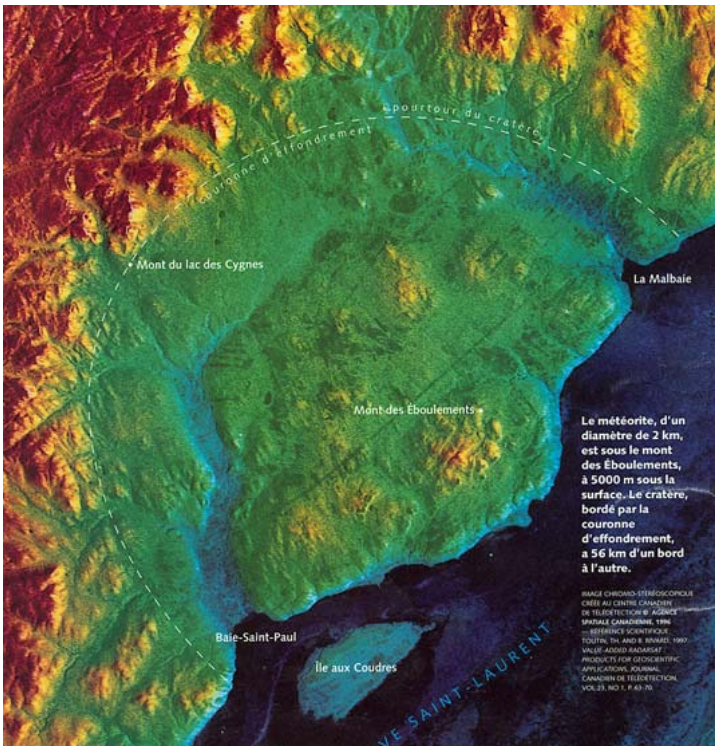
Le plus récent est le cratère des Pingualuit, aussi appelé cratère du Nouveau-Québec. Âgé d'à peine 1,6 million d'années, il a un diamètre de 3,44 km et une profondeur de 400 m.

Un des plus grands cratères du monde (le 6e plus grand) est le cratère de Manicouagan. Âgé de 214 millions d'années, il a un diamètre de 72 km et aurait été fait par un astéroïde de 5 km de diamètre.

fr.wikipedia.org/wiki/Réservoir_Manicouagan

Le cratère le plus accessible est sans aucun doute le cratère de Charlevoix, vieux de 325 millions d'années. D'un diamètre de 56 km, il aurait été créé par un météorite de 2 km de diamètre.

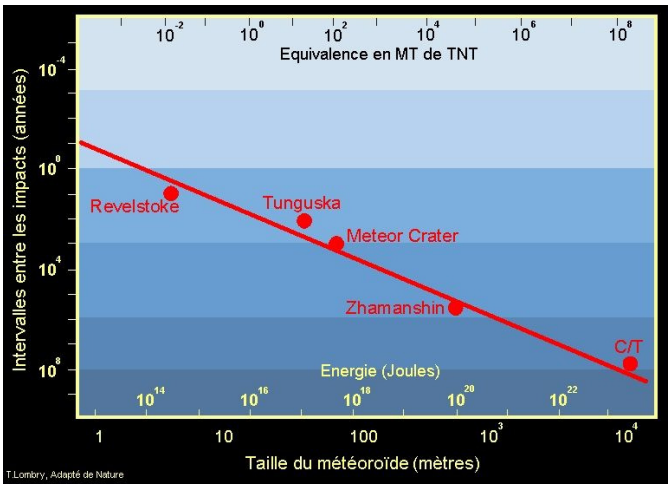
Les cratères de Manicouagan et de Charlevoix montrent clairement la remontée du centre du cratère après l'impact



www.lessourcesjoyeuses.com/organisme.html

La fréquence des impacts majeurs

Beaucoup des cratères présentés précédemment résultent d'impacts importants ayant eu des conséquences majeures sur Terre. Certains sont même en partie responsables de grandes extinctions d'animaux. Évidemment, cela nous amène à nous demander si de tels impacts se produisent souvent. C'est à cette question que répondent ce graphique et ce tableau.



www.astrosurf.com/luxorion/impacts4.htm

Taille	Puissance de l'impact (en MT de TNT)	Période (ans)	Diamètre du cratère
5 m	0,006	4	Explose à 40 km d'altitude
10 m	0,050	20	Explose à 30 km d'altitude
50 m	6	650	Explose à 10 km d'altitude
100 m	50	3 000	1,2 km
250 m	750	25 000	4 km
500 m	6000	100 000	7 km
1 km	50 000	500 000	14 km
10 km	50 000 000	100 000 000	140 km

(À titre de comparaison, la puissance de la bombe atomique d'Hiroshima fut d'environ 0,015 MT de TNT.)

(Cette table suppose que le météorite est rocheux, qu'il a une densité de 2600 kg/m³, une vitesse de 17 km/s et qu'il arrive vers le sol avec un angle de 45°. Source : en.wikipedia.org/wiki/Impact_event.)

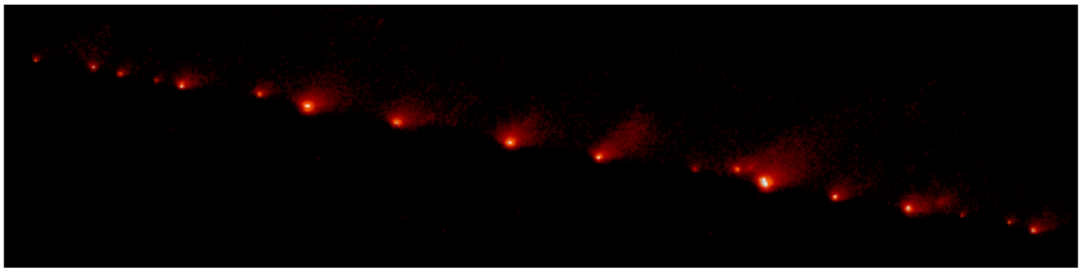
Les évènements similaires à celui de Toungouska se produisent donc environ une fois par 100 ans, ceux similaires au cratère de Barrington (*Meteor Crater* sur le graphique) se produisent une fois par 1000 ans, alors que des évènements similaires à celui de Chixulub (C/T sur le graphique) se produisent en moyenne une fois par 100 millions d'années.

Un météorite doit avoir au moins une taille d'environ 200 m et doit libérer une énergie de 10^{19} J pour qu'il y ait assez de poussière projetée dans l'atmosphère pour qu'il y ait des effets climatiques importants à la surface de la Terre. Cela se produit, en moyenne, tous les 25 000 ans environ.

On peut dire avec assez d'assurance qu'un météorite de 500 m de diamètre ferait des millions de morts alors qu'on atteindrait fort probablement le milliard de victimes avec un météorite de 1 km de diamètre.

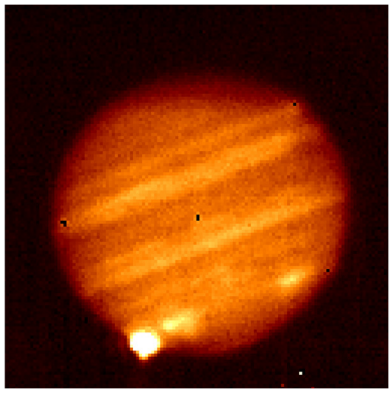
Un impact de comète sur Jupiter

En juillet 1994, la comète Shoemaker-Levy 9 entrait en collision avec Jupiter. En fait, la comète avait déjà été capturée par Jupiter et tournait en orbite autour de la planète. La comète avait éclaté en morceau en passant à l'intérieur de la limite de Roche de Jupiter en 1992. Il arrive parfois que des comètes éclatent en morceau quand elle s'approche trop d'un autre corps. On a vu parfois des comètes éclatées en morceaux lors d'un passage trop près du Soleil. Voici les différents fragments de cette comète se suivant sur l'orbite de la comète.



/fr.wikipedia.org/wiki/Comète_Shoemaker-Levy_9

Ces fragments ont ensuite percuté Jupiter à tour de rôle en 1994, laissant de grandes marques dans l'atmosphère de Jupiter.



www.cfa.harvard.edu/~jhora/mirac/sl9raw.html

fr.wikipedia.org/wiki/Comète_Shoemaker-Levy_9

Le plus grand de ces fragments, d'un diamètre de 2 km, aurait creusé un cratère d'une cinquantaine de kilomètres de diamètre s'il avait frappé la surface de la Terre. Il aurait alors eu un impact majeur sur le climat de la Terre.

RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

Condition pour avoir une planète ou une planète naine

$$R > \sqrt{\frac{3S}{2\pi G\rho^2}}$$

Rythme de changement d'angle d'une planète par rapport aux étoiles (à l'opposition)

$$\frac{\theta}{\Delta t} = \frac{360°}{365,25\,j} \cdot \frac{\frac{1UA}{r}}{1+\sqrt{\frac{1UA}{r}}}$$

Équation de la conservation de l'énergie pour un objet sur une trajectoire parabolique

$$v^2 = \frac{2GM_c}{r}$$

Lien entre v_∞ et v_p

$$v_\infty^2 = v_p^2 - \frac{2GM_c}{r_p}$$

Excentricité à partir de v_∞ et v_p pour un objet sur une trajectoire hyperbolique

$$e = \frac{v_p^2 + v_\infty^2}{v_p^2 - v_\infty^2}$$

Valeur maximale de θ pour une trajectoire hyperbolique

$$\cos\theta_{\max} = -\frac{1}{e}$$

Changement de direction pour un objet sur une trajectoire hyperbolique

$$\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) = \frac{1}{e}$$

Orbites possibles

Vitesse	Trajectoire	Excentricité	Énergie mécanique
$v_p = \sqrt{\frac{GM_c}{r_p}}$	Circulaire	$e = 0$	Négative
$\sqrt{\frac{GM_c}{r_p}} < v_p < \sqrt{\frac{2GM_c}{r_p}}$	Elliptique	$0 < e < 1$	Négative
$v_p = \sqrt{\frac{2GM_c}{r_p}}$	Parabolique	$e = 1$	Nulle
$v_p > \sqrt{\frac{2GM_c}{r_p}}$	Hyperbolique	$e > 1$	Positive

EXERCICES

Utilisez les données suivantes pour ces exercices.

Terre	Masse = $5{,}9722 \times 10^{24}$ kg	Rayon = 6371 km
Soleil	Masse = $1{,}9885 \times 10^{30}$ kg	

8.1 Planètes naines et petits objets

1. Imaginons qu'une planète soit faite d'aluminium. Quel est le rayon minimum d'une telle planète doit avoir pour être sphérique, sachant que, pour ce type d'aluminium, la densité est de 2750 kg/m³ et la contrainte ultime de compression est $S = 2 \times 10^8$ Pa ?

2. On a un corps céleste qui est formé de 10^{21} kg de roche. Est-ce que ce corps est sphérique ou non ? (Rappel : pour la roche, $S = 2 \times 10^8$ Pa et $\rho = 2300$ kg/m³.)

8.2 La mesure de la distance des petits objets dans le Système solaire

3. Un objet transneptunien est à 55 UA de la Terre. Vu de la Terre à l'opposition, de combien change l'angle de cet objet par rapport aux étoiles en 14 jours ?

4. Vu de la Terre, on observe un objet quand il est en opposition avec le Soleil. Pendant 6 jours, la position angulaire de cet objet par rapport aux étoiles change de 0,08°. Quel est le rayon de l'orbite de cet objet ?

8.4 La ceinture de Kuiper

5. Quand Sedna est au périhélie, la distance entre le Soleil et Sedna est 76,06 UA et la vitesse de Sedna est de 4,6482 km/s.

   a) Quelle est la période de révolution de Sedna autour du Soleil ?
   b) Quelle est la distance entre Sedna et le Soleil à l'aphélie ?

6. Quelle est la température moyenne à la surface de Pluton quand elle est au plus loin du Soleil (en °C) ? À ce moment, la distance entre le Soleil et Pluton est de 49,32 UA et l'albédo de Pluton est de 0,60.

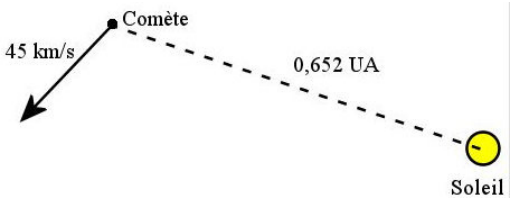
8.5 Les comètes

7. Une comète commence à se sublimer quand sa température de surface atteint 150 K.

   a) À quelle distance du Soleil est une comète quand elle commence à se sublimer si elle a un albédo de 0,5 et que le noyau tourne vite sur lui-même ? (Cela signifie qu'on doit prendre la formule de la température moyenne.)
   b) À quelle distance du Soleil est une comète quand elle commence à se sublimer si elle a un albédo de 0,5 et que le noyau tourne très lentement sur lui-même ? (Cela signifie qu'on doit prendre la formule de la température maximale.)

8. En comptant les gaz et la poussière, la comète de Halley perd 25 tonnes par seconde lors de ses passages près du Soleil. À chaque passage, elle perd ainsi de la masse pendant environ 1 an. Combien de passage la comète peut-elle faire avant d'épuiser ses réserves si le noyau a une masse initiale de 10^{14} kg ?

9. Voici la position et la vitesse d'une comète. Est-ce que cette comète est sur une orbite elliptique, parabolique ou hyperbolique ?



10. Une comète sur une trajectoire parabolique est à 50 millions de km du Soleil quand elle passe le plus près de ce dernier.

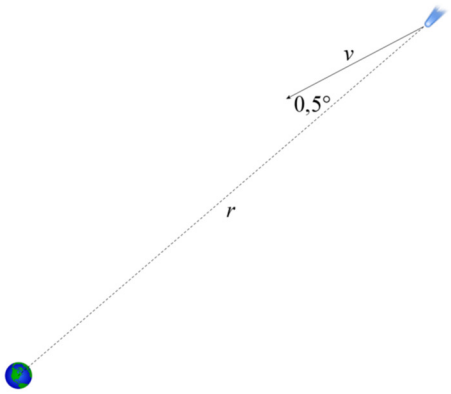
    a) Quelle est la vitesse de la comète au plus près du Soleil ?
    b) Quelle sera la vitesse de la comète quand elle sera à 200 millions de km du Soleil ?

11. Une comète sur une trajectoire hyperbolique est à 50 millions de km du Soleil quand elle passe le plus près de ce dernier. L'excentricité est 1,2.

    a) Quelle est la vitesse de la comète au plus près du Soleil ?
    b) Quelle sera la vitesse de la comète quand elle sera à 200 millions de km du Soleil ?
    c) Quelle sera la vitesse de la comète quand elle sera très loin du Soleil ?

12. La trajectoire d'une comète est déviée de seulement 10° quand elle passe près du Soleil. Quelle est l'excentricité de l'orbite de cette comète ?

13. Une comète est à une distance de 100 000 000 km de la Terre. À ce moment, sa vitesse est de 100 m/s et l'angle entre sa vitesse et sa distance est d'à peine 0,5°. (Pour ce problème, on va faire comme s'il y avait uniquement la Terre et la comète dans l'univers.)



    a) Cette comète est-elle sur une orbite elliptique, parabolique ou hyperbolique ?
    b) Sachant que le moment cinétique est conservé pour tous les types d'orbites (donc que $L = mvr\sin\psi = mv_p r_p$), déterminez si cette comète va frapper la Terre. (Pour le savoir, calculer la valeur de r_p. Si r_p est plus petit que le rayon de la Terre, la comète frappe la Terre.)
    c) Quelle est l'excentricité de l'orbite de la comète ?

14. On va trouver ici le rayon maximal du nuage d'Oort. On va supposer qu'une comète est en orbite circulaire autour du Soleil. Or, l'étoile la plus près du Soleil (Alpha de Centaure, à 4,2 al, masse de 2 fois la masse du Soleil) fait une force de marée qui peut rendre l'orbite de la comète instable. Dans ces conditions, quel est le rayon de Hill de la comète (en UA) ?

RÉPONSES

8.1 Planètes naines et petits objets

1. 435 km
2. Pas sphérique

8.2 La mesure de la distance des petits objets dans le Système solaire

3. 0,221°
4. 65,8 UA

8.4 La ceinture de Kuiper

5. a) 11 694 ans b) 954,3 UA
6. -241,6 °C

8.5 Les comètes

7. a) 2,43 UA b) 4,87 UA
8. 127
9. Elliptique
10. a) 72,86 km/s b) 36,43 km/s
11. a) 76,42 km/s b) 43,11 km/s c) 23,05 km/s
12. 11,47
13. a) hyperbolique b) Non (elle passe à 9552 km du centre de la Terre)
    c) 1,0000486
14. 167 310 UA