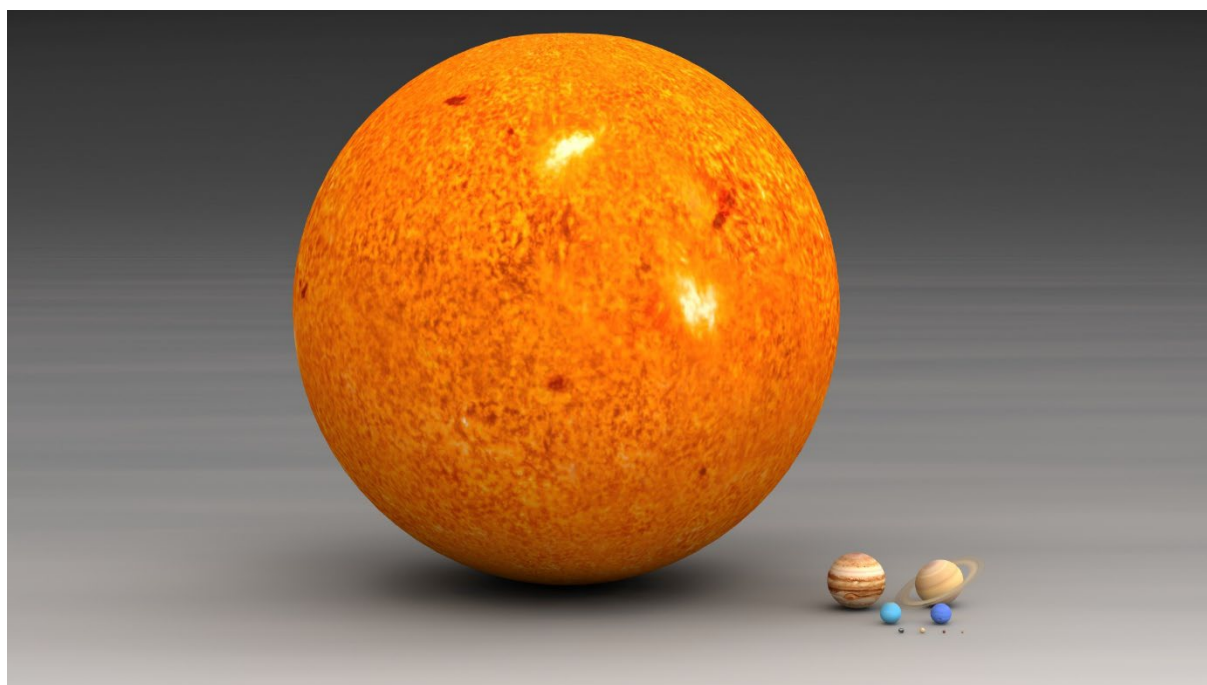


cité

**sciences
et industrie**

Le système solaire

Enseignants de collège et de lycée



Sommaire

Le système solaire

1	Présentation générale du système solaire	3
1.1	Des tailles et des distances... astronomiques !	3
1.2	Tableaux de données des planètes	4
2	Visibilité des planètes à l'œil nu	
2.1	Rappel important	7
2.2	Visibilité des planètes à l'œil nu	7
2.3	Cas des planètes inférieures	9
2.4	Cas des planètes supérieures	10
2.5	Boucles de rétrogradation	11
3	Lois de Kepler	12
3.1	Première loi de Kepler	13
3.2	Deuxième loi de Kepler	15
3.3	Troisième loi de Kepler	17
4	Enfin, qu'est-ce qu'une planète ?	18
5	Une brève description des différents corps du système solaire	22
6	Les atmosphères des planètes	32
7	Un scénario de formation du système solaire	34

Image de couverture : [Lsmpascal \(http://www.lesud.com/lesud-astronomy_pageid81.html\)](http://www.lesud.com/lesud-astronomy_pageid81.html)

1 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 quatre premières planètes que l'on rencontre en s'éloignant du Soleil sont appelées **planètes telluriques**. Ce sont des corps solides, de densité élevée, constitués de plusieurs couches concentriques : un noyau central métallique, un manteau de silicates et une croûte en surface. Les planètes telluriques tournent lentement sur elles-mêmes. Malgré leurs similitudes, les planètes telluriques présentent une grande diversité. Par exemple, **Vénus** possède une atmosphère très dense alors que **Mercure** en est dénuée ; la **Terre** a un satellite, **Mars** en a deux. La Terre est la seule de ces planètes à posséder un champ magnétique appréciable.

Les **planètes géantes** possèdent des masses variant de 14,5 masses terrestres pour Uranus à 318 masses terrestres pour Jupiter. Elles tournent rapidement sur elles-mêmes et possèdent des champs magnétiques puissants, des anneaux et de nombreux satellites. Leur densité est très inférieure à celle de la Terre. **Jupiter** et **Saturne** sont presque entièrement composées d'hydrogène et d'hélium : ce sont des géantes de gaz. La roche et la glace constituent une fraction importante de la masse d'**Uranus** et de **Neptune** : ce sont des géantes de glace.

1.1 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 le 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.

1.2 **Tableau de données des planètes**

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	108,2	149,6	227,9
	0,3871	0,7233	1,000	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

Planète	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
Distance moyenne au Soleil 1 : en millions de kilomètres 2 : en unité astronomique	778,3	1 429	2 875	4 504
	5,203	9,537	19,23	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)	317,8	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	80	82	27	14

2 Visibilité des planètes à l'œil nu

2.1 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**.

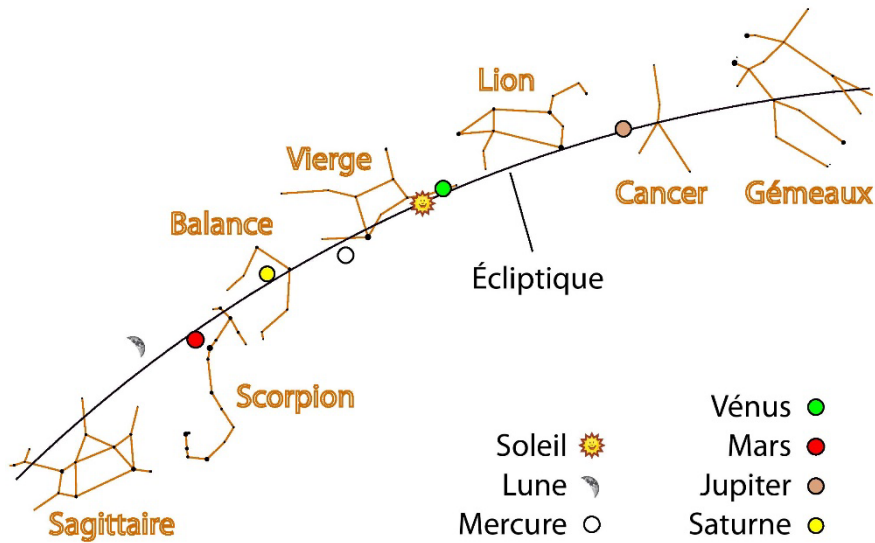
2.2 Visibilité des planètes à l'œil nu

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 constellations. 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 douze signes, ayant tous la même largeur (30°), mais treize 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 treizième 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 treizième 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 vous 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. En effet, 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 de Pierre Bourge (1921 – 2013). Un grand classique !

2.3 Cas des planètes inférieures

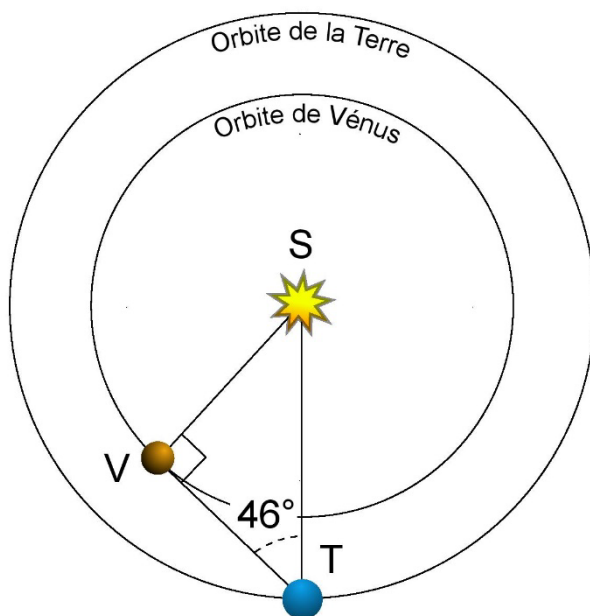
Mercury et Vénus sont deux **planètes inférieures**. Cela signifie que leur orbite est englobée par celle de la Terre. Elles sont toujours plus proches du Soleil que ne l'est notre planète.

Aussi, Mercury et Vénus ne s'écartent-elles jamais beaucoup de la direction de l'astre du jour. Mercury 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 Mercury et de Vénus au Soleil. Dans le schéma suivant, 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 $SV = ST \sin 46^\circ \approx 0,72 ST$. Connaissant la distance Soleil-Terre, on en déduit la distance Soleil-Vénus.

Le même raisonnement appliqué à Mercury mène au résultat $SM \approx 0,39 ST$.



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

La Terre, le Soleil et une planète inférieure se retrouvent parfois alignés, dans cet ordre. La planète est alors en **conjonction supérieure** et bien sûr, inobservable.

La Terre, une planète inférieure et le Soleil se retrouvent parfois alignés, dans cet ordre. Elle est alors en **conjonction inférieure** et bien sûr, 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 11 novembre 2019 et le prochain aura lieu le 13 novembre 2032. Les transits de Vénus sont plus rares. Le dernier intervint le 6 juin 2012 et le prochain se produira le... 11 décembre 2117 !

2.4 Cas des planètes supérieures

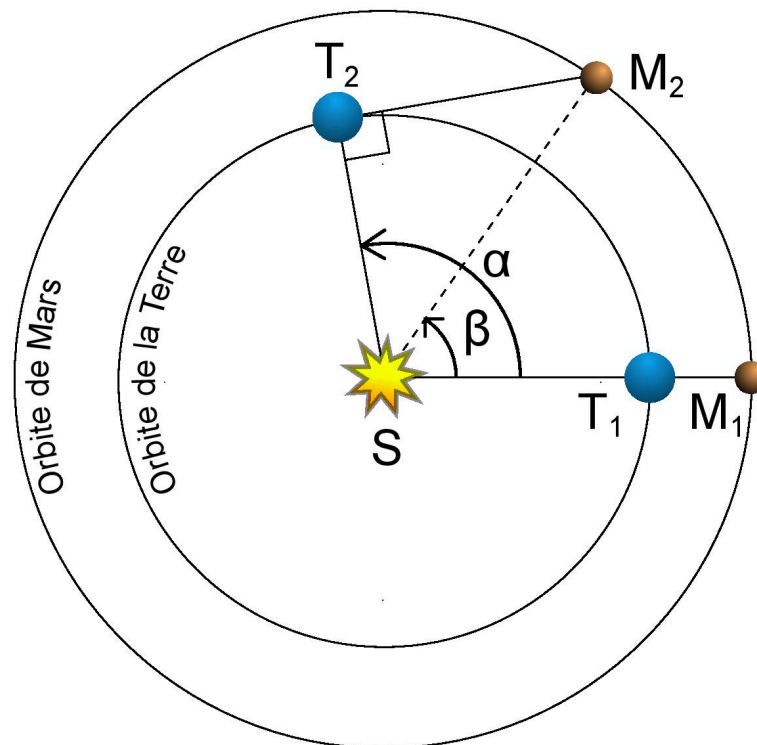
Contrairement aux planètes Mercure et Vénus, les planètes Mars, Jupiter et Saturne peuvent présenter toutes les élongations possibles par rapport au Soleil, car leur orbite englobe celle de la Terre.

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 de la page suivante. 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 $SM_2 \approx 1,5 ST_2$.

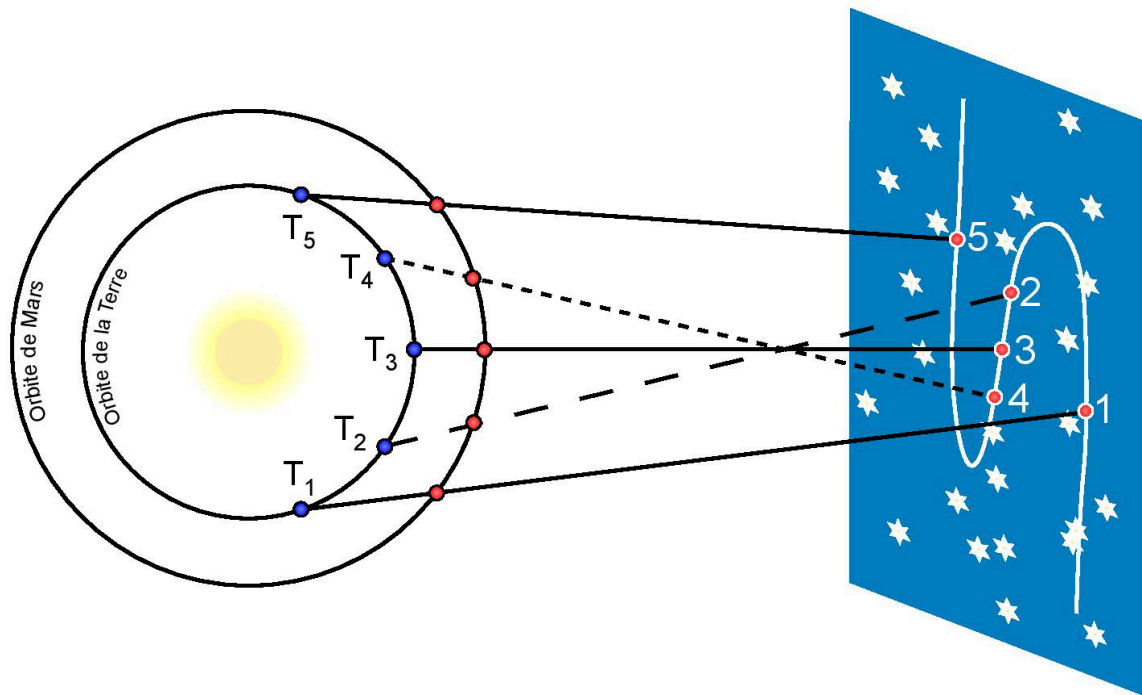
Le même raisonnement appliqué à Jupiter et Saturne mène aux résultats Soleil-Jupiter $\approx 5,2 ST$ et Soleil-Saturne $\approx 9,5 ST$.



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.

2.5 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 et de reproduire, 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 $1,9^\circ$.

3 Les lois de Kepler

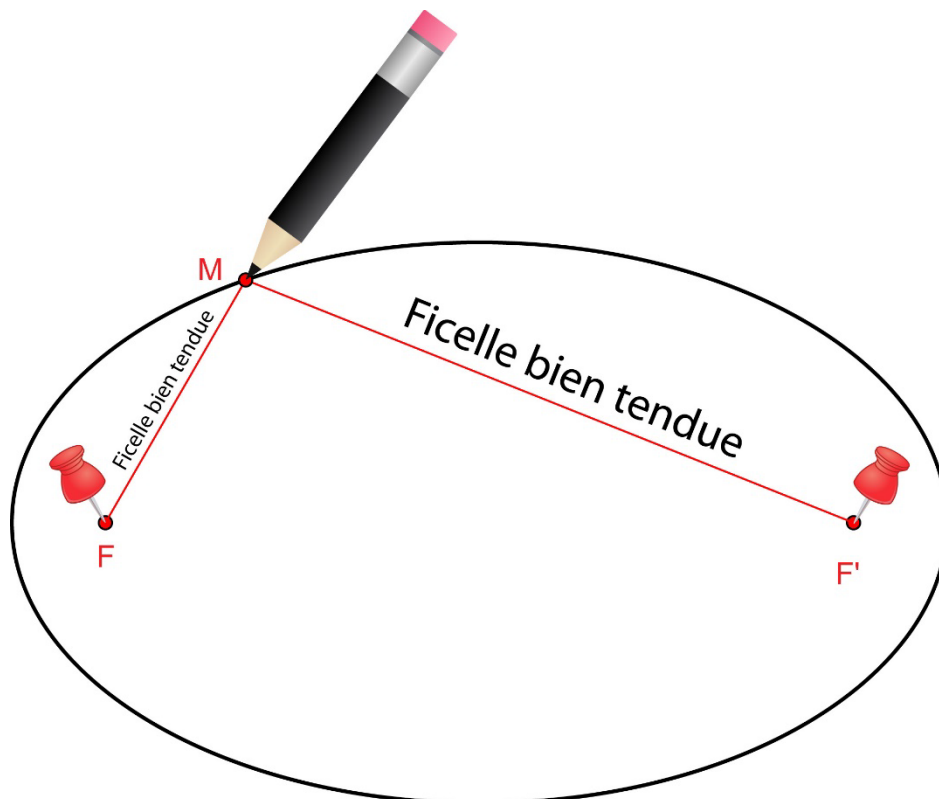
Les trois lois de Kepler gouvernent le mouvement des planètes autour du Soleil. Les deux premières furent publiées en 1609 dans *Astronomie Nova* et la troisième en 1619 dans *Harmonices Mundi*. Pour les établir, Johannes Kepler (1571 – 1630) exploita la masse considérable d'observations des positions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

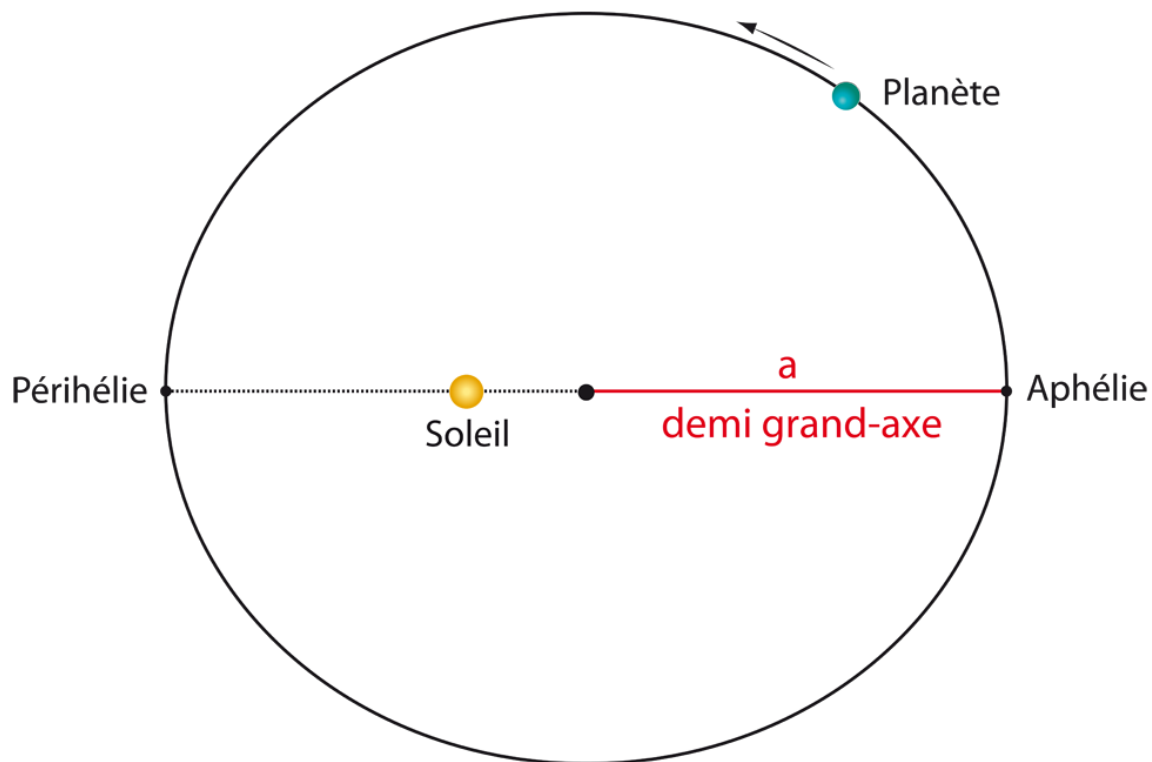
3.1 Première loi de Kepler

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.



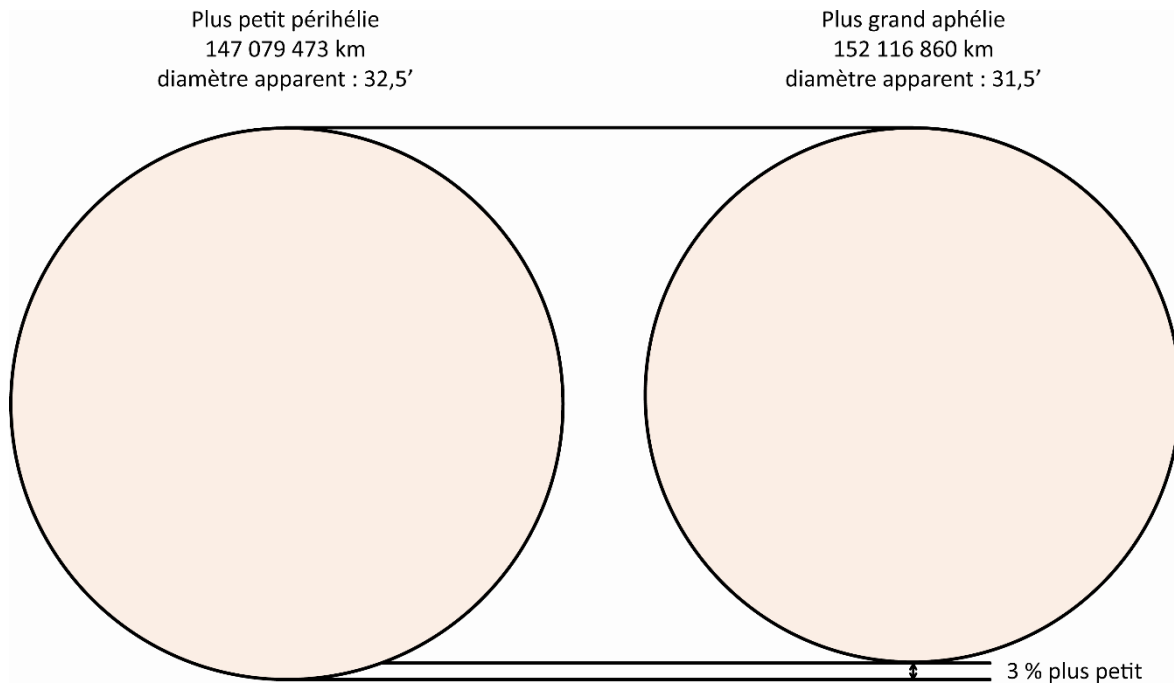


Cette figure théorique est perturbée par l'action gravitationnelle des autres corps du système solaire. Dans le cas de la Terre, les perturbateurs sont la Lune, Vénus, Jupiter et Saturne.

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.

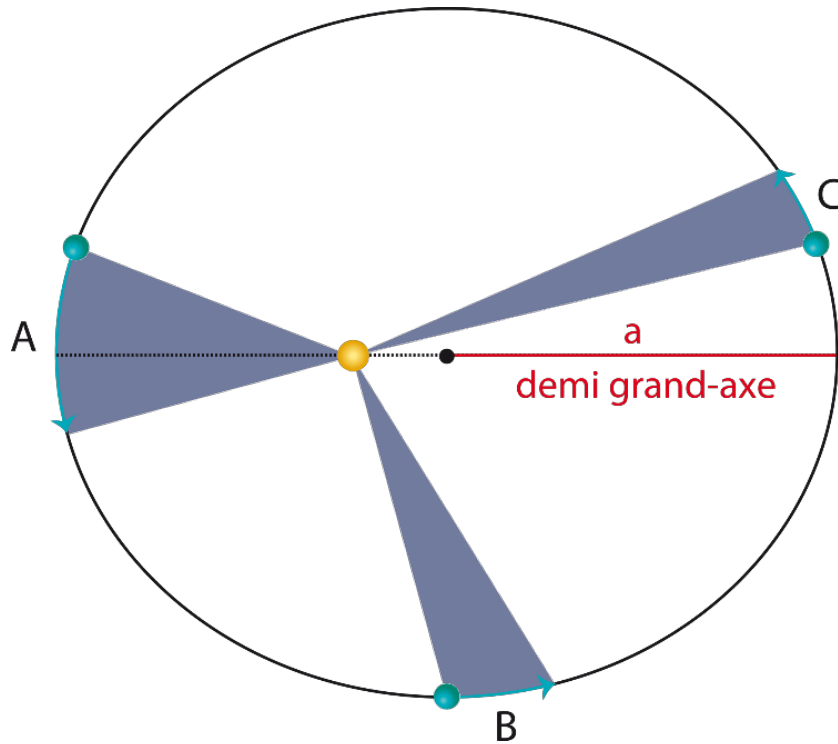
En tout cas, c'est au début de l'hiver dans notre hémisphère que nous sommes au plus près du Soleil, et au début de l'été que nous en sommes le plus loin ! Les saisons ne trouvent ainsi pas leur cause dans la distance variable Terre-Soleil, car il y a un phénomène bien plus important en un lieu donné : 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° 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 d'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.



3.2 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 deuxième 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 $a \left(1 + \frac{e^2}{2}\right)$ 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. La différence est toute petite, car l'excentricité de notre orbite l'est également.

3.3 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 $\frac{a^3}{T^2} = \text{constante}$.

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 84,3 ans. Avec $a_{\text{Terre}} = 1$, $T_{\text{Terre}} = 1$, $T_{\text{Uranus}} = 84,3$ et l'équation $\frac{a_{\text{Terre}}^3}{T_{\text{Terre}}^2} = \frac{a_{\text{Uranus}}^3}{T_{\text{Uranus}}^2}$, il vient directement $a_{\text{Uranus}} \approx 19,2$ (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

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

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

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

Avec $a \approx 149\,600\,000$ km, $T = 1$ an $= 3,156 \cdot 10^7$ s et $G = 6,674 \cdot 10^{-11}$ m³.kg⁻¹.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...

4 **Enfin, 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 ? À la suite de cette découverte, des astronomes se sont penchés sur la question : qu'est-ce qu'une planète ?

Le feu aux poudres

En 1992, les astronomes découvrirent 1992 QB₁, un corps d'environ 400 km gravitant au-delà de Neptune. Aujourd'hui, près de 3000 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...

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 2021, on compte cinq planètes naines (Cérès, le plus gros des astéroïdes, et quatre transneptuniens : Pluton, Éris, Hauméa et Makémaké) et quatre plutoïdes (Pluton, Éris, Hauméa et Makémaké). Plusieurs dizaines d'autres objets peuvent prétendre au statut de planète naine et de plutoïde.

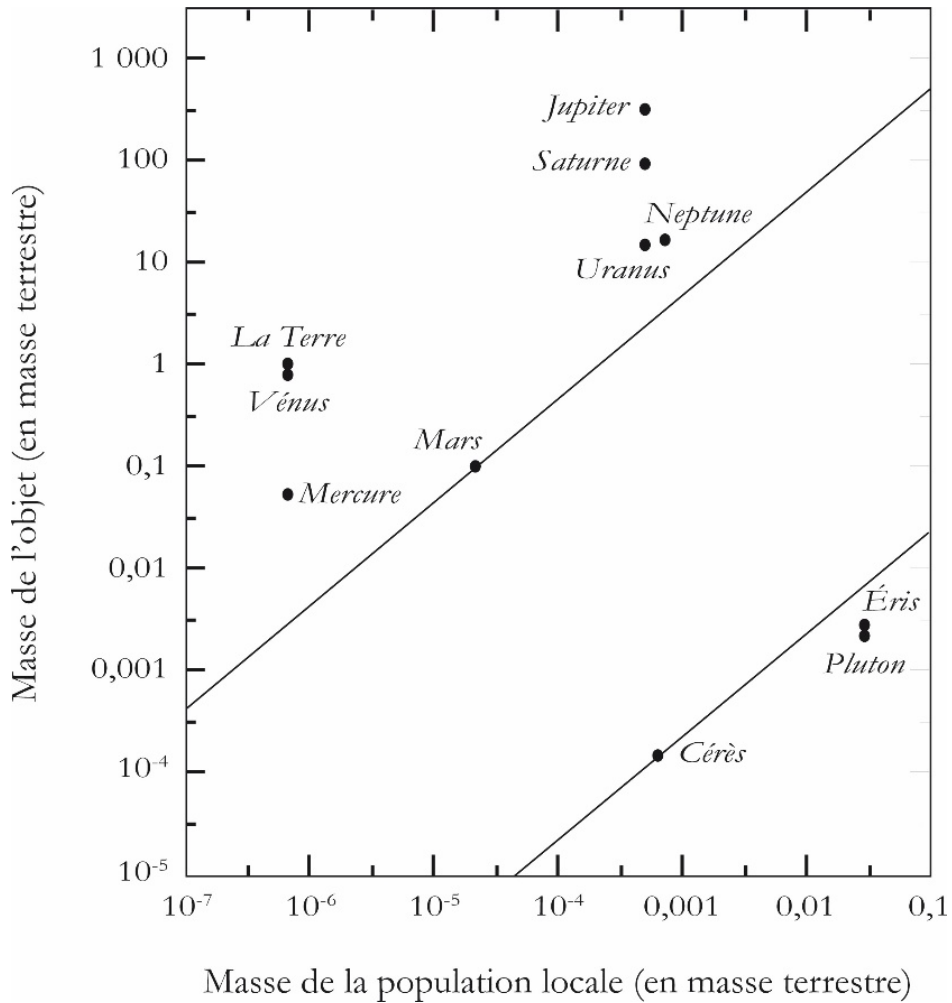


Le Soleil et ses huit planètes. Crédit : Union astronomique internationale / Martin Kornmesser.

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.

Examinons 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 dominent 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-ambiguë du terme *planète*.

Nous verrons, dans la troisième fiche, que les chasseurs d'**exoplanètes**, ces planètes en orbite autour d'autres étoiles que le Soleil, n'utilisent bien évidemment pas la définition proposée ici. En effet, comment savoir qu'un corps qu'on ne voit même pas est sphérique ou a fait le ménage autour de lui ? Le critère qu'ils utilisent s'appuie sur la masse des corps célestes détectés. Nous y reviendrons !

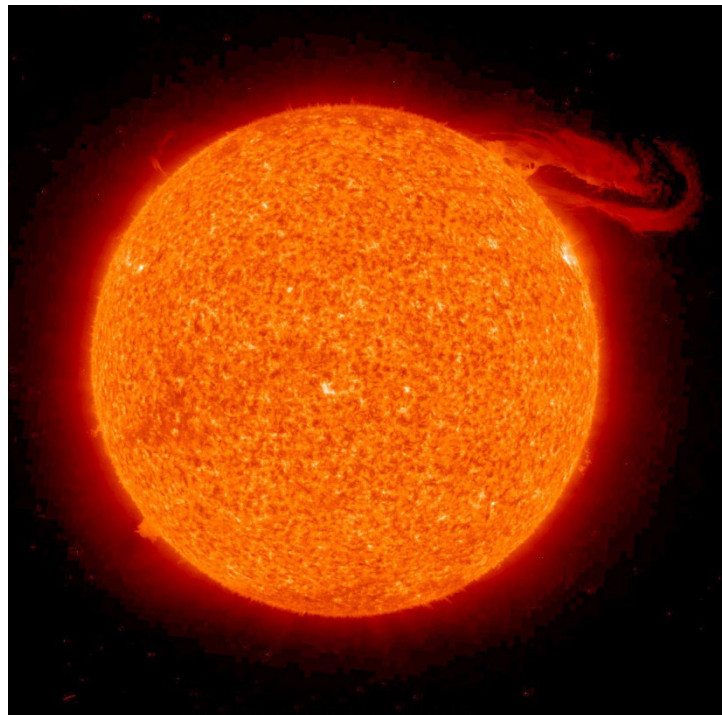
5 Une brève description des différents corps du système solaire

Le Soleil est une étoile tout à fait banale, d'un diamètre de 1 400 000 km et d'une masse équivalente à 330 000 fois celle de la Terre. Il se situe à environ 150 millions de kilomètres de nous. Il est essentiellement composé d'hydrogène (90 %) et d'hélium (10 %) et tourne sur lui-même selon une rotation différentielle : sa période est de 24 jours à l'équateur, 28 jours à une latitude de 30° et 31,5 jours à une latitude de 75°.

Sa surface est parfois constellée de taches. Ce sont des zones où le champ magnétique est intense. Ce champ freine les mouvements de convection qui apportent en surface du matériau chaud venue des zones profondes. Les taches solaires sont donc plus froides que la matière environnante et paraissent sombres par contraste.

Le Soleil perd en permanence de la masse (plus d'un million de tonnes par seconde !) sous la forme d'un vent solaire, constitué de particules chargées comme les protons, les électrons et les noyaux d'atomes d'hélium. Au niveau de l'orbite terrestre, la vitesse du vent solaire est proche de 400 km.s⁻¹. Il émet également sporadiquement de la matière lors des éruptions solaires, qui peuvent avoir un impact sur l'atmosphère terrestre, les satellites artificiels et nos réseaux électriques.

Sur Terre, le vent solaire donne naissance aux aurores polaires, ces voiles très colorés dans les ciels nocturnes des régions situées près des pôles magnétiques de notre planète. Elles sont provoquées par l'interaction entre les particules chargées du vent solaire et la haute atmosphère terrestre. L'excitation des molécules, atomes et ions d'azote et d'oxygène sont à l'origine des principales couleurs. L'oxygène émet principalement du vert et du rouge, tandis que l'azote émet du bleu, du rouge et du violet. L'hélium et l'hydrogène produisent des aurores mauves ou bleues.



Une magnifique protubérance solaire observée par l'un des deux satellites jumeaux de la mission spatiale *STEREO* (pour Solar TERrestrial RELations Observatory) dans l'ultraviolet extrême (à 30,4 nm) le 29 septembre 2008. Crédit : NASA.

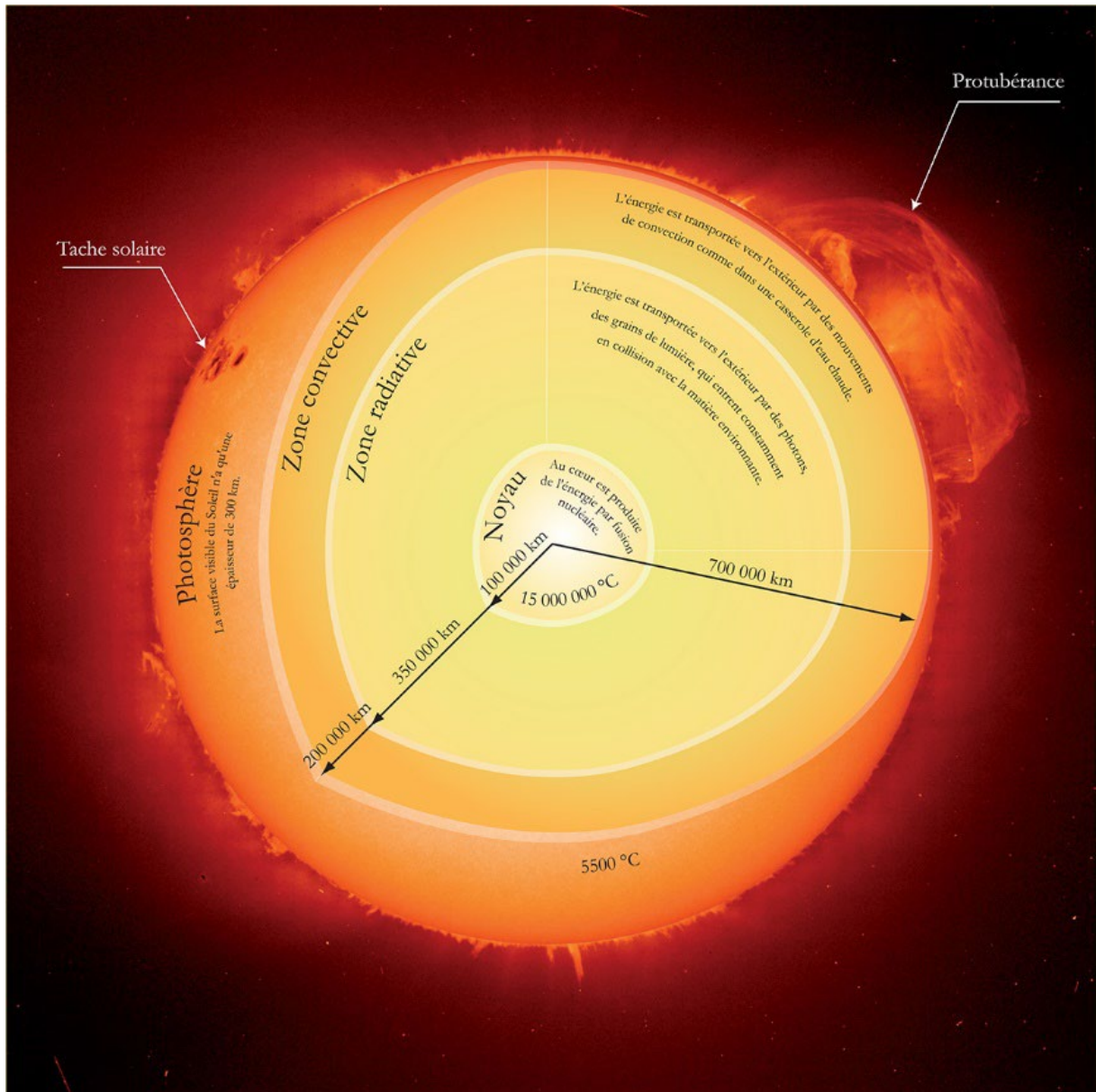
Le Soleil et les étoiles sont d'énormes boules de gaz dont la surface, très chaude, émet de la lumière. Leur vie est un combat permanent, un équilibre entre la gravité qui tend à les faire s'effondrer sur elles-mêmes et la pression des gaz qui résistent à cet effondrement.

Une étoile brille parce que sa surface est chaude. Au bout de quelques millions d'années, l'étoile devrait s'être suffisamment refroidie pour disparaître à notre regard. Or, notre Soleil a déjà près de 5 milliards d'années. Il possède donc une source d'énergie interne qui lui permet de briller depuis si longtemps. En son cœur, là où les températures et les pressions sont extrêmes, des réactions nucléaires produisent de l'énergie en transformant de l'hydrogène en hélium. Des modèles confortés par diverses observations nous apprennent que l'énergie produite à l'intérieur du Soleil est transportée vers l'extérieur, d'abord par rayonnement, puis par mouvements de convection pour enfin atteindre la surface et s'échapper principalement sous forme de lumière visible.

Rappelons que les trois modes de transfert de la chaleur sont :

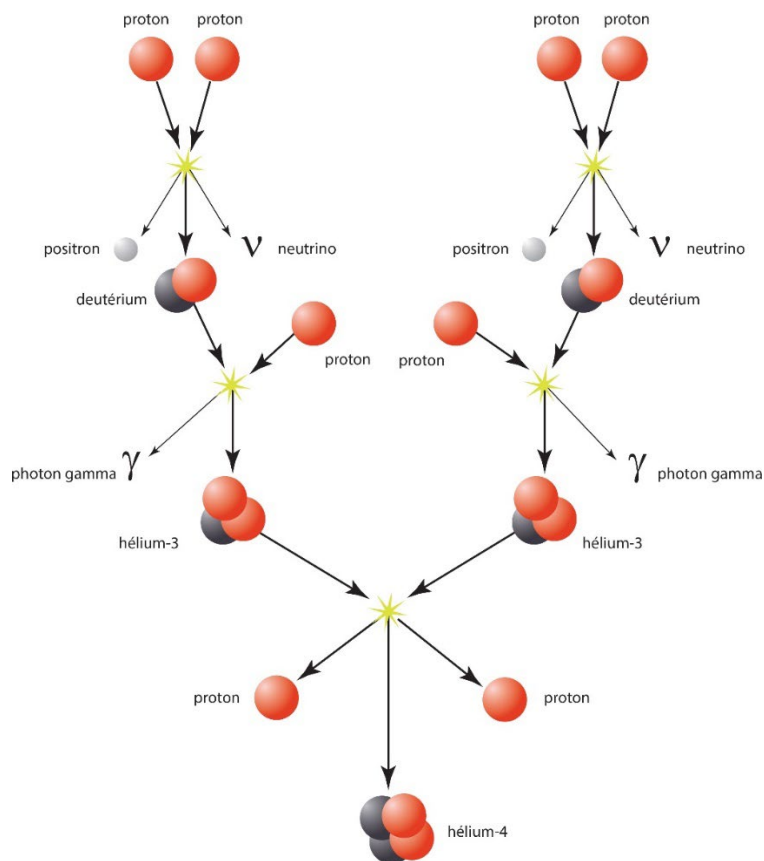
- la **conduction**, provoquée par une différence de température entre deux régions voisines en contact, sans déplacement de matière. Elle concerne donc les solides et les fluides immobilisés ;
- la **convection**, qui s'accompagne de mouvements macroscopiques de matière dans un fluide et à l'interface entre un solide et un fluide ;
- le **rayonnement**, qui peut se réaliser dans le vide.

L'énergie est produite au cœur du Soleil sous la forme de photons gamma, extrêmement énergétiques. Ce cœur est entouré d'une première coquille très dense, appelée zone radiative. Les photons gamma y passent un temps considérable, étant absorbés, réémis, réabsorbés, etc., par la matière environnante. Le transport de l'énergie se fait donc par rayonnement, de proche en proche, de choc en choc. À mesure que l'énergie est transportée par les photons vers l'extérieur, ils se font de moins en moins énergétiques : de photons gamma, ils deviennent photons X puis ultraviolets etc. La faible opacité des couches supérieures facilite les mouvements de matière. Le mode de transport d'énergie change, une zone convective prend le relais jusqu'à la surface. Comme dans une casserole d'eau bouillante, la matière chaude en profondeur monte, puis se refroidissant redescend : la matière est ainsi brassée et l'énergie s'achemine par convection. L'énergie est ainsi transportée du cœur vers la surface qu'elle maintient à une température de 5 500 °C. La lumière est alors libre de s'échapper vers l'espace : le Soleil rayonne.



Structure interne du Soleil. Crédit : Marc Goutaudier.

Les réactions nucléaires débutent par la fusion de deux noyaux d'hydrogène, c'est-à-dire deux protons. Cette fusion donne naissance à un positron, à un neutrino et à un noyau de deutérium, formé d'un proton et d'un neutron. Le deutérium capture un proton pour former un noyau d'hélium-3 et un photon gamma très énergétique. Enfin, deux noyaux d'hélium-3 réagissent pour former un noyau d'hélium-4 et deux protons.



Au final, quatre protons fusionnent pour donner un noyau d'hélium. Or, la masse d'un noyau d'hélium est inférieure à la somme des masses des quatre protons initiaux. Le défaut de masse Δm est transformé en énergie ΔE , selon la célèbre formule d'Einstein $\Delta E = \Delta mc^2$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide (notez bien qu'Einstein a trouvé cette formule dans un contexte complètement différent et qu'il n'avait pas alors pensé qu'on pouvait l'appliquer aux étoiles !). Ainsi, chaque seconde, le Soleil convertit environ 600 millions de tonnes d'hydrogène en 596 millions de tonnes d'hélium. Quatre millions de tonnes sont converties en énergie.

Les neutrinos sont des particules extrêmement légères issues directement des réactions nucléaires. Ils n'interagissent que très peu avec la matière, ce qui rend leur détection particulièrement difficile. L'expérience japonaise Super-Kamiokande – un bassin rempli de 50 000 tonnes d'eau ultra-pure et bardé de capteurs – a permis aux astronomes de détecter des neutrinos solaires, confirmant ainsi que la source d'énergie du Soleil réside bien dans des réactions thermonucléaires.

Pendant une très grande partie de sa vie, les étoiles connaissent une phase de stabilité durant laquelle elles convertissent leur hydrogène central en hélium. Il est assez contre-intuitif de se dire que plus une étoile est massive, plus sa durée de vie sera courte. En effet, malgré des réserves en hydrogène plus importantes, les étoiles massives le consomment à un rythme effréné. Ainsi, une étoile de 60 masses solaires a une durée de vie de 3 millions d'années alors qu'une étoile 10 fois moins massive que la nôtre devrait vivre 1000 milliards d'années !

Les planètes

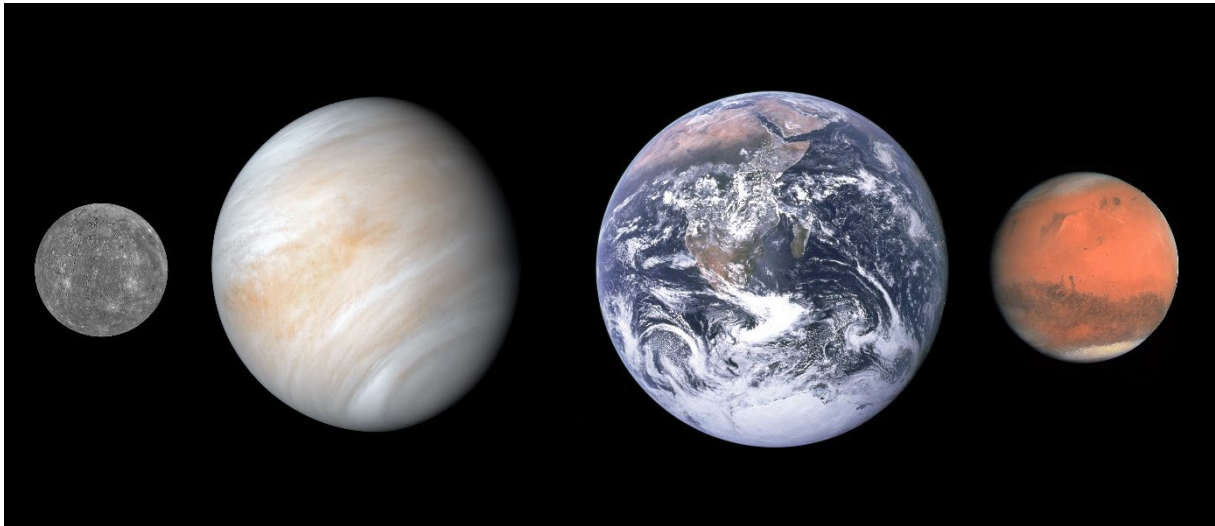
Mercure, la plus petite planète du système solaire, est la plus proche du Soleil et l'une des moins bien connues. Sa surface, très ancienne, est parcourue de failles et de fractures. Elle est criblée de cratères de toutes tailles, d'origine météoritique, qui la font ressembler à la Lune. La quasi-absence d'atmosphère explique la très forte amplitude thermique entre les zones exposées au Soleil et les régions plongées dans la nuit. Bien que trois fois plus petite que la Terre en diamètre, Mercure est presque aussi dense. Elle doit donc posséder un noyau imposant, composé essentiellement de fer, dont le diamètre représenterait les trois quarts de celui de la planète.

Surnommée l'étoile du Berger, Vénus est la deuxième planète par ordre de distance au Soleil. Son atmosphère se compose majoritairement de dioxyde de carbone (CO₂). Elle est le siège d'un effet de serre colossal. L'avènement des techniques radar et des sondes spatiales a permis de dévoiler la surface de Vénus, masquée en permanence par une couche de nuages réfléchissants. La planète est recouverte de coulées de laves solidifiées, conséquences d'une activité volcanique récente et intense.

La Terre est la troisième planète que l'on rencontre en s'éloignant du Soleil. La spécificité de la Terre est la présence d'une activité biologique et la coexistence à sa surface des trois états de l'eau (solide, liquide et gazeux). Son système atmosphérique complexe, gouverné par l'énergie reçue du Soleil, est en constante interaction avec les océans et les êtres vivants. Elle dispose d'une source de chaleur interne à l'origine du volcanisme, des séismes et de la tectonique des plaques. La Terre est une planète active.

La Lune est le satellite naturel de la Terre et le seul corps extraterrestre à avoir été visité par l'Homme. Elle effectue un tour sur elle-même dans le même temps qu'elle fait un tour autour de la Terre. Aussi n'en voyons-nous qu'une seule face. La Lune est un astre géologiquement mort. Sa surface criblée de cratères n'a pratiquement pas connu d'évolution depuis 3,5 milliards d'années, époque à laquelle a cessé le grand bombardement météoritique qui a touché tous les corps du système solaire. La Lune serait née de la collision entre un objet de la taille de Mars et notre planète, il y a plus de quatre milliards d'années.

Mars est la quatrième planète par ordre de distance au Soleil. Parfois surnommée la planète rouge, elle doit sa couleur caramel à l'oxyde de fer présent dans les minéraux de sa surface. Mars est le siège de phénomènes climatiques de grande ampleur et possède des structures géologiques qui frappent par leur gigantisme : des volcans colossaux côtoient le plus grand canyon du système solaire, des tempêtes de poussières à dimension planétaire obscurcissent d'anciennes vallées de débâcle façonnées par des inondations brutales... Aujourd'hui, Mars est un monde froid et aride mais elle conserve encore les traces d'un passé lointain où l'eau coulait en abondance.



Les planètes telluriques du système solaire, à l'échelle : Mercure, Vénus, la Terre et Mars. Crédit : NASA / JHUAPL (Mercure), NASA / JPL-Caltech (Vénus), NASA / Équipage d'Apollo 17 (La Terre), ESA / MPS / UPD / LAM / IAA / RSSD / INTA / UPM / DASP / IDA (Mars).

La planète Mars possède deux petits satellites de forme irrégulière, Phobos et Déimos. Les effets de marées provoqués par Mars ont stabilisé leur mouvement en rotation synchrone : ils présentent toujours la même face à la planète. Ces mêmes forces imposent à Phobos un lent mais inexorable rapprochement de la surface martienne. D'ici quelques dizaines de millions d'années, il devrait se briser et former un anneau planétaire. L'origine de Phobos et de Déimos est encore incertaine mais leur composition laisse penser que ce sont des astéroïdes capturés par Mars.

Les astéroïdes sont des petits corps rocheux, descendants lointains des planétoïdes qui ont conduit à la formation des planètes. La grande majorité gravite autour du Soleil dans une ceinture comprise entre les orbites de Mars et de Jupiter. En ce début de XXI^e siècle, plus de 700 000 astéroïdes ont été découverts mais leur nombre réel serait bien plus grand. Leur taille s'étale du mètre à 900 km pour Cérès, les plus petits étant les plus nombreux. La surface des astéroïdes est saturée en cratères d'impact de toutes tailles, ce qui démontre le rôle majeur joué par les chocs tout au long de leur histoire.

Peu après la formation du système solaire, les astéroïdes massifs contenaient des quantités importantes d'éléments radioactifs. La chaleur dégagée par la désintégration de ces éléments a fait partiellement fondre leur intérieur. Ainsi, les éléments lourds comme le fer et le nickel ont plongé et se sont concentrés en leur cœur pour former un noyau métallique. Les plus légers sont restés en périphérie et ont formé un manteau silicaté. On dit des astéroïdes massifs qu'ils sont *différenciés*. Les petits astéroïdes et les comètes ne le sont pas : leur structure est homogène.

À l'échelle de millions d'années et sous l'effet de collisions entre eux, les astéroïdes se sont fragmentés en blocs.

La Terre reçoit près de 30 000 tonnes de matière interplanétaire par an. Formée essentiellement de poussières, cette matière contient aussi des corps plus imposants qui, s'ils sont retrouvés sur Terre, prennent le nom de météorites. On pense que la composition des météorites reflète celle des corps parents leur ayant donné naissance. Ainsi, les météorites sidérites seraient issues du noyau d'astéroïdes massifs, les achondrites du manteau et les lithosidérites de la frontière entre noyau et manteau. Les météorites issues des petits astéroïdes et des comètes sont appelées chondrites. Leur structure n'a sans doute pas été modifiée depuis leur formation et leur composition serait semblable à celle de la nébuleuse ayant engendré le système solaire.

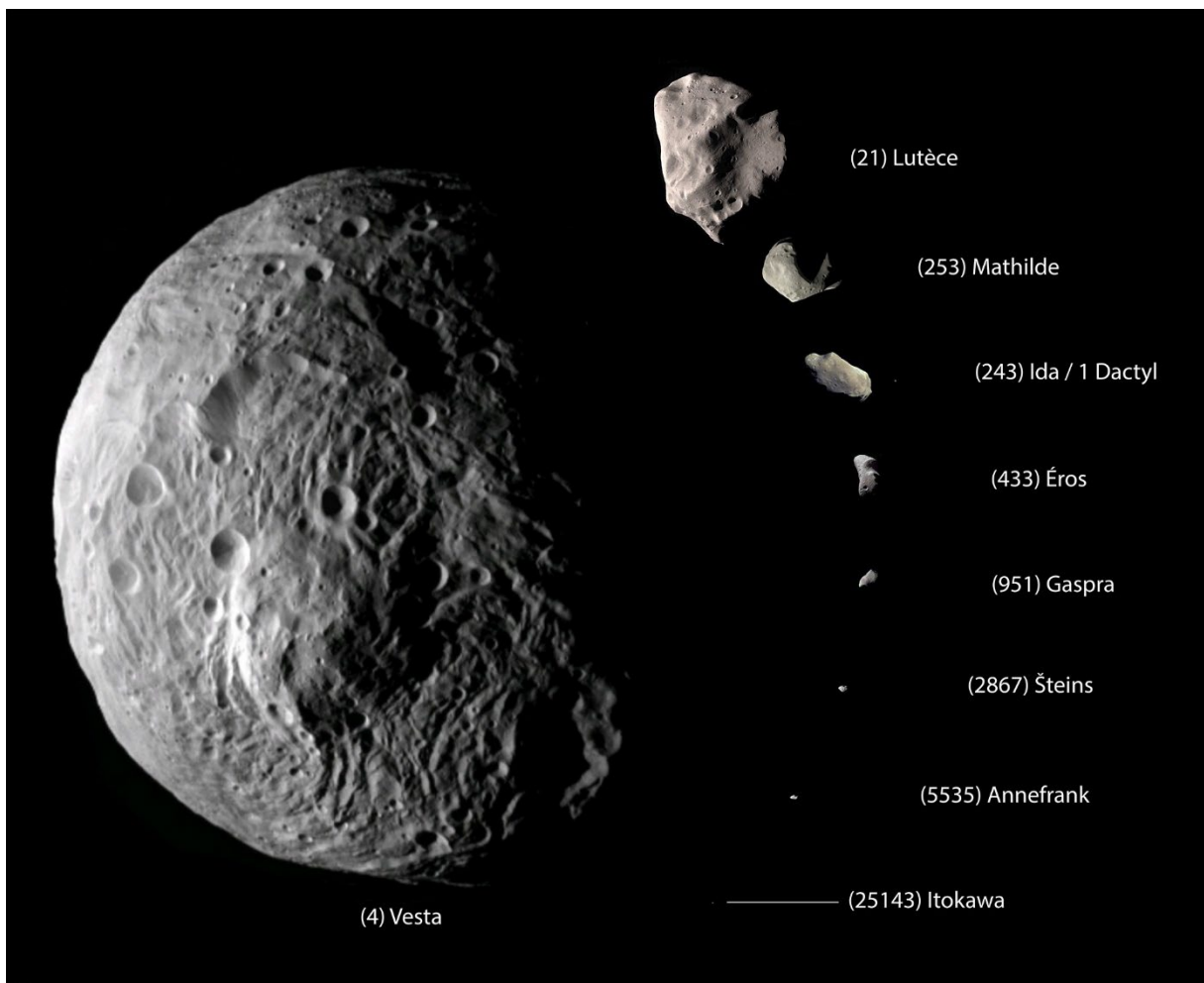


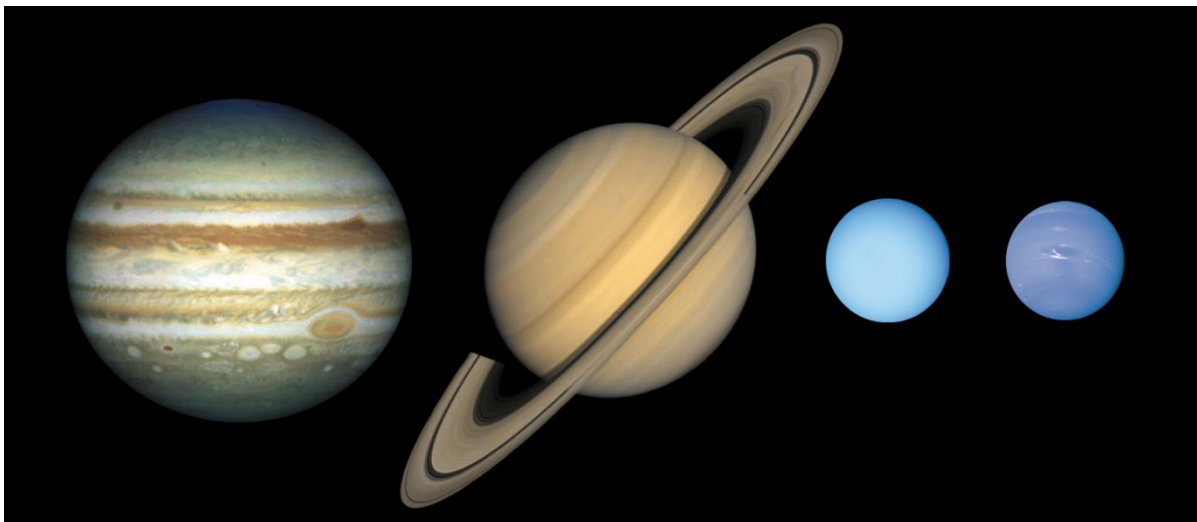
Image composite montrant les tailles respectives de neuf astéroïdes ayant été photographiés à haute résolution par des sondes spatiales, à l'exception de Cérés. Vesta est le deuxième plus gros astéroïde de la ceinture principale. Sa forme s'inscrit dans un ellipsoïde de dimensions 572,6 km × 557,2 km × 446,4 km.

Crédit : NASA / JPL-Caltech / JAXA / ESA.

Jupiter est la cinquième planète que l'on rencontre en s'éloignant du Soleil. C'est la plus massive et la plus imposante planète du système solaire. Elle effectue sa révolution autour du Soleil en douze ans mais tourne rapidement sur elle-même en moins de dix heures. L'atmosphère de cette géante de gaz est très turbulente et laisse apparaître un système de zones claires et de bandes sombres et colorées. Jupiter possède des anneaux ténus et de nombreux satellites, dont les quatre principaux sont Io, Europe, Ganymède et Callisto, découverts par Galilée en 1610.

Comparables en taille, les satellites Io et Europe diffèrent radicalement par leur aspect : Io est un corps haut en couleur dont la surface est riche en composés soufrés. Europe est un astre dont la surface glacée recouvre probablement un océan. La proximité de Jupiter et l'influence gravitationnelle mutuelle des satellites galiléens entraînent des effets de marée très importants. En déformant Io et Europe, ils provoquent le développement d'un volcanisme actif sur le premier et d'une activité géologique fondée sur la glace d'eau sur le second. Au cours de leur révolution, les quatre satellites galiléens présentent toujours la même face à Jupiter.

Plus gros satellite du système solaire, Ganymède est un objet tout en contrastes. Sa surface est partagée entre des terrains anciens, sombres et cratérisés, et des zones plus claires et plus jeunes, parcourues de failles et d'escarpements. À la différence de Ganymède, Callisto est un corps qui n'a subi pratiquement aucune altération géologique depuis sa formation. Sa surface exhibe donc de très nombreux cratères d'impact formés peu après la naissance du système solaire. Jupiter possède une soixantaine d'autres satellites de petite taille qui ont sans doute été capturés par le champ gravitationnel de la planète géante.



Les planètes géantes du système solaire, à l'échelle : Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.
Crédit : Solar System Exploration, NASA.

Saturne est la sixième planète que l'on rencontre en s'éloignant du Soleil et la deuxième plus grosse après Jupiter. Planète gazeuse entourée d'un majestueux système d'anneaux, Saturne est la moins dense et la plus aplatie. Dans l'aspect jaunâtre de Saturne s'observe un système de bandes atmosphériques semblable à celui de Jupiter mais nettement moins contrasté.

Les célèbres anneaux de Saturne font de cette planète un des joyaux du système solaire. Les anneaux principaux se nomment A, B et C, les deux premiers étant séparés par la division de Cassini. Des anneaux ténus ont été découverts récemment, comme l'anneau D, très proche de la planète, et l'anneau F, étroit et situé au-delà de l'anneau A. Les particules brillantes qui les composent sont constituées de glace d'eau presque pure. Leur taille s'étend du millièmètre de millimètre à quelques mètres. Les anneaux de Saturne dévoilent une structure très riche à toutes les échelles, qu'il faut certainement relier aux perturbations gravitationnelles induites par les nombreux satellites de la planète géante.

Titan, le plus gros satellite de Saturne, est le seul à posséder une atmosphère épaisse. Des couches de brumes orangées masquent en permanence sa surface glacée. Il existe une chimie complexe, initiée par le rayonnement ultraviolet du Soleil et par des particules chargées, dans son atmosphère de diazote (N_2) et de méthane (CH_4). Si nous savons maintenant que la surface de Titan est solide et probablement recouverte de matériaux organiques, nous commençons à peine à entrevoir la grande variété des mécanismes géologiques qui caractérisent ce satellite actif et énigmatique.

Saturne possède au moins quatre-vingts satellites. À part Titan, faisant figure de géant, ils se répartissent en deux classes. La première regroupe six satellites à la surface très réfléchissante, dont les diamètres sont compris entre 400 km et 1 500 km. Leur densité, proche de celle de l'eau, implique qu'ils sont composés essentiellement de glace. La seconde classe regroupe des petits satellites qui doivent, pour la plupart, avoir été capturés par Saturne.

Uranus est la septième planète par ordre de distance au Soleil et la troisième plus grosse. Elle présente la particularité de posséder un axe de rotation pratiquement contenu dans le plan de son orbite. Cette géante de glace doit sa couleur bleu-vert à un composé atmosphérique, le méthane, qui absorbe la partie rouge du rayonnement solaire. Sous une apparence calme, Uranus se révèle être un monde dynamique aux nuages brillants, entouré d'anneaux et de nombreux satellites.

Uranus possède ainsi vingt-sept satellites mais seuls cinq d'entre eux ont un diamètre supérieur à 150 km. Leurs surfaces cratérisées gardent le souvenir d'une activité géologique passée.

Neptune est la huitième et dernière planète du système solaire. Géante de glace, elle est à peine plus petite qu'Uranus à laquelle on la compare souvent. La couleur bleue de la planète provient de l'absorption de la partie rouge du rayonnement solaire par le méthane atmosphérique. Neptune est un monde froid mais dynamique, dont l'atmosphère est le siège des vents les plus puissants du système solaire.

Neptune a quatorze satellites dont le plus massif est de loin Triton. D'un diamètre un peu inférieur à celui de la Lune, il possède une atmosphère ténue de diazote et une orbite rétrograde qui suggère une origine par capture. Triton est un corps géologiquement actif. Notre connaissance des satellites d'Uranus et de Neptune provient essentiellement des données de la sonde *Voyager 2* qui les a survolés respectivement en 1986 et 1989.

Les quatre planètes géantes possèdent des anneaux. À la différence des anneaux brillants de Saturne, ceux de Jupiter, d'Uranus et de Neptune sont très sombres et restent difficiles à détecter depuis la Terre. Jupiter est encerclée d'anneaux diffus et d'un halo de matière, Uranus est entourée de treize anneaux de quelques kilomètres de largeur tandis que Neptune est ceinturée d'anneaux minces et d'arcs de matière.

Les transneptuniens ou *objets de la ceinture de Kuiper* sont des petits corps glacés situés au-delà de l'orbite de Neptune. Le premier fut découvert en 1992 et trente ans plus tard, on en dénombre plus de 2 000. L'immense majorité reste certainement à découvrir mais la masse totale de ces objets ne s'élèverait qu'à un dixième de masse terrestre. Leurs propriétés physiques sont encore très mal connues en raison de leur grande distance. Les transneptuniens constitueraient des résidus de la formation du système solaire. Pluton, déchue de son statut de planète, est aujourd'hui considérée comme un de ses plus gros représentants.



Comparaison des transneptuniens les plus brillants connus à ce jour. La Terre et la Lune sont représentées à la même échelle, à titre de comparaison. Ces transneptuniens possèdent tous un ou plusieurs satellites sauf Sedna. Les images de Pluton et de Charon sont de véritables photographies. Les autres ne sont que des vues d'artiste. Crédit : NASA / ESA / A. Feild (STScI).

On sait aujourd'hui que derrière l'épais mystère qui les a longtemps entourées, derrière les longues et majestueuses queues de poussières, de gaz et d'ions, les comètes cachent un noyau très sombre de glace, de roches et de poussières agglomérées dont la taille n'excède pas la centaine de kilomètres. Plusieurs milliers de comètes ont été identifiées. Certaines possèdent des orbites elliptiques et viennent périodiquement nous rendre visite. D'autres ont des trajectoires qui ne les amèneront qu'une fois près du Soleil. N'ayant été que peu altérées par l'action de l'astre du jour, les comètes apparaissent comme les vestiges du système solaire primitif.

Les orbites des comètes ont révélé qu'elles provenaient de deux réservoirs. Le premier est la ceinture de Kuiper. Elle serait la source des comètes à courte période (inférieure à 200 ans). Le second réservoir, encore hypothétique, serait sphérique et se nomme le nuage de Oort. Situé à très grande distance du Soleil (jusqu'à 100 000 unités astronomiques, soit près de deux années-lumière), il contiendrait plusieurs milliards de noyaux cométaires. Le nuage de Oort serait à l'origine des nouvelles comètes et des comètes à longue période (supérieure à 200 ans).

Notons enfin que la Terre, dans son périple autour du Soleil, coupe régulièrement la trajectoire de comètes et rencontre alors les poussières qu'elles ont laissées sur leur orbite. Ces poussières pénètrent dans notre atmosphère, s'échauffent et se consomment en dessinant des traînées lumineuses dans le ciel. Nous assistons alors à une pluie d'étoiles filantes.

6 Les atmosphères des planètes

Les atmosphères des planètes de notre système solaire diffèrent par leur densité, leur extension et leur composition chimique. D'où proviennent-elles ? Pourquoi certaines planètes sont-elles pratiquement dénuées d'atmosphère alors que d'autres en possèdent de très épaisses ? Quels sont les mécanismes qui déterminent leur composition et leur profil de température ?

La présence d'une atmosphère de gaz autour d'une planète est le résultat d'un équilibre entre la capacité de la planète à retenir son atmosphère par gravité (1) et la température du gaz (2).

→ (1) Une planète massive peut ainsi conserver son atmosphère, même si cette dernière est formée de gaz légers comme l'hydrogène. À l'inverse, une planète peu massive ne peut éventuellement retenir qu'une atmosphère composée d'atomes ou de molécules massifs.

→ (2) La température d'un gaz est directement liée à l'agitation des particules qui le composent. Plus l'atmosphère d'une planète est chaude, plus ses particules (atomes et molécules) se déplacent rapidement. Si la température est suffisamment élevée, les particules atteignent des vitesses qui leur permettent d'échapper à l'attraction de la planète.

La nébuleuse ayant donné naissance au système solaire il y a 4,6 milliards d'années était composée de 90 % d'hydrogène, de près de 10 % d'hélium et de traces d'éléments plus complexes comme le carbone, l'azote et l'oxygène. Sous quelle forme se trouvaient ces éléments lourds ?

À basse température et forte pression, il se forme un équilibre entre les molécules contenant du carbone et de l'azote au profit du méthane et de l'ammoniac (NH_3). À haute température et basse pression, l'équilibre est au profit du dioxyde de carbone et du diazote.

On peut donc s'attendre à ce qu'à de grandes distances du Soleil, les atmosphères planétaires soient riches en CH_4 et NH_3 ce qui est bien le cas des planètes géantes Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Ces planètes ont d'ailleurs pu, par leur masse importante, conserver les éléments légers (hydrogène et hélium) qui constituent aujourd'hui l'essentiel de leur atmosphère.

Plus près du Soleil, les atmosphères primaires des petites planètes telluriques, dont l'hydrogène et l'hélium se sont échappés, devraient être dominées par les molécules N_2 et CO_2 . Si ce scénario est validé sur Vénus et Mars, pourquoi y a-t-il si peu de CO_2 (0,04 %) dans l'atmosphère terrestre ? Peu après la formation de notre planète, la vapeur d'eau s'est condensée en pluies. Le CO_2 étant soluble dans l'eau, il fut absorbé par les océans et transformé par les premiers êtres vivants en carbonate de calcium (CaCO_3).

Enfin, sur Terre, l'atmosphère subit une dernière transformation due à l'activité biologique. Grâce aux plantes et à certaines bactéries, du dioxygène (O_2) fut libéré en abondance jusqu'à atteindre sa proportion actuelle de 21 % en volume.

L'atmosphère terrestre est arbitrairement divisée en quatre parties. Depuis la surface jusqu'à une altitude d'environ 15 km, on trouve une zone caractérisée par une décroissance de la température avec l'altitude : la troposphère. Le chauffage de cette zone où domine la convection provient du sol. Au-dessus de la troposphère s'étend la stratosphère, dans laquelle la température s'élève rapidement avec l'altitude, conséquence de l'absorption du rayonnement solaire ultraviolet par l'ozone (O_3). Entre 50 et 80 km d'altitude se situe la mésosphère où la température diminue jusqu'à la mésopause, pour croître à nouveau très rapidement au-delà, dans la thermosphère.

À la différence de la Terre, les planètes géantes ne possèdent pas de surface solide. L'énergie qui chauffe la partie basse de l'atmosphère — la troposphère — provient directement de l'intérieur de la planète. Au-dessus de cette zone, on trouve une région où la température augmente avec l'altitude : la stratosphère. L'augmentation de la température s'explique par l'absorption du rayonnement solaire par le méthane atmosphérique et par des particules en suspension, les aérosols.

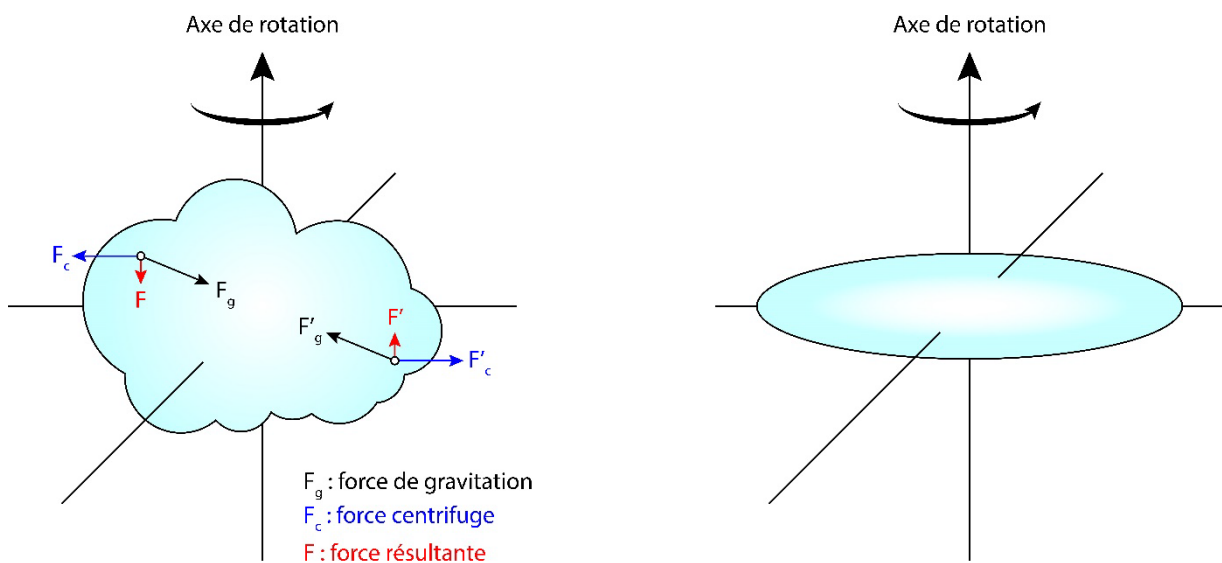


Un croissant de Lune photographié depuis les hautes couches de l'atmosphère terrestre par la Station spatiale internationale au cours de l'Expédition 13, au-dessus de la mer de Chine méridionale le 20 juillet 2006. Crédit : NASA.

7 Un scénario de formation du système solaire

C'est grâce à l'étude détaillée des objets qui le composent, à l'analyse des météorites et aux simulations numériques que l'on a pu reconstituer un scénario vraisemblable des premiers âges du système solaire.

Il y a donc environ 4,6 milliards d'années, l'un des nuages moléculaires de gaz froid peuplant notre galaxie est devenu instable, peut-être sous l'effet de l'explosion d'une étoile proche, et s'effondra sous son propre poids. Au cours de l'effondrement, la température a augmenté et le nuage s'est mis à tourner de plus en plus rapidement sur lui-même. Ce mouvement de rotation conduisit à son aplatissement sous la forme d'un disque de gaz chaud, entourant le proto-Soleil.



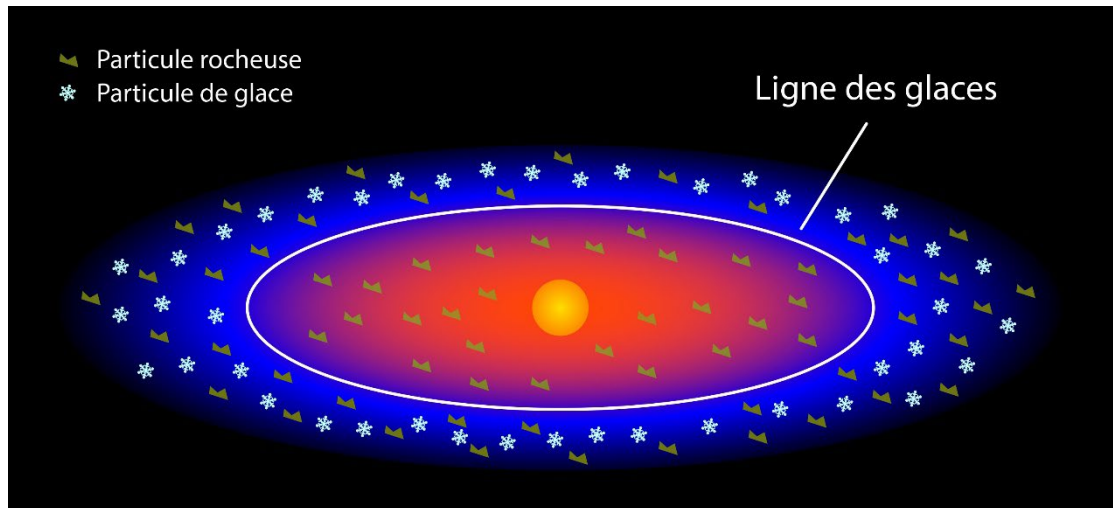
Nuage de gaz

Disque protoplanétaire

Comment la contraction d'un nuage de gaz en rotation soumis à son propre poids conduit à son aplatissement. Chaque particule de ce gaz est soumise à la fois à une force d'origine gravitationnelle due à toutes les autres particules et à une force centrifuge due à la rotation d'ensemble du nuage. La résultante de ces deux forces tend à la faire descendre dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation.

Après sa formation, le disque protoplanétaire se refroidit lentement, permettant ainsi aux gaz de condenser. Près du proto-Soleil, où la température était élevée, seuls les matériaux les plus réfractaires comme les éléments silicatés, carbonés ou contenant du fer condensèrent. Plus loin, il faisait suffisamment froid pour que des glaces se forment. Les astronomes appellent communément cette frontière la *ligne des glaces*. Sa distance au Soleil, lors de la formation du système solaire, était pour l'eau d'environ deux à trois unités astronomiques. En raison des pressions faibles existant dans le disque protoplanétaire, elle était caractérisée par une température proche de -120 °C. En-deçà, l'eau se trouvait à l'état gazeux et au-delà, à l'état solide.

Toujours est-il qu'un tel scénario fournit une explication plausible à la différence de composition chimique entre les planètes telluriques, proches du Soleil, riches en roches ainsi qu'en métaux, et les planètes géantes, riches en éléments volatils comme le méthane, l'ammoniac et l'eau.



Stratification du disque protoplanétaire ayant engendré les planètes du système solaire.
Les gaz hydrogène et hélium, qui ne condensent pas, constituent 98 % de la matière de la nébuleuse solaire
En-deçà de la ligne des glaces se forment silicates et métaux mais pas de glaces. Au-delà, elles apparaissent.

L'étape qui a mené des premiers grains condensés millimétriques à des corps de taille kilométrique (les *planétésimaux*) est encore mal comprise. Soit ce processus s'est fait progressivement par collage des grains lors de collisions, soit il s'est déroulé beaucoup plus rapidement par instabilité gravitationnelle dans le disque. Une fois les planétésimaux formés, ils ont continué à croître par collisions mutuelles, leur propre gravité les maintenant soudés après l'impact. Ainsi se sont formés des embryons de planètes de taille lunaire. Dans une dernière phase, des collisions se produisirent entre les embryons, qui ne laissèrent finalement qu'un petit nombre de planètes. Les simulations numériques suggèrent que, dans le système solaire externe (le système solaire interne inclut les corps dont l'orbite est contenue strictement à l'intérieur de celle de la planète géante Jupiter. Jupiter et les autres corps du système solaire font partie du système solaire externe.), les embryons planétaires aient pu devenir de 10 à 30 fois plus massifs que dans le système solaire interne. En effet, loin du Soleil, la zone d'alimentation d'un embryon était à la fois plus étendue et plus riche en matériau solide (présence des glaces) que près de notre étoile. Ainsi, dans le cas de Jupiter, un embryon de roche et de glace d'une quinzaine de masses terrestres se serait formé en un million d'années. Avec une telle masse, il a accréto progressivement une enveloppe de gaz. Quand la masse du gaz devint comparable à celle de l'embryon, l'accrétion du gaz s'emballa de manière violente. L'embryon s'entoura d'une atmosphère très massive et devint une protoplanète géante. Quant au Soleil, le déclenchement de réactions nucléaires marqua son accession au statut d'étoile.

L'observation des disques circumstellaires révèle qu'ils disparaissent en moins de 10 millions d'années, peut-être sous l'action conjointe d'un vent stellaire intense et de la photo-évaporation due au rayonnement ultraviolet de l'étoile centrale et de celui des étoiles environnantes. La disparition du disque mit un terme à la croissance des planètes géantes. Jupiter et Saturne ont alors atteint une masse respective d'environ 300 et 100 masses terrestres. Uranus et Neptune, situées très loin du Soleil, sont beaucoup moins massives (une quinzaine de masses terrestres) et n'ont sans doute pu atteindre la phase d'accrétion violente du gaz avant la dissipation du disque. Les simulations numériques indiquent que, près du Soleil, les planètes telluriques atteignent leur taille actuelle plus lentement, en une centaine de millions d'années.

Notons enfin que certaines modélisations suggèrent que les planètes géantes ne se soient pas formées à l'endroit où elles se situent aujourd'hui : elles auraient migré de manière complexe jusqu'à leurs positions actuelles, par interaction avec le disque de gaz leur ayant donné naissance puis par résonance orbitales entre elles. Ces migrations auraient causé des phénomènes dynamiques violents et chaotiques, comme le grand bombardement tardif, il y a entre 4,1 et 3,8 milliards d'années, ayant par exemple laissé de nombreux cratères d'impact sur la Lune

À retenir

Le scénario de formation du système solaire que nous venons de décrire implique, entre autres, que :

- les planètes tournent toutes autour du Soleil selon des orbites pratiquement circulaires, dans le même sens et quasiment dans le même plan ;
- près du Soleil, on trouve de petites planètes solides et loin du Soleil, des planètes géantes et gazeuses.

Ce scénario a-t-il une portée universelle ou ne s'applique-t-il qu'à notre système ? On a pu croire à son universalité. Les systèmes planétaires que l'on s'attendait à découvrir il y a quelques décennies ne pouvaient que ressembler au nôtre. Et pourtant...

On avait négligé ou sous-estimé certains paramètres. D'autres n'avaient pas été intégrés dans les simulations numériques en raison de leur trop grande complexité. L'interaction gravitationnelle entre planètes, l'interaction gravitationnelle des planètes avec le disque de gaz leur ayant donné naissance, la viscosité de ce gaz, sa turbulence, l'action des champs magnétiques... sont désormais plus ou moins bien comprises, modélisées et incluses dans les simulations.

Ce scénario, solide et profond, s'est montré suffisamment souple pour pouvoir être complété et amélioré sans trop de difficulté. Il ne ferme pas la porte à des configurations planétaires plus exotiques, dont on peut étudier la stabilité dynamique à long terme... telles celles que nous réserve la fiche pédagogique suivante, dédiée aux exoplanètes.