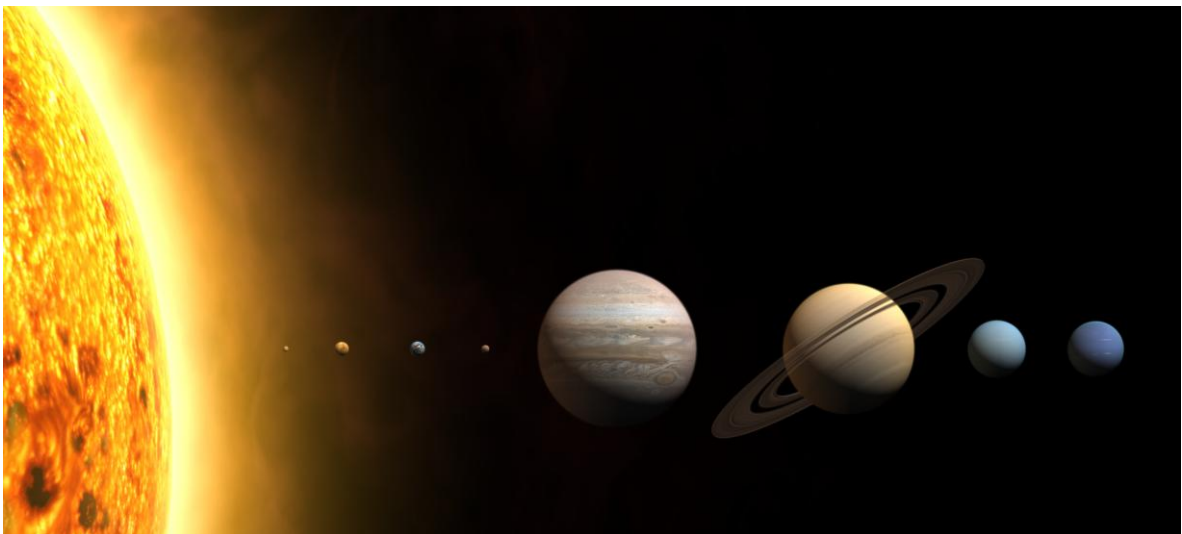




Le système solaire

Dossier enseignants

Présentation générale du système solaire
Visibilité des planètes à l'œil nu ; lois de Kepler
Qu'est-ce qu'une planète ?



Département éducation – formation

Palais de la découverte
Avenue Franklin D. Roosevelt
75008 Paris
www.palais-decouverte.fr

2015

Sommaire

I Présentation générale du système solaire

I.1	Des tailles et des distances... astronomiques	3
I.2	Tableau de données des planètes telluriques	4
I.3	Tableau de données des planètes géantes	6

II Visibilité des planètes à l'œil nu

II.1	Rappel important	7
II.2	Visibilité des planètes à l'œil nu	7
II.3	Cas des planètes inférieures	9
II.4	Cas des planètes supérieures	10
II.5	Boucles de rétrogradation	11

III Les lois de Kepler

III.1	Première loi de Kepler	13
III.2	Deuxième loi de Kepler	15
III.3	Troisième loi de Kepler	17

IV Qu'est-ce qu'une planète ? 19

I Présentation générale du système solaire

Le système solaire est constitué d'une étoile, le **Soleil**, autour de laquelle gravitent **huit planètes**, leurs **satellites**, des **planètes naines** et des milliards de **petits corps** (astéroïdes, comètes, poussières etc.) Les **planètes telluriques**, à surface solide, proches du Soleil sont, par ordre de distance à notre étoile, Mercure, Vénus, la Terre et Mars. Les **planètes géantes et gazeuses**, plus éloignées, sont Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.

I.1 Des tailles et des distances... astronomiques !

Les tailles des corps célestes et surtout les distances dans le système solaire sont sans commune mesure avec ce que l'on rencontre dans notre quotidien. Ainsi, si le Soleil possède un diamètre supérieur au million de kilomètres, la distance qui nous sépare de lui est cent fois plus grande !

Construisons par la pensée un modèle réduit du système solaire dont les dimensions auraient été divisées par **deux milliards**. À cette échelle, **le Soleil aurait la même taille qu'un ballon suisse** (vous savez, cette grosse boule de caoutchouc gonflée que l'on utilise en kinésithérapie et dans le monde du fitness !), c'est-à-dire **70 cm**.

La planète qui en est la plus proche, **Mercure**, serait un **petit grain** de 2,5 millimètres gravitant en moyenne à **29 mètres** de lui ! **Vénus**, elle, serait un **gros grain** de 6 millimètres tournant à **54 mètres** de l'astre du jour. Notre bonne vieille **Terre** serait un **grain à peine plus gros** (6,4 millimètres) gravitant à la distance respectable de **75 mètres**. Enfin, notre cousine **Mars** serait un **grain** rougeâtre de **3,4 millimètres** tournant à **110 mètres** de notre étoile. Voilà qui achève ce voyage dans le monde des planètes telluriques. Visions plus grand et plus loin !

La plus grosse et la plus massive des planètes, **Jupiter**, serait **à peine plus large qu'une balle de tennis** (7,1 centimètres) située à **390 mètres** du Soleil. On trouverait **Saturne** à **710 mètres** de l'astre du jour, sous la forme d'une **boule** de **6,0 centimètres** entourée par des **anneaux** de **14 centimètres d'envergure**. Leur épaisseur serait si faible qu'elle équivaldrait, à cette échelle, à quelques dizaines d'atomes empilés ! À un peu plus de **1 400 mètres** du Soleil, une **bille verdâtre** de **2,6 centimètres** : **Uranus** ! Enfin, à près de **2 300 mètres** de notre étoile, une autre **bille**, bleutée, de **2,5 centimètres**, **Neptune**.

L'étoile la plus proche du Soleil, Proxima du Centaure, serait une **balle** rouge de **9,8 centimètres** localisée à... **20 000 km** ! On voit ainsi, de manière flagrante, que l'espace séparant les étoiles est de très loin supérieur à leur dimension.



Bien que son aspect esthétique soit indiscutable, cette vue d'artiste ne respecte ni les distances relatives des planètes au Soleil, ni les tailles relatives des différents corps célestes de la scène. Mettre le système solaire en situation sur une seule page relève du défi... insurmontable ! Crédit : NASA.

I.2 Tableau de données des planètes telluriques

Les tableaux des deux pages qui suivent rassemblent les données physiques et orbitales des **quatre planètes telluriques** et des **quatre planètes géantes** du système solaire. La valeur minimale, pour une propriété donnée, est encadrée en **bleu** et la valeur maximale, en **rouge**.

La distance moyenne au Soleil est, en fait, le demi-grand axe de l'ellipse décrite par la planète.

Planète	Mercure	Vénus	La Terre	Mars
Distance moyenne au Soleil 1 : en millions de kilomètres 2 : en unité astronomique	57,91 0,3871	108,2 0,7233	149,6 1,000	227,9 1,524
Période de révolution	87 j 23 h	224 j 17 h	365 j 6 h	686 j 23 h
Excentricité de l'orbite	0,2056	0,0068	0,0167	0,0934
Inclinaison de l'orbite sur l'écliptique	7,00°	3,39°	0° (par définition)	1,85°
Inclinaison de l'axe de rotation	0,035°	177,3°	23,44°	25,19°
Période de rotation	58 j 16 h	243 j 0 h (rétrograde)	23 h 56 min	24 h 37 min
Masse (Terre = 1)	0,0553	0,815	1,00	0,107
Diamètre équatorial (en kilomètres)	4 879	12 104	12 756	6 792
Densité (eau = 1)	5,43	5,20	5,52	3,93
Gravité à l'équateur (Terre = 1)	0,378	0,907	1,00	0,377
Constituants atmosphériques	Atmosphère quasi inexistante	CO ₂ N ₂	N ₂ O ₂ Ar	CO ₂ N ₂ Ar
Température	Min. : - 200 °C Max. : 430 °C	460 °C	Min. : - 90 °C Moy. : 15 °C Max. : 60 °C	Min. : - 140 °C Moy. : - 60 °C Max. : 20 °C
Nombre de satellites connus	0	0	1	2

I.3 Tableau de données des planètes géantes

Planète	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
Distance moyenne au Soleil 1 : en millions de kilomètres 2 : en unité astronomique	778,3 5,203	1 429 9,537	2 875 19,23	4 504 30,10
Période de révolution	11 ans 315 j	29 ans 167 j	84 ans 7 j	164 ans 281 j
Excentricité de l'orbite	0,0485	0,0555	0,0464	0,0095
Inclinaison de l'orbite sur l'écliptique	1,30°	2,49°	0,77°	1,77°
Inclinaison de l'axe de rotation	3,13°	26,73°	97,86°	28,31°
Période de rotation	9 h 55 min	10 h 39 min	17 h 14 min (rétrograde)	16 h 7 min
Masse (Terre = 1)	318	95,2	14,5	17,1
Diamètre équatorial (en kilomètres)	142 984	120 536	51 118	49 530
Densité (eau = 1)	1,33	0,687	1,27	1,64
Gravité à l'équateur (Terre = 1)	2,36	0,916	0,889	1,12
Constituants atmosphériques	H ₂ He	H ₂ He	H ₂ He CH ₄	H ₂ He CH ₄
Température	- 150 °C (au sommet des nuages)	- 180 °C (au sommet des nuages)	- 200 °C (au sommet des nuages)	- 200 °C (au sommet des nuages)
Nombre de satellites connus	67	62	27	14

II Visibilité des planètes à l'œil nu

II.1 Rappel important

La Terre est animée de plusieurs mouvements, les deux principaux étant sa rotation autour de l'axe des pôles en 24 h, le second étant sa révolution autour du Soleil en un an. Le premier mouvement a pour conséquence le **mouvement diurne**, qui emporte la voûte céleste dans une rotation d'est en ouest autour d'un axe passant près de l'étoile Polaire et fait faire à cette voûte un tour complet en 24 h... Soleil y compris. Le second a pour conséquence le **mouvement annuel**, ce léger glissement quotidien du Soleil vers l'est, à hauteur de 1° par jour. En un an, la trajectoire du Soleil définit un grand cercle appelé **écliptique**.

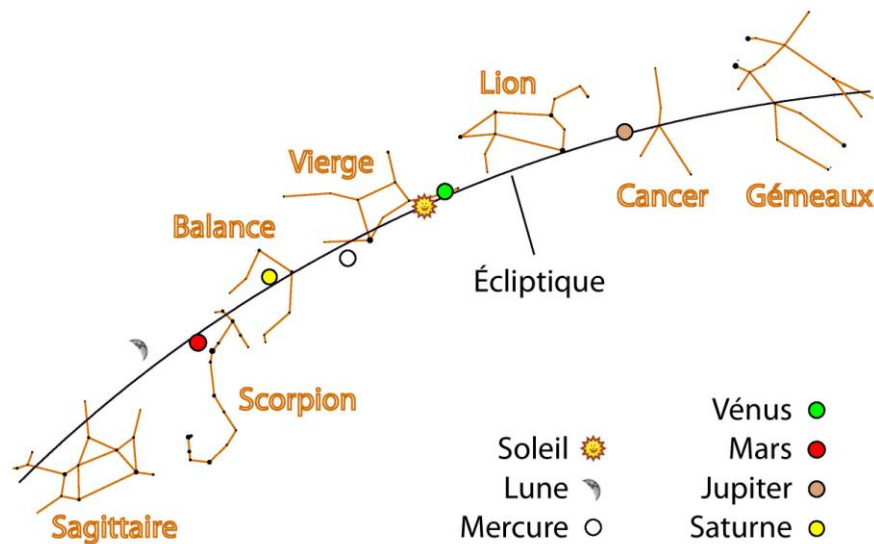
II.2 Visibilité des planètes à l'œil nu

Cinq des huit **planètes sont visibles** sans difficulté à l'œil nu. Elles font même partie des objets les plus lumineux du ciel nocturne. Il s'agit de Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne.

Dès l'Antiquité, les anciens ont fait la différence entre *étoile* et *planète* : les étoiles restent fixes les unes par rapport aux autres au fil des années, alors que les planètes se déplacent à travers les champs d'étoiles. D'ailleurs, en ancien grec, *πλανήτης αστήρης* (*planêtês astêrês*) signifiait « astre errant, astre vagabond ». Certaines planètes sont rapides (Mercure, Vénus) et leur mouvement par rapport aux étoiles est aisément perceptible d'un jour sur l'autre. D'autres planètes comme Jupiter et Saturne sont beaucoup plus lentes. Quelques jours à quelques semaines d'observation suffisent toutefois à prouver leur nature planétaire. La vitesse de déplacement des planètes dépend de leur distance au Soleil, les plus proches étant les plus rapides.

De même, on s'est rapidement aperçu que le Soleil, la Lune et les planètes ne se déplacent pas n'importe où dans le ciel, mais uniquement devant les **constellations du zodiaque**. Sur la sphère céleste, celles-ci forment une bande d'une quinzaine de degrés d'épaisseur centrée sur l'écliptique. Attention à ne pas confondre *constellation du zodiaque* et *signe du zodiaque* ! Il existe 12 signes, ayant tous la même largeur (30°), mais 13 constellations du zodiaque, de largeur différente et qui ne coïncident pas avec les signes. À titre d'exemple, au niveau de l'écliptique, la constellation du Scorpion n'a que 6,5° de largeur contre 45° pour la Vierge ! La 13^e constellation du zodiaque se situe entre le Scorpion et la Sagittaire et se nomme Ophiucus. Elle est traversée par le Soleil entre le 30 novembre et le 17 décembre.

Ainsi, vues depuis la Terre, les planètes sont toujours plus ou moins alignées (voir le schéma de la page suivante). Il n'y a rien d'étonnant à cela : prenez du recul et imaginez les planètes tournant autour du Soleil. Toutes tournent quasiment dans le même plan, plan auquel la Terre appartient. Il porte le nom de *plan de l'écliptique*. L'intersection de ce plan avec la sphère céleste n'est autre que l'écliptique, que nous avons déjà rencontré.



Configuration du ciel le 30 septembre 2014. Le Soleil, la Lune et les planètes sont pratiquement alignés sur l'écliptique. Notez que la Lune se trouve alors officiellement dans la 13^e constellation du zodiaque, Ophiucus, non représentée ici.

Une carte du ciel fournit l'aspect du ciel visible à un instant donné pour une latitude donnée et la position des constellations. Comparez ce qui figure sur la carte à ce que voyez là-haut. Si, dans les constellations du zodiaque, apparaît un point au moins assez brillant qui ne figure pas sur la carte, c'est certainement une planète. Car on n'indique jamais les planètes sur les cartes du ciel ! La raison en est simple : les planètes se déplaçant, il faudrait créer une nouvelle carte pour chaque jour... Pour vérifier que l'astre que vous soupçonnez être une planète en est bien une, il vous suffit de l'observer nuit après nuit. S'il se déplace par rapport aux étoiles, il s'agit bien d'une planète !



La célèbre carte du ciel du regretté Pierre Bourge (1921 – 2013). Un grand classique !

II.3 Cas des planètes inférieures

Mercure et Vénus sont deux **planètes inférieures**. Cela signifie que leur orbite est englobée par celle de la Terre. Elles sont toujours plus proches du Soleil que ne l'est notre planète.

Aussi, Mercure et Vénus ne s'écartent-elles jamais beaucoup de la direction de l'astre du jour. Mercure s'en éloignant au maximum de 23° en moyenne, elle est très souvent noyée dans les lueurs du levant ou du couchant sous nos latitudes. Au mieux, la discrète planète se lève deux heures avant le Soleil ou se couche deux heures après lui.

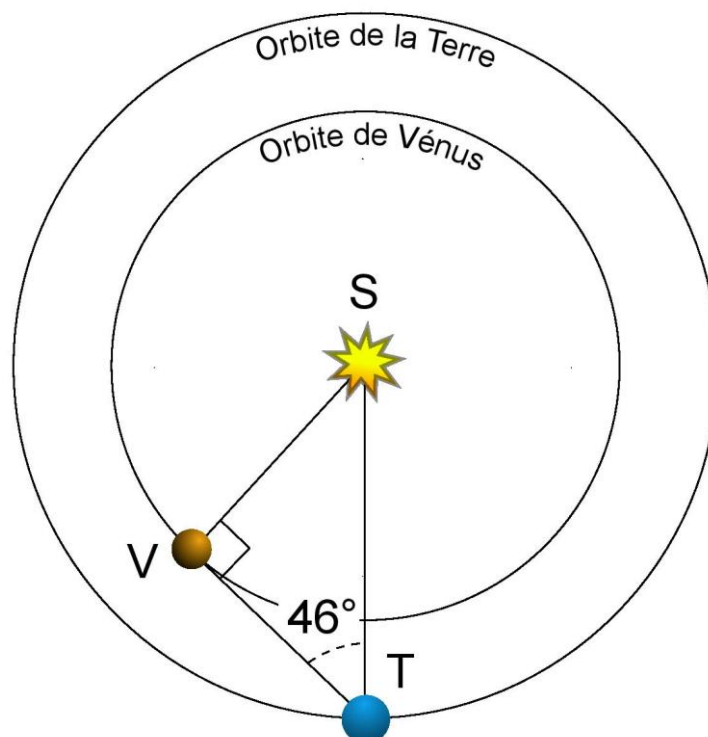
Vénus, elle, peut s'en éloigner un peu plus, d'environ 46° , et demeurer visible jusqu'à 4 h après le coucher du Soleil, ou se lever jusqu'à 4 h avant lui. Surnommée *l'étoile du berger*, Vénus est l'astre le plus brillant du ciel après le Soleil et la Lune.

Ces observations permettent de calculer simplement la distance relative de Mercure et de Vénus au Soleil. Dans le schéma de la page suivante, *T* est la Terre, *V* la planète Vénus et *S* le Soleil. Assimilons les orbites des planètes à des cercles. Lorsque l'élongation de Vénus est maximale

(46°), le triangle SVT est rectangle en V. Ainsi, $\frac{SV}{ST} = \sin(46^\circ)$ et donc $SV = \sin(46^\circ) \times ST = 0,72 \text{ ST}$.

Connaissant la distance Soleil – Terre, on en déduit la distance Soleil – Vénus.

Le même raisonnement appliqué à Mercure mène au résultat $SM = 0,39 \text{ ST}$.



Plus grande élongation de Vénus à l'est du Soleil. Dans cette configuration, la planète est visible le soir.

La Terre, Le Soleil et Mercure (ou Vénus) se retrouvent parfois alignés, dans cet ordre. Mercure (ou Vénus) est alors en **conjonction supérieure** et bien sûr, totalement inobservable.

La Terre, Mercure (ou Vénus) et le Soleil se retrouvent parfois alignés, dans cet ordre. Mercure (ou Vénus) est alors en **conjonction inférieure** et bien sûr, totalement inobservable. Sauf...

Sauf... lorsque l'alignement est parfait. Munis d'un instrument d'optique protégé du rayonnement aveuglant de notre étoile, nous pouvons alors observer le passage de la planète devant le disque solaire. Le dernier transit de Mercure prit place le 8 novembre 2006 et le prochain aura lieu le 9 mai 2016. Les transits de Vénus sont plus rares. Le dernier intervint le 6 juin 2012 et le prochain se produira le... 11 décembre 2117 !

II.4 Cas des planètes supérieures

Contrairement aux planètes Mercure et Vénus, les planètes Mars, Jupiter et Saturne peuvent présenter toutes les élongations possibles par rapport au Soleil, car leur orbite englobe celle de la Terre.

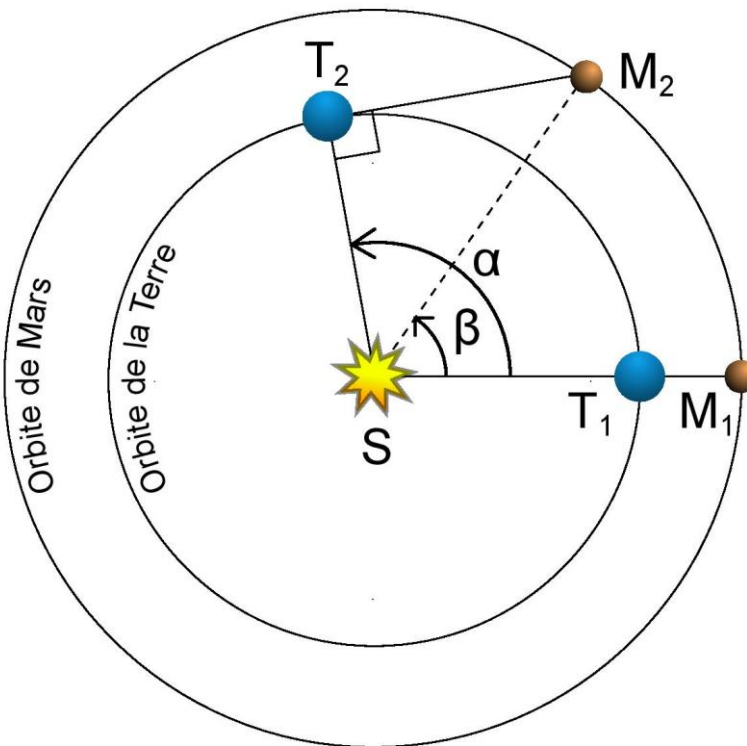
Les meilleures conditions d'observation des planètes supérieures s'opèrent lorsque le Soleil, la Terre et la planète en question sont alignés. Cette dernière est alors dite **en opposition**. Dans ces conditions, elle est visible toute la nuit dans notre ciel, se levant au moment où le Soleil se couche. C'est également la période où la planète est la plus brillante, puisque la distance Terre – planète est, à ce moment-là, minimale.

Il est possible de calculer la distance relative des planètes supérieures de la façon suivante, à partir de deux observations. Considérons le cas de Mars et le schéma ci-dessous. L'instant t_1 marque son passage à l'opposition. Le Soleil, la Terre et Mars sont alignés. Le temps passant, la planète rouge prend du retard par rapport à la Terre. À l'instant t_2 , on mesure un angle de 90° entre la direction du Soleil et celle de Mars. Cette dernière, passant en **quadrature** orientale, est alors visible en première partie de nuit dans notre ciel. Il s'est écoulé environ 106 jours depuis l'opposition.

Sachant que la Terre parcourt 360° en 365 jours, que vaut l'angle α ? Une simple règle de trois donne $\alpha \approx 104,5^\circ$. L'année martienne s'élève à 687 jours. On a donc $\beta \approx 55,5^\circ$. L'angle T_2SM_2 , qui est la différence entre α et β , vaut 49° . Mars étant en quadrature, l'angle ST_2M_2 est droit : le

triangle ST_2M_2 est rectangle en T_2 . Ainsi, $\frac{ST_2}{SM_2} = \cos(49^\circ)$ d'où $SM_2 = 1,5 ST_2$.

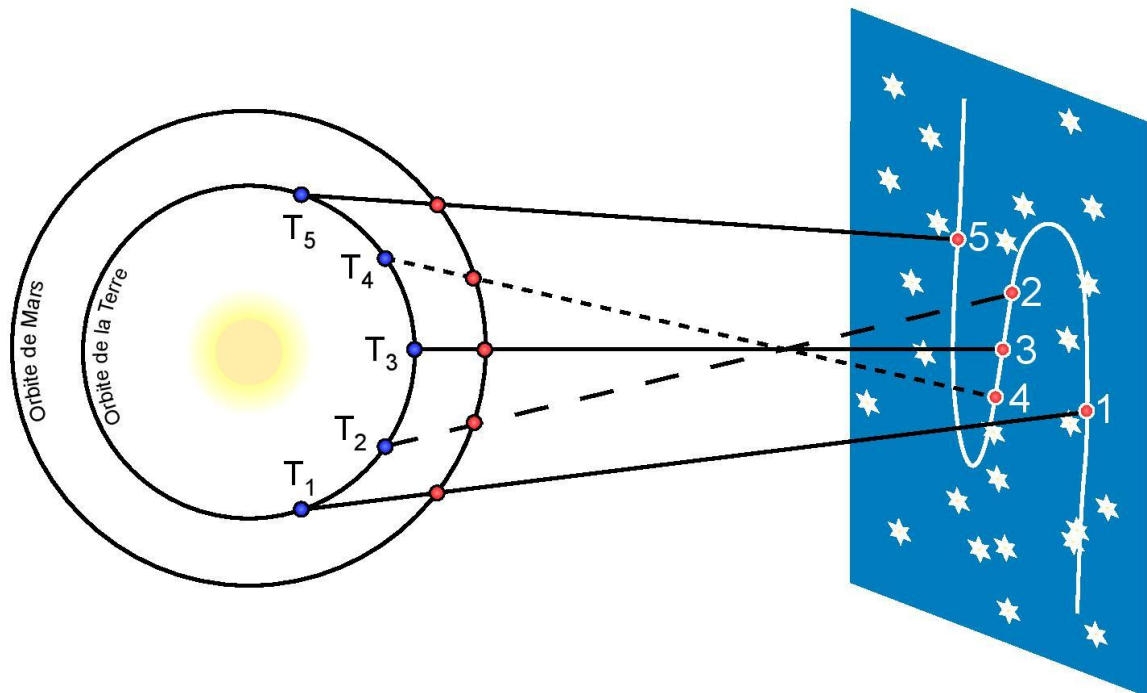
Le même raisonnement appliqué à Jupiter et Saturne mène aux résultats S–Jupiter = 5,2 ST et S–Saturne = 9,5 ST.



Uranus est à l'extrême limite de visibilité à l'œil nu sous un ciel dénué de pollution lumineuse. Neptune est trop faible pour être visible sans instrument d'optique. Une simple paire de jumelles permet de voir ces deux lointaines cousines sous la forme de petits points peu spectaculaires.

II.5 Boucles de rétrogradation

Repérons les planètes par rapport aux étoiles lointaines. Dans notre ciel, si l'on met de côté le mouvement diurne, le mouvement général des planètes supérieures (Mars, Jupiter et Saturne) se fait vers l'est, à des vitesses différentes. Toutefois, elles présentent régulièrement un comportement... assez étrange : elles ralentissent, s'arrêtent, partent vers l'ouest puis ralentissent, s'arrêtent à nouveau et reprennent leur course vers l'est. Elles décrivent ainsi des boucles ou des zigzags. Les planètes Mercure et Vénus, elles, exhibent une conduite semblable sauf qu'elles semblent osciller autour de la direction du Soleil. Il est à peine caricatural de dire que le but de l'astronomie dans l'Antiquité et au Moyen Âge a été d'expliquer ces curieux mouvements. Copernic fournit une solution élégante et naturelle en proposant son système héliocentrique.



La boucle ou, comme ici, le zigzag résulte clairement de la composition des mouvements de la Terre et de Mars autour du Soleil. La Terre rattrape Mars et la dépasse. Au cours du dépassement, Mars semble reculer devant l'arrière-plan constitué par les étoiles, de la même façon que sur autoroute, la voiture que vous doublez semble reculer, alors qu'elle et vous allez dans le même sens.

Le mouvement apparent de Mars n'est pas une courbe à une dimension mais une courbe à deux dimensions. En effet, le plan dans lequel Mars circule autour du Soleil n'est pas confondu avec le plan de l'écliptique. L'angle entre ces deux plans est petit, proche de $1,9^\circ$.

III Les lois de Kepler

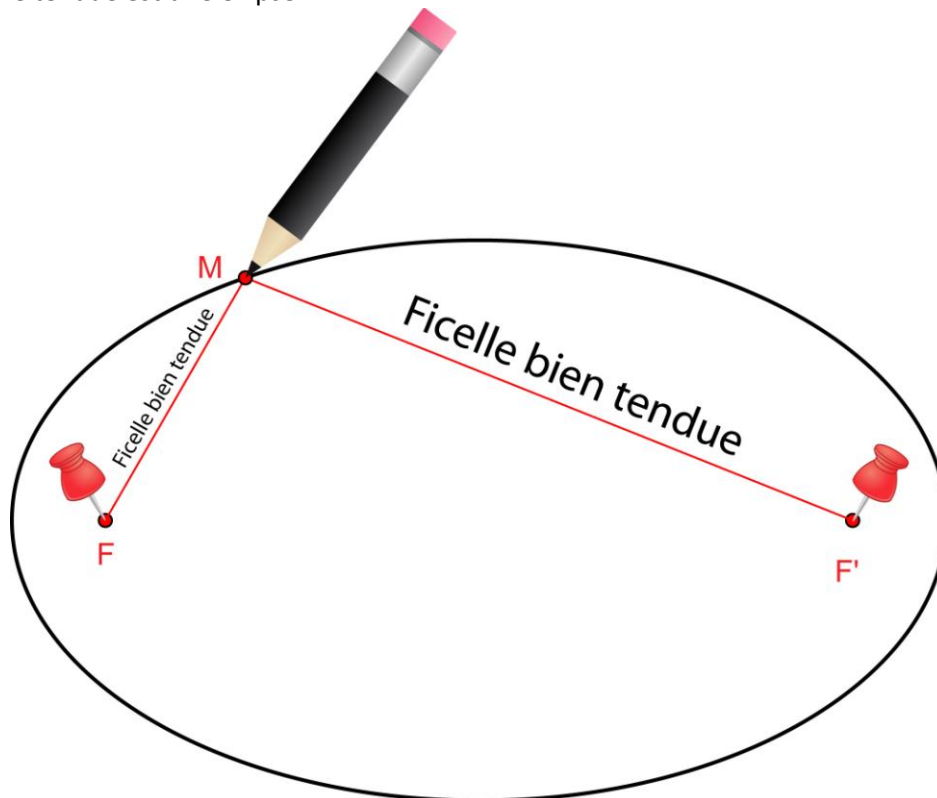
Les trois lois de Kepler gouvernent le mouvement des planètes autour du Soleil. Les deux premières furent publiées en 1609 dans *l'Astronomie Nova* et la troisième en 1619 dans *l'Harmonices Mundi*. Pour les établir, Johannes Kepler (1571 – 1630) exploita la masse considérable d'observations des positions planétaires effectuées par l'astronome danois Tycho Brahé (1546 – 1601) dont il fut l'assistant pendant un an et demi.

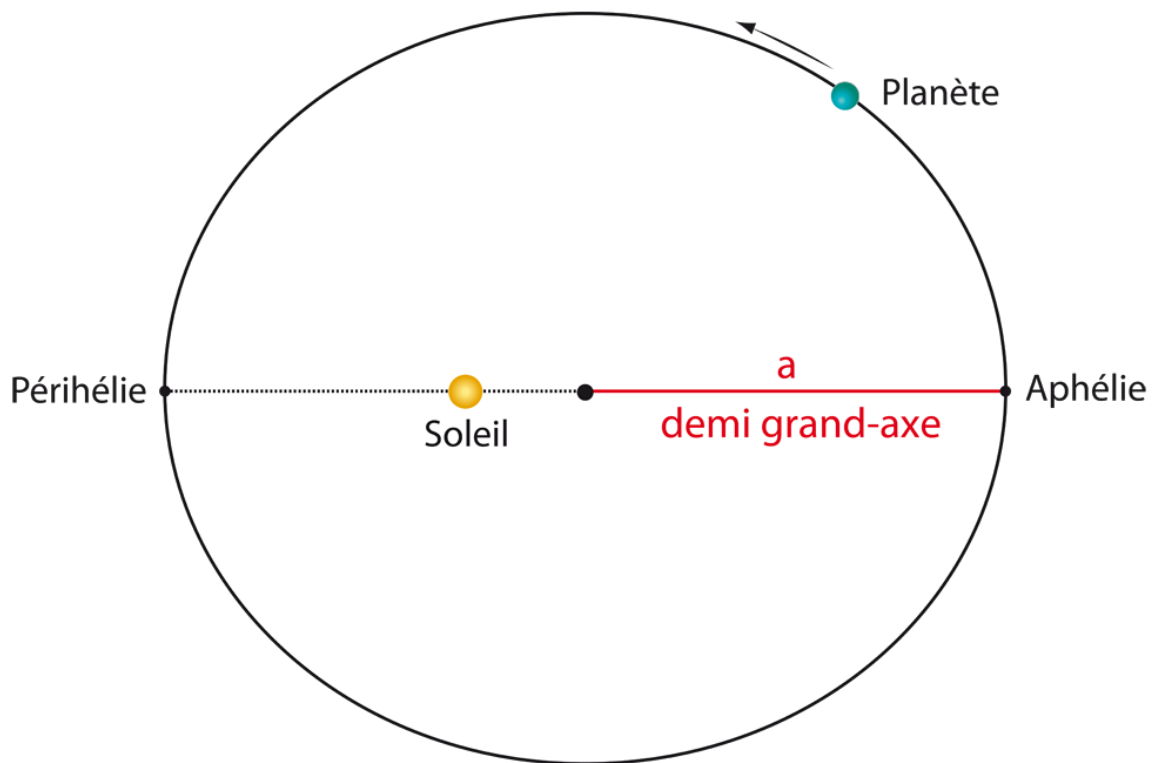
III.1 Première loi de Kepler

Les planètes décrivent autour du Soleil des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers.

Comment introduire le concept d'ellipse ? C'est la forme que l'on perçoit en regardant un cercle en perspective ou la figure formée par l'ombre qu'un disque projette sur une surface plane.

Vous pouvez facilement construire une ellipse en mettant en pratique une définition mathématique de cet objet. Soit F et F' deux points distincts du plan. L'ensemble des points M qui vérifient $d(M,F) + d(M,F') = 2a$ définit une ellipse de foyers F et F' et de grand axe $2a$, d étant la distance entre les deux points entre parenthèses. Bref, l'ellipse est le lieu des points dont la somme des distances à deux points fixes est constante. Ainsi, si l'on plante deux piquets dans le sol ou deux punaises sur une plaquette de liège (les deux foyers) et que l'on se munit d'une corde ou d'une ficelle non élastique (la somme constante) que l'on attache aux piquets ou aux deux punaises, le trajet que l'on parcourt ou que la pointe d'un feutre parcourt en maintenant la corde ou la ficelle tendue est une ellipse.



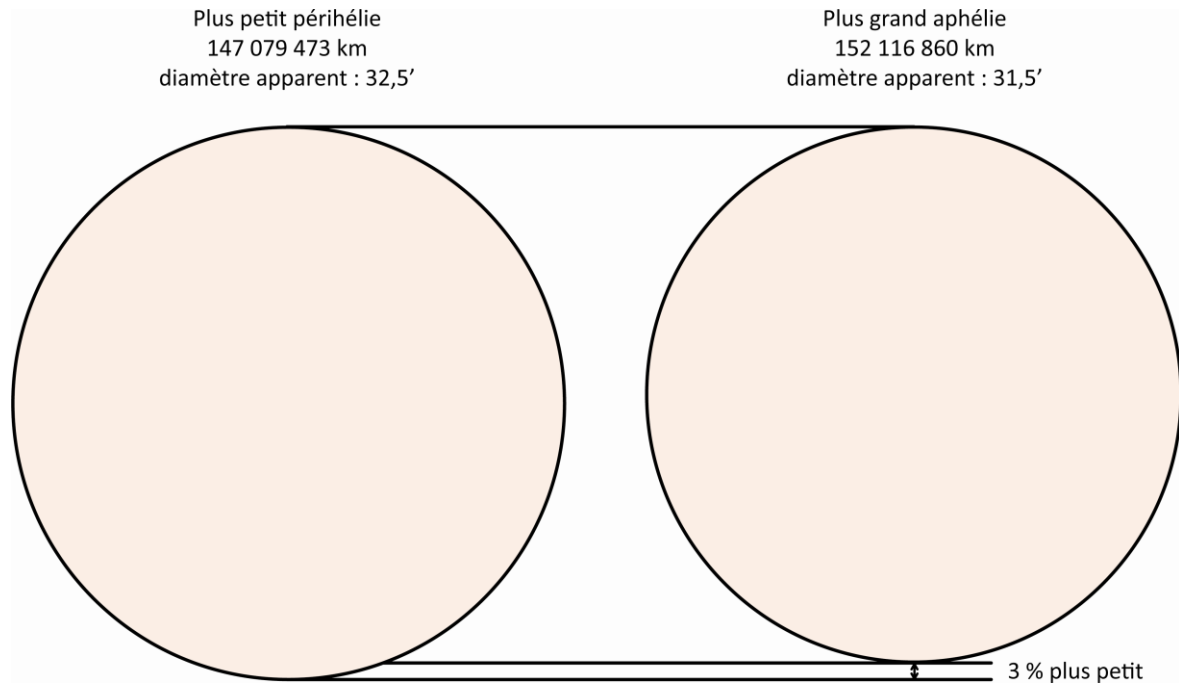


Cette figure théorique est perturbée par l'action gravitationnelle des autres corps du système solaire. Dans le cas de la Terre, les perturbateurs sont la Lune, Vénus, Jupiter et Saturne.

L'aplatissement de l'ellipse est grandement exagéré sur le schéma ci-dessus ; les trajectoires de la plupart des planètes ne diffèrent que de très peu du cercle. Prenons le cas de la Terre et dessinons son orbite sous la forme d'un cercle de 1 m de rayon : l'ellipse serait contenue dans l'épaisseur du trait ! A l'œil nu, vous ne feriez pas la différence entre ce cercle et l'ellipse décrite par la Terre. Toutefois, le Soleil n'occuperait pas le centre du cercle de 1 m de rayon, on le trouverait à 1,7 cm de celui-ci. Ainsi, au cours de sa révolution la distance séparant une planète du Soleil varie. C'est actuellement vers le 3 janvier que la Terre est au plus près du Soleil (périhélie), à 147,1 millions de kilomètres et vers le 4 juillet qu'elle en est au plus loin (aphélie), à 152,1 millions de kilomètres. Sur la période 1800 – 2050, les valeurs extrémales du périhélie et de l'aphélie furent atteintes respectivement le 1^{er} janvier 1817 (147 079 473 km) et le 2 juillet 1829 (152 116 860 km). Toutes les distances s'entendent depuis le centre de la Terre jusqu'au centre du Soleil.

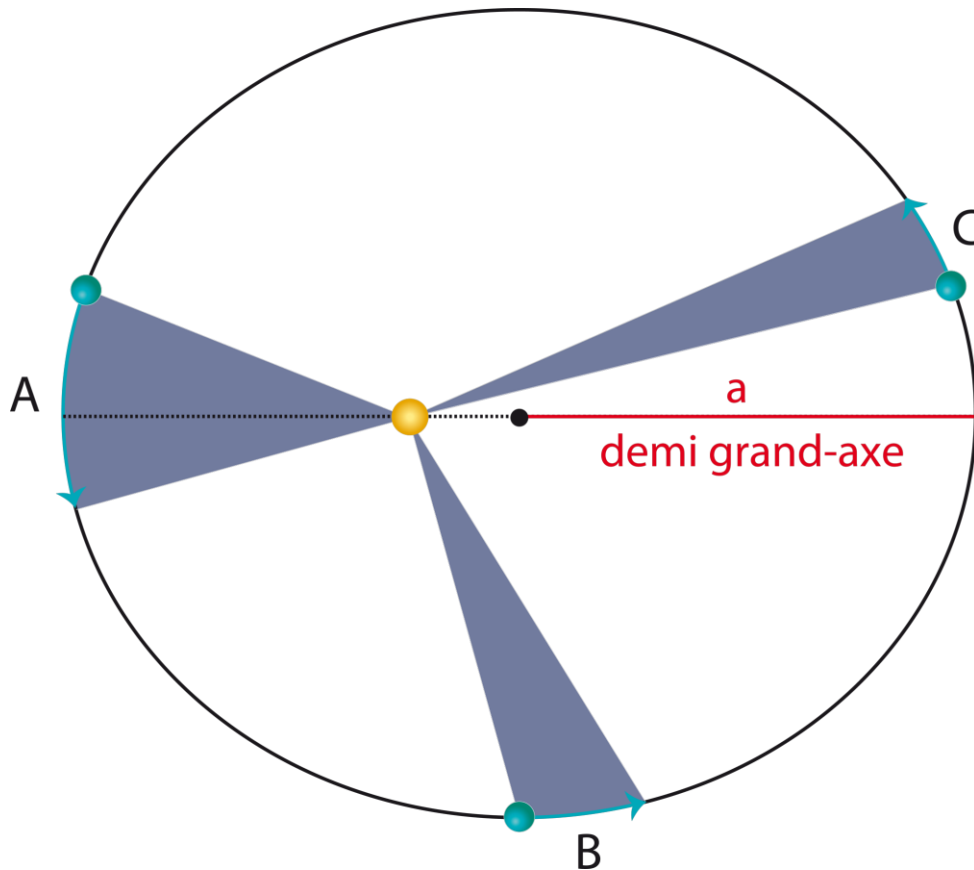
En tout cas, c'est au début de l'hiver dans notre hémisphère que nous sommes au plus près du Soleil, et au début de l'été que nous en sommes le plus loin ! Les saisons ne trouvent ainsi pas leur cause dans la distance variable Terre – Soleil, car il y a un phénomène bien plus important en un lieu donné : la durée d'ensoleillement et l'angle d'incidence des rayons solaires dont l'origine commune est l'inclinaison de l'axe de rotation terrestre d'environ $23^{\circ} 26'$.

Cette variation de la distance qui nous sépare du Soleil se traduit par une variation du diamètre apparent de notre étoile dans le ciel, mais elle est indécélable à l'œil nu. D'ailleurs, et malgré les apparences, l'angle sous lequel nous voyons le Soleil dans le ciel est petit, proche de un demi-degré ($0,5^\circ$ soit $30'$). C'est l'angle sous-tendu par une pièce de 1 euro vue depuis une distance de 2,50 m ! Le diamètre apparent de l'astre du jour varie ainsi d'environ 3 %, entre $31,5'$ à l'aphélie et $32,5'$ au périhélie.



III.2 Deuxième loi de Kepler

Le rayon vecteur reliant une planète au Soleil balaie des aires égales en des intervalles de temps égaux.



Les arcs d'ellipse A, B et C sont décrits dans le même temps puisque les surfaces en violet possèdent la même aire. **Par conséquent, une planète va d'autant plus vite qu'elle est proche du Soleil et bien sûr, d'autant moins vite qu'elle en est éloignée.**

Nous venons de voir que c'est en plein hiver que la Terre est au plus près du Soleil. Elle se déplace donc plus rapidement : l'hiver est la saison la plus courte dans notre hémisphère, ce que confirme le tableau suivant.

Saison	Hiver	Printemps	Été	Automne
Durée moyenne	89 jours 0 h	92 jours 18 h	93 jours 16 h	89 jours 20 h

Remarque : lorsque nous lisons la valeur de 149 600 000 km comme distance moyenne qui nous sépare du Soleil, il s'agit en fait du demi-grand axe a de l'ellipse. Or, d'après la 2^e loi de Kepler, la Terre passe plus de temps près de l'aphélie qu'au voisinage du périhélie. La distance moyennée sur le temps a pour expression $a \cdot \left(1 + \frac{e^2}{2}\right)$ où e est l'excentricité de l'orbite, qui vaut 0,0167.

Avec des données plus précises, on obtient alors une distance moyenne de 149 618 773 km. Vous voyez quand la différence est toute petite, car l'excentricité de notre orbite l'est également.

III.3 Troisième loi de Kepler

Le cube du demi-grand axe (a) divisé par le carré de la période de révolution (T) est une constante pour toutes les planètes du système solaire.

Mathématiquement, cette troisième loi s'écrit $\frac{a^3}{T^2} = cste$

Vérifions cette relation sur quelques planètes :

Planète	a (ua*)	T (année)	a^3/T^2
Vénus	0,723	0,615	1,00
Terre	1,00	1,00	1,00
Jupiter	5,20	11,9	0,993
Neptune	30,1	165	1,00

* ua pour *unité astronomique*, qui est *grosso modo* la distance moyenne Terre – Soleil.

Plus une planète est loin du Soleil, plus sa période de révolution est longue, non seulement parce que le chemin qu'elle doit parcourir est plus important, mais aussi parce qu'elle va moins vite.

Connaissant la période de révolution d'une planète, on peut déterminer le demi-grand axe de son orbite autour du Soleil. À titre d'exemple, intéressons-nous à Uranus. Elle effectue son tour du Soleil en quelques 84,3 ans. Prenons les conventions du tableau : nous obtiendrons a en unité astronomique si T est exprimé en année avec une constante égale à 1.

$$a = T^{\frac{2}{3}} = (84,3)^{\frac{2}{3}} = 19,2 \text{ unités astronomiques.}$$

Pour aller plus loin

Déterminons l'expression de la constante dans le cas simple d'un mouvement circulaire uniforme d'une planète autour du Soleil. Cela revient à supposer que la masse m de la planète est négligeable devant la masse M du Soleil.

Un corps de masse m en mouvement circulaire uniforme subit une force centripète valant en norme $m \frac{v^2}{a}$ où v est sa vitesse et a le rayon du cercle parcouru. Ici, $v = \frac{2\pi a}{T}$ où T est la période de révolution de la planète. Or, celle-ci est soumise à une force centripète d'origine gravitationnelle, dont la norme vaut $\frac{GMm}{a^2}$. L'égalité de ces deux normes se traduit par l'égalité

$$\frac{GMm}{a^2} = m \cdot \frac{\left(\frac{2\pi a}{T}\right)^2}{a} \text{ d'où } \frac{a^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}.$$

On connaît a , T et G . **On peut ainsi calculer la masse M du Soleil !**

$$\text{Il suffit d'isoler } M : M = \frac{4\pi^2 a^3}{GT^2}$$

Avec $a \approx 149\,600\,000$ km, $T = 1 \text{ an} = 3,156 \cdot 10^7$ s et $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, on obtient en se restreignant à trois chiffres significatifs :

$$M = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg.}$$

C'est plus de 330 000 fois la masse de la Terre !

Le Soleil est 745 fois plus massif que toutes les planètes réunies. Cela donne le vertige...

IV Qu'est-ce qu'une planète ?

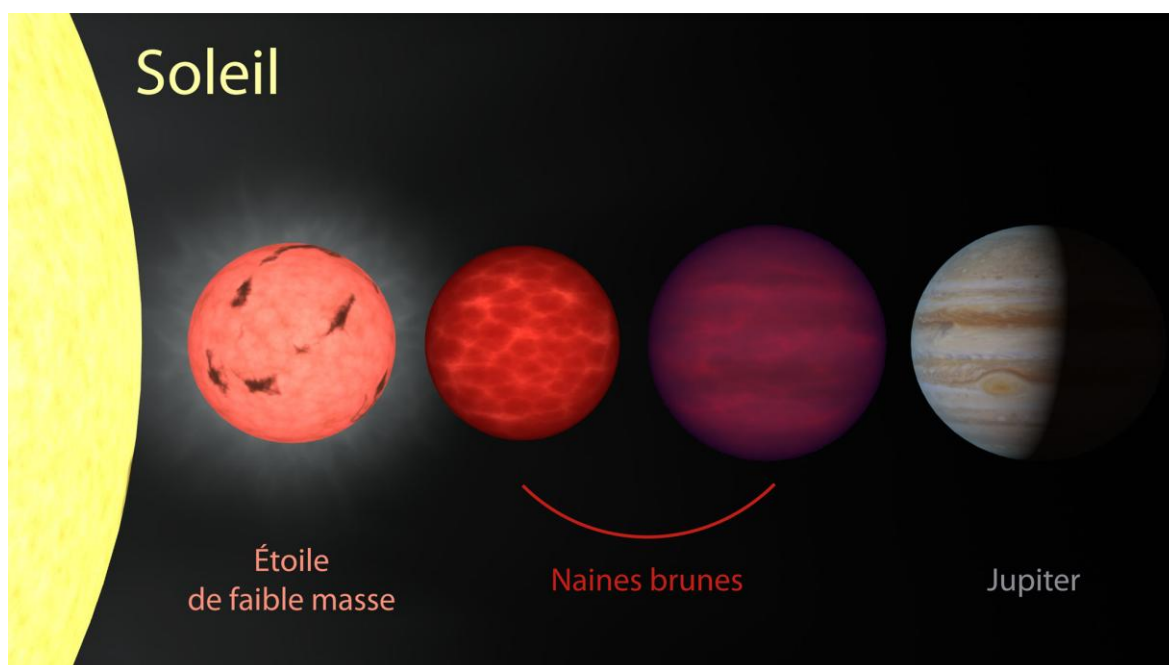
Définir les planètes comme des astres sphériques tournant directement autour du Soleil et n'émettant pas leur propre lumière amènerait aujourd'hui à admettre l'existence de plusieurs dizaines de ces corps dans le système solaire. Pendant longtemps, on a limité le nombre des planètes à neuf. Or, on mit en évidence dans les années 1990 une nouvelle catégorie d'objets au-delà de Neptune, dont certains possèdent une taille comparable à celle de Pluton. Ces objets doivent-ils être considérés comme des planètes ? A la suite de cette découverte, des astronomes se sont penchés sur la question : qu'est-ce qu'une planète ?

En dehors du système solaire

Les astronomes ont établi que **tout objet dont la masse est supérieure à environ 80 fois la masse de Jupiter** possède un cœur suffisamment chaud et dense pour que s'y déroulent des réactions nucléaires transformant l'hydrogène en hélium. On parle alors d'**étoile**.

Un corps dont la masse est comprise entre environ 13 et 80 fois la masse de Jupiter n'a pas une masse suffisante pour la fusion de l'hydrogène. Par contre, le deutérium, une forme minoritaire de l'hydrogène, peut fusionner en dégageant de l'énergie qui fait briller légèrement cet astre auquel on donne le nom de **naine brune**.

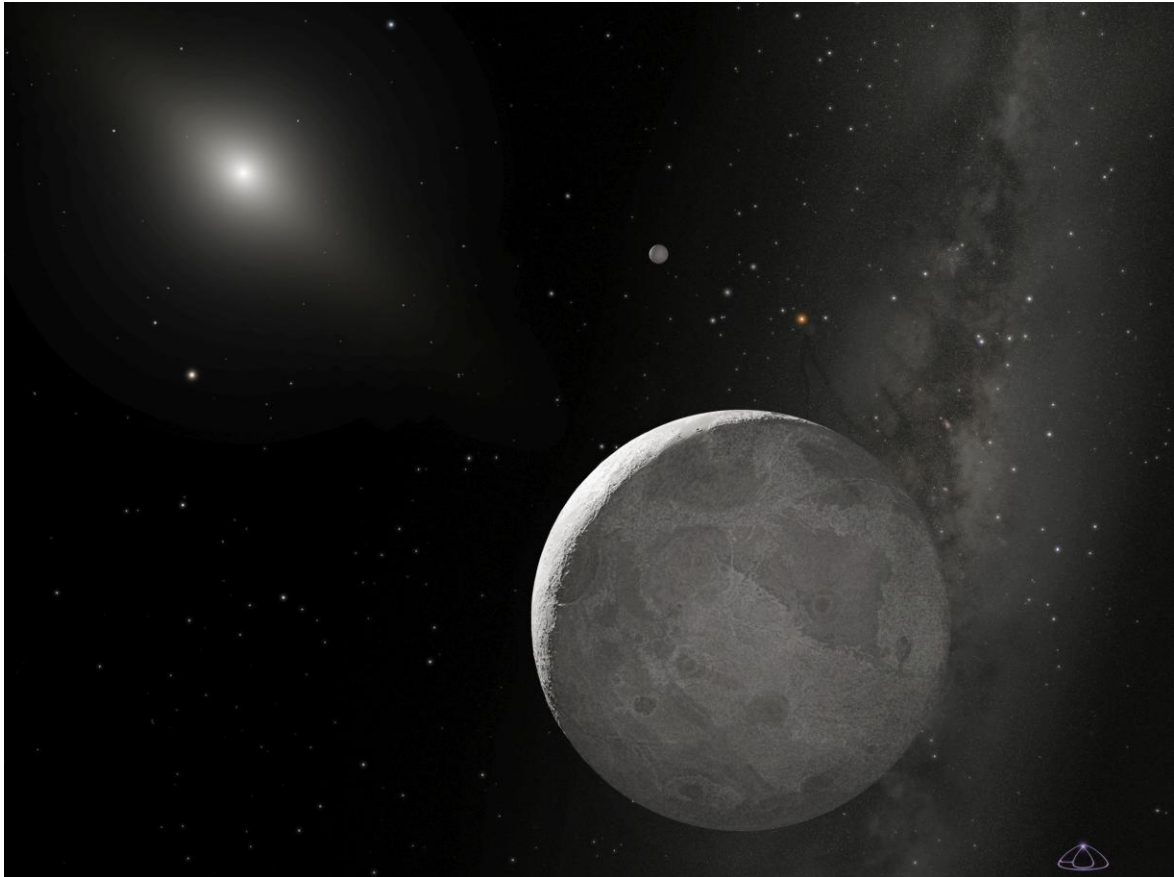
Enfin, **pour tout objet de masse inférieure à 13 fois celle de Jupiter**, aucune réaction de fusion nucléaire n'est possible. Cette définition a été adoptée officiellement par les astronomes traquant les exoplanètes.



Crédit : Observatoire Gemini / Jon Lomberg.

Le feu aux poudres

En 1992, les astronomes découvrirent 1992 QB₁, un corps d'environ 400 km gravitant au-delà de Neptune. Aujourd'hui, plus de mille de ces objets transneptuniens ont été catalogués. Si les premiers présentaient des tailles de quelques centaines de kilomètres, on en a rapidement trouvé de bien plus gros. Aux yeux des planétologues, Pluton perdait progressivement mais irrémédiablement son titre de planète pour celui de transneptunien massif...



Vue d'artiste d'Éris et de son satellite Dysnomie. Éris, dont on estime le diamètre à 2 330 km, est aussi large que Pluton mais 27 % plus massif. Une grande incertitude règne sur le diamètre de Dysnomie, qui ferait entre 100 et 700 km de diamètre. Crédit : Observatoire Gemini / Jon Lomberg.

La résolution de l'Union astronomique internationale

Considérant qu'il est important que la nomenclature des objets reflète l'état de nos connaissances, l'Union astronomique internationale (UAI), réunie en congrès en août 2006, a décidé par vote de répartir les planètes et autres corps du système solaire en trois catégories de la manière suivante :

Une **planète** est un corps céleste, qui

- (a) est en orbite autour du Soleil,
- (b) possède une masse suffisante pour que sa gravité l'emporte sur les forces de cohésion du corps solide et le maintienne en équilibre hydrostatique, sous une forme presque sphérique,
- (c) a éliminé tout corps susceptible de se déplacer sur une orbite proche ;

Les huit planètes sont donc : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.

Une **planète naine** est un corps céleste, qui

- (a) est en orbite autour du Soleil,
- (b) a une masse suffisante pour que sa gravité l'emporte sur les forces de cohésion du corps solide et le maintienne en équilibre hydrostatique, sous une forme presque sphérique,
- (c) n'a pas éliminé tout corps susceptible de se déplacer sur une orbite proche,
- (d) n'est pas un satellite ;

Tous les autres objets en orbite autour du Soleil, à l'exception des satellites, sont appelés **petits corps du système solaire**.

Conformément à la définition ci-dessus, Pluton est une « planète naine ». Pluton est également identifié comme le prototype d'une nouvelle catégorie d'objets transneptuniens, les plutoïdes. Un plutoïde est une planète naine dont le demi-grand axe est supérieur à celui de la planète Neptune.

En 2015, on compte cinq planètes naines (Cérès, le plus gros des astéroïdes, et quatre transneptuniens : Pluton, Éris, Haumea et Makemake) et quatre plutoïdes (Pluton, Éris, Haumea et Makemake). Potentiellement, plusieurs dizaines d'objets peuvent prétendre au statut de planète naine et de plutoïde.

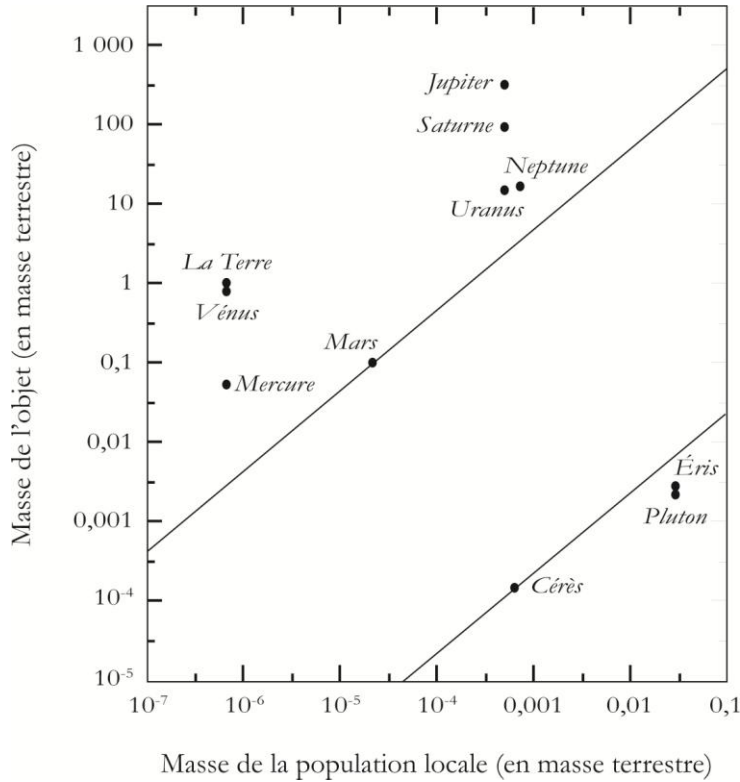


Le Soleil et ses huit planètes. Crédit : Union astronomique internationale / Martin Kornmesser.

Certains astronomes contestent la définition adoptée par l'Union astronomique internationale car celle-ci ne propose, entre autres, aucun critère quantitatif. Il est vrai que le concept d'objet « ayant éliminé tout corps susceptible de se déplacer sur une orbite proche » est vague. Il est toutefois quantifiable et conduit à une distinction plus franche entre planètes et petits corps que le critère de forme.

Sur le graphique ci-dessous, on examine le critère de dominance par rapport à la population locale. La population locale désigne l'ensemble des objets qui croisent l'orbite du corps considéré et susceptibles d'entrer un jour en collision avec lui. Définissons la population locale et évaluons ce critère pour les huit planètes, pour Cérès (le plus gros des astéroïdes) et pour Éris et Pluton (des transneptuniens).

Objet	Population locale
Mercure, Vénus la Terre et Mars	Astéroïdes dont la trajectoire coupe l'orbite des planètes telluriques.
Cérès	Les autres astéroïdes de la ceinture principale
Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune	Centaures (astéroïdes glacés gravitant entre Jupiter et Neptune). Pour Neptune, on inclut également les transneptuniens dispersés.
Pluton et Éris	L'ensemble des transneptuniens



Objet considéré	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Cérès	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune	Pluton	Éris
Masse (en masse terrestre)	0,055	0,815	1,000	0,107	0,00015	317,8	95,2	14,5	17,1	0,0022	0,0028
Masse de la population locale (en masse terrestre)	$\sim 6 \cdot 10^{-7}$	$\sim 6 \cdot 10^{-7}$	$\sim 6 \cdot 10^{-7}$	$\sim 2,1 \cdot 10^{-7}$	$\sim 0,00045$	$\sim 5 \cdot 10^{-4}$	$\sim 5 \cdot 10^{-4}$	$\sim 5 \cdot 10^{-4}$	$\sim 7 \cdot 10^{-4}$	$\sim 0,03$	$\sim 0,03$
Rapport des masses	$\sim 90\,000$	$\sim 1\,350\,000$	$\sim 1\,700\,000$	$\sim 5\,100$	$\sim 0,33$	$\sim 625\,000$	$\sim 190\,000$	$\sim 29\,000$	$\sim 24\,000$	$\sim 0,07$	$\sim 0,10$

Huit corps dominant très nettement leur population locale. Il s'agit de Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Ainsi, la comparaison entre la masse des principaux objets et celle de leur population locale fait apparaître un grand vide. De façon très nette, les corps sont séparés en deux classes bien distinctes, permettant une définition non-ambigüe du terme planète.