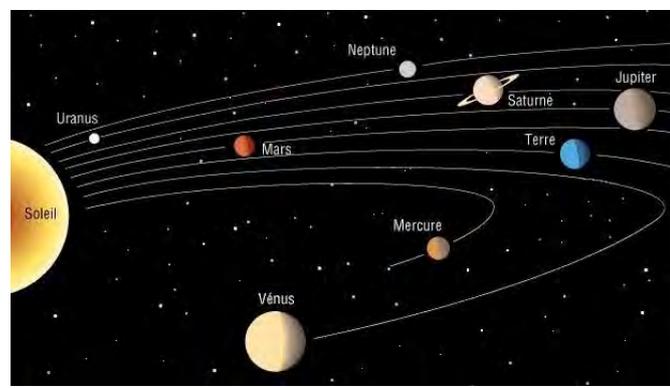


# LE SYSTÈME SOLAIRE



## I- Formation du Système solaire

**1- Âge.** Le Système solaire s'est formé il y a 4,5 milliards d'années.

*Pierre BOUTELOUP*

**2- Formation.** Le Système solaire s'est formé par l'effondrement gravitationnel d'un immense nuage moléculaire de gaz et de poussière faisant partie d'une nébuleuse. On peut donner comme exemple de tels nuages s'effondrant, les piliers de la création dans l'amas ouvert d'étoiles M16 enveloppé par la nébuleuse de l'Aigle à 6500 années-lumière de la Terre. Il naît en effet au même moment, de ce nuage, plusieurs milliers d'étoiles regroupées dans le ciel, qui constituent un amas ouvert. L'amas ouvert le plus facile à voir dans l'hémisphère nord est celui des Pléiades. L'image ci-dessous est celle des piliers de la création.



L'effondrement peut être causé par l'onde de choc d'une supernova (étoile qui explose en fin de vie), ou par le choc de deux tels nuages. Au centre se forme l'étoile, notre Soleil. L'énergie potentielle gravitationnelle se transforme en chaleur. Quand le cœur atteint 15 millions de degrés, la réaction nucléaire transformant l'hydrogène en hélium et dégageant une énergie considérable se déclenche dans le cœur du Soleil. Sir Arthur Eddington fut le premier, dans le milieu des années 1920, à comprendre la durée de vie extrêmement longue des étoiles grâce à cette source d'énergie. Eddington s'est basé sur les résultats expérimentaux récents de Francis Aston, comme quoi quatre protons (noyau de l'atome d'hydrogène) ont une masse supérieure au noyau de l'atome d'hélium qu'ils produisent par fusion. S'appuyant ensuite sur la relation  $E = m C^2$  d'Einstein, Eddington en déduisit l'énergie colossale dont disposaient les étoiles.

Il est intéressant à ce propos de raconter l'anecdote suivante, rapportée entre-autres par Feynman : Eddington était assis dehors par une douce soirée avec sa compagne, juste après avoir fait sa découverte. Tout à coup elle dit : « Regarde comme les étoiles rayonnent avec force ce soir ». Il lui répondit alors : « Oui, et ce soir, je suis le seul sur la Terre qui sait pourquoi. » Cette anecdote est également racontée dans le livre Le roman du Big Bang de Simon Singh.

**3- Aplatissement.** Si le nuage ne tourne pas sur lui-même, toute la matière s'effondre au centre en une étoile sans planète. Si le nuage tourne sur lui-même, la matière dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation et passant par le centre de gravité, est soutenue par la force centrifuge. Par contre, la matière en dehors de ce plan, oscille de part et d'autre de ce plan. À chaque fois qu'elle traverse ce plan, le frottement avec le nuage de gaz et de poussière la ralentit. L'oscillation transverse par rapport à ce plan diminue donc inexorablement, et le système devient pratiquement plan.

**4- Formation des planètes.** Les planètes provenant par concentration de ce nuage de gaz et de poussière tournant autour du Soleil, tournent bien évidemment toutes dans le même sens autour du Soleil. Dans un premier temps, le disque de gaz et de poussière en rotation avec en son centre le Soleil, contient beaucoup de gaz, essentiellement, en quantité, de l'hydrogène, puis de l'hélium et enfin aussi beaucoup de vapeur d'eau.

Au début, il se forme la ligne de neige à environ 8 fois la distance de la Terre au Soleil (8 U.A.) Il s'agit d'une coquille sphérique de ce rayon où la vapeur d'eau est suffisamment loin de la chaleur du Soleil pour se condenser en glace, produisant une augmentation de la densité de la nébuleuse par environ un facteur 5.

Les calculs montrent que, à cet endroit, un noyau rocheux d'une masse d'environ 10 fois la masse de la Terre se forme en 300 000 ans. Il peut alors provoquer l'accrétion gravitationnelle de l'hydrogène et de l'hélium de la nébuleuse, avant que ces gaz ne soient chassés en environ un million d'années par le vent solaire. Dans cette région se forment les planètes géantes Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.

Uranus et Neptune n'ont pratiquement pas réussi à capter de gaz de la nébuleuse. Il ne faut donc pas parler des planètes gazeuses en général, mais des planètes géantes. En effet Uranus et Neptune sont des planètes glacées pratiquement dépourvues d'hydrogène et d'hélium (environ quelques masses terrestres de ces gaz).

Le fait que les orbites des planètes soient approximativement circulaires provient de l'interaction avec les planétésimaux (débris de différentes tailles) et le gaz.

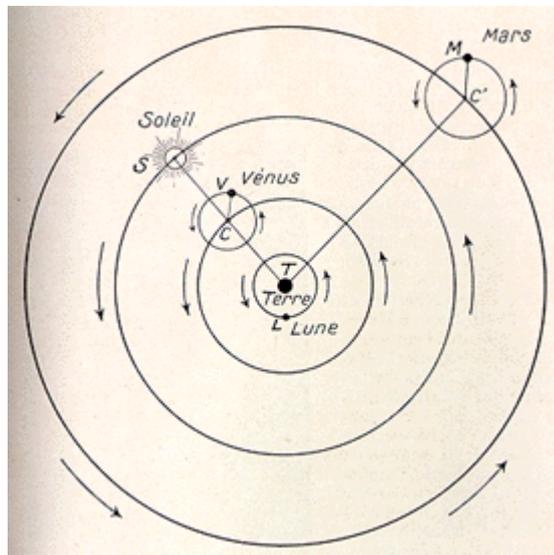
Le fait que Jupiter se soit formé avant les planètes rocheuses est prouvé par le fait qu'il a empêché la formation d'une planète au niveau de la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter. Il a en effet empêché l'accrétion de ces astéroïdes pour former une planète de la taille de Mars. Les astéroïdes sont des morceaux de roche solide pouvant atteindre plusieurs kilomètres de taille. Seuls les plus gros comme Cérès (le plus gros astéroïde) sont sphériques grâce à une gravitation suffisamment forte. Il faut pour cela une taille d'environ 300 kilomètres.

Les planètes rocheuses comme la Terre se sont formées ensuite, en entre 10 à 100 millions d'années dans un environnement sans gaz par la lente accrétion des planétésimaux rocheux à cette distance du Soleil.

L'eau de la Terre provient de la collision tardive de planétésimaux riches en glace venant de la limite de neige, c'est-à-dire de la ceinture externe d'astéroïdes.

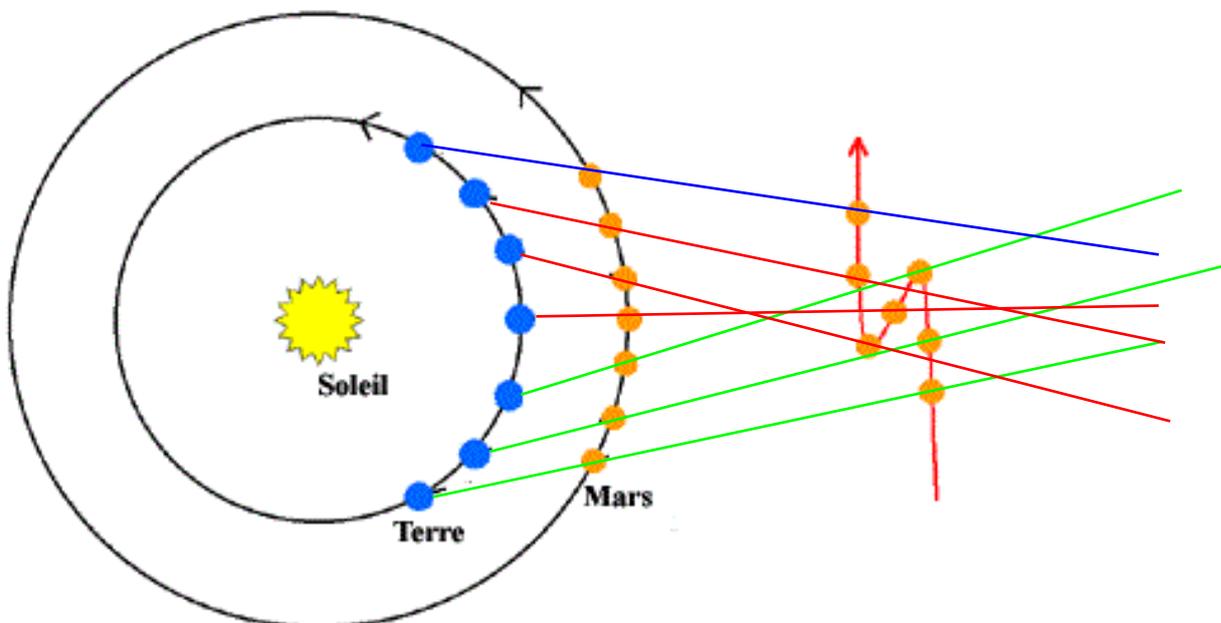
## II- Quelques repères d'histoire de l'astronomie

**1- L'antiquité.** Dans l'antiquité, les hommes pensaient que la Terre était immobile et au centre du monde. Le Soleil et les planètes tournaient autour de la Terre en décrivant des cercles, c'est la représentation géocentrique. Ptolémée (90-168) décrit dans l'Almageste (publication en 141) le mouvement des planètes et du Soleil autour de la Terre à base d'emboîtement comme des poupées russes de mouvements circulaires (Epicyles).



Ce modèle, très complexe, permet de faire des prévisions quant à la position future d'une planète dans le ciel parmi les étoiles. Il permet bien de retrouver la rétrogradation des planètes, en particulier celle de Mars. Aucune observation à l'œil nu ne permet de contredire ce modèle. Cela explique pourquoi il a été conservé aussi longtemps. Il faut faire ici la distinction entre modèle et théorie. D'une manière générale, un modèle utilise les concepts disponibles pour décrire une partie de la réalité. En revanche, une théorie contient de nouveaux concepts censés posséder une validité universelle. Le modèle de Ptolémée contient autant de paramètres ajustables que ce qu'il veut tester. Il ne présente donc un aspect scientifique que pour les positivistes. Il ne repose sur aucune théorie physique préexistante.

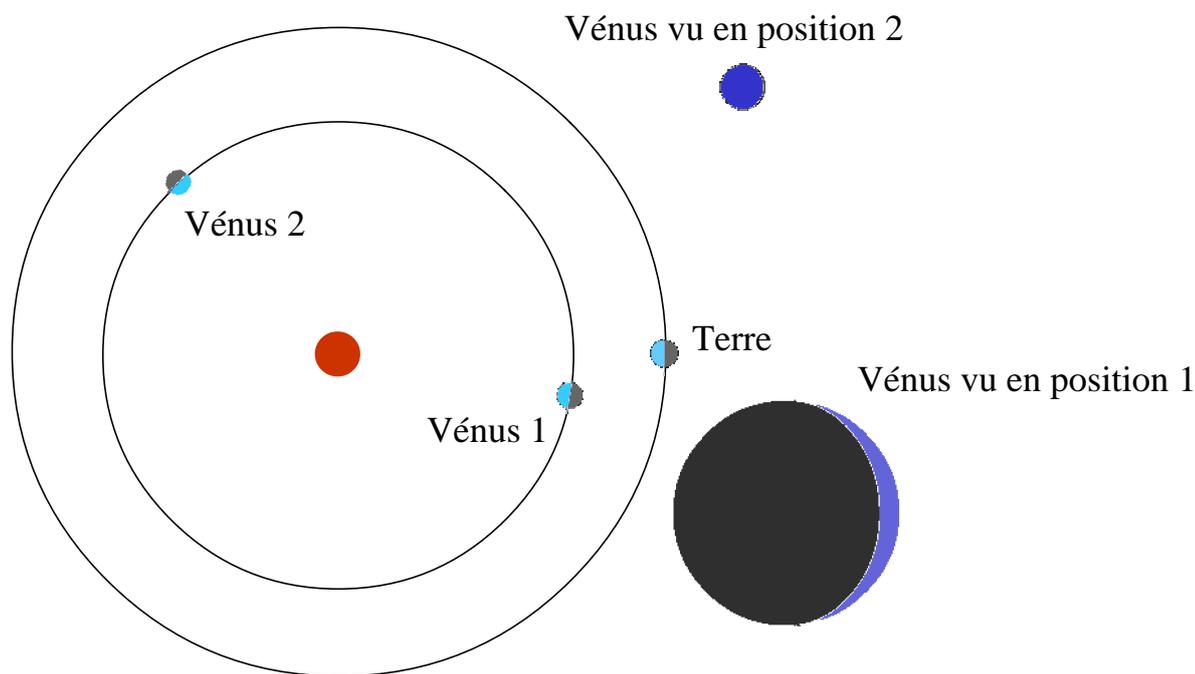
**2- La Renaissance.** Copernic (1473-1543) dans *De Revolutionibus* publié en 1543 propose un système géométrique plus simple que celui de Ptolémée : le Soleil est au centre et toutes les planètes, y compris la Terre, tournent autour de lui en décrivant des cercles. Ce système héliocentrique, contrairement à celui de Ptolémée, permet d'expliquer naturellement la rétrogradation de Mars et des planètes en général, sans ajout d'hypothèse ad hoc supplémentaire. Mais il fait même plus : il explique la diminution de la rétrogradation quand on va de Mars à Jupiter puis Saturne. Plus on s'éloigne de la Terre, plus ce mouvement apparent de rétrogradation doit en effet diminuer. Un tel accord soudain avec une multitude de faits d'observations à la suite d'un seul principe (la rotation des planètes autour du Soleil) est la caractéristique d'une théorie scientifique vraie.



Ce système permet d'expliquer naturellement pourquoi les planètes mettent plus ou moins de temps, selon leur distance au Soleil pour reprendre la même position par rapport aux étoiles. Il explique naturellement pourquoi Vénus et Mercure ne s'éloignent jamais beaucoup du Soleil.

Certes, Copernic a ensuite rajouté d'une manière ad hoc des petits épicycles pour expliquer la rotation non uniforme des planètes sur ces cercles. En effet les planètes décrivent en réalité des ellipses, géométriquement pratiquement identiques à des cercles, mais tout de même, du coup, parcourues à vitesse variable. Mais cet ajout ad hoc ne dévalorise pas l'immense révolution qu'il a introduite en astronomie. Ses petits épicycles ne sont là que pour apporter des petites corrections qu'on peut facilement négliger dans le mouvement des planètes, mais ne sont pas nécessaires pour expliquer les anomalies fondamentales de mouvement apparent que sont les rétrogradations, alors que dans le modèle de Ptolémée, elles sont nécessaires pour expliquer ces rétrogradations.

Galilée (1564-1642) fait pour la première fois des observations du ciel avec un instrument d'optique, une lunette astronomique. Il découvre des choses incroyables pour ses contemporains : des montagnes sur la Lune, des taches sur le Soleil, la rotation du Soleil sur lui-même « le monde du ciel n'est donc pas parfait », des satellites autour de Jupiter « tout ne tourne donc pas autour de la Terre », les phases et les variations en accord de la taille apparente de Vénus, qui falsifient définitivement le modèle de Ptolémée. En effet, quand Vénus est du même côté du Soleil que la Terre, il est proche de la Terre donc est vu avec une grande taille apparente. Comme on le voit éclairé par-derrière par le Soleil, on le voit alors en croissant. Quand il est du côté opposé de la Terre par rapport au Soleil, il est loin de la Terre donc vu petit, et comme on le voit éclairé par devant, on voit un disque bien rond.



Les observations de Galilée confirment donc parfaitement le système de Copernic : la Terre tourne sur elle-même et autour du Soleil. Le 12 mars 1610, il publie à Venise ses découvertes dans Sidereus Nuncius (Le Messager céleste).

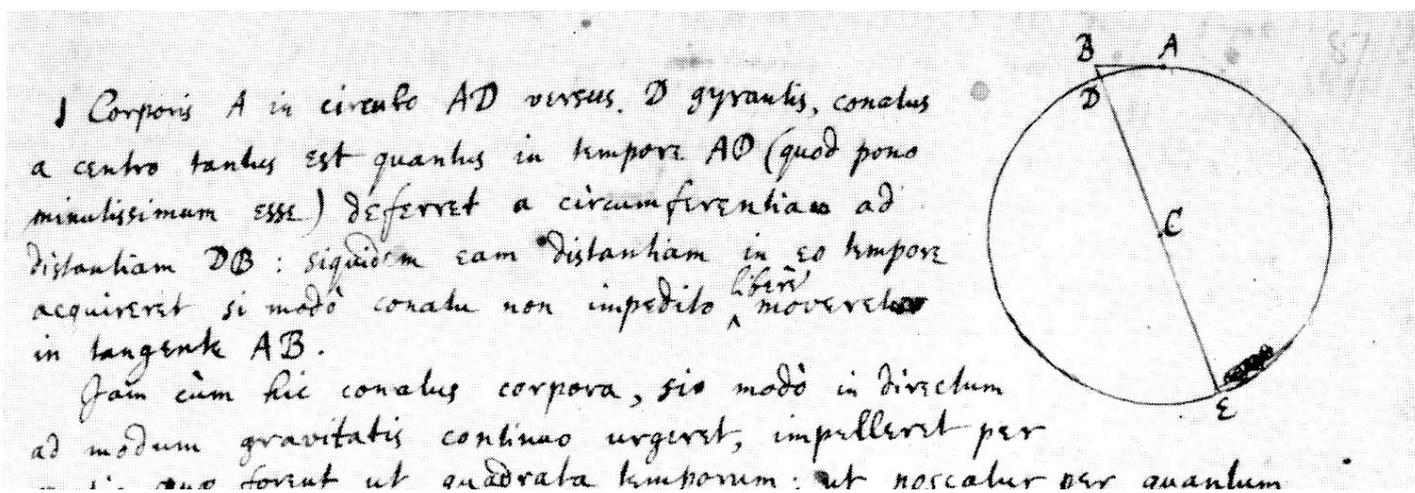
Képler (1571-1630) découvre grâce aux observations extrêmement précises de Tycho Brahé (1546-1601) que Mars a une orbite elliptique et non circulaire. La Terre et les autres planètes ont aussi une orbite elliptique. Kepler a ainsi découvert les trois lois dites de Kepler qui régissent les mouvements des planètes sur leurs orbites. Les deux premières sont publiées en 1609 dans un livre intitulé Astronomia Nova. La troisième seulement en 1618. La première loi dit que les planètes décrivent des ellipses dont le Soleil est un foyer. La

deuxième loi dit que les aires balayées par le segment de droite joignant le Soleil à la planète sont proportionnelles aux temps. La troisième loi donne  $T^2/a^3 = \text{constante}$ ,  $T$  étant la période, et  $a$  le demi-grand axe, soit la moitié de la plus grande dimension de l'ellipse.

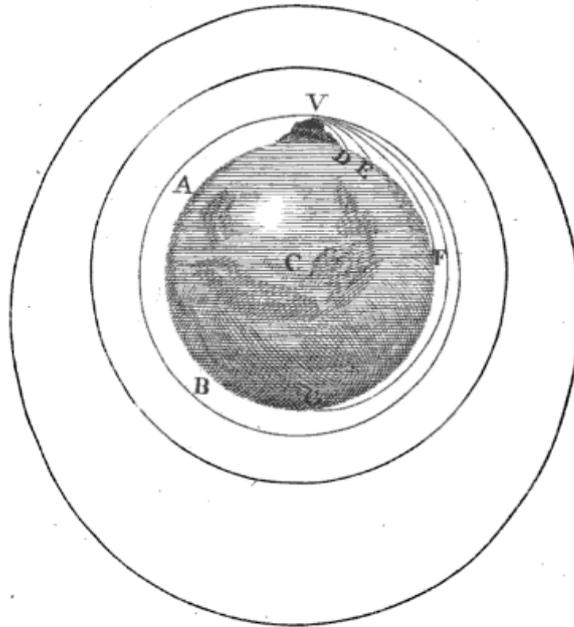
**3- Newton.** Newton (1642-1727) publie en 1687 son œuvre majeure : *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. Il y démontre les trois lois de Képler dans le cadre d'une théorie physique, la mécanique de Newton, totalement mathématisée, et apportant de nouveaux concepts : masse, inertie, force, gravitation universelle. Cette théorie résout définitivement le problème des marées.

Newton utilise les découvertes de Galilée de séparation du mouvement en ligne droite par inertie et du mouvement de chute libre. Pour un objet dans le vide, soumis à la gravitation d'un autre corps, on peut toujours pendant une courte durée  $dt$ , l'observer depuis un vaisseau spatial qui va en ligne droite à vitesse constante, tel qu'à l'instant initial  $t = 0$ , l'objet soit immobile. Dans ce vaisseau, on observe alors pour l'objet, le pur mouvement de chute libre. La hauteur de chute est celle trouvée par Galilée  $h = 1/2 g t^2$ .  $g$  est l'accélération de la gravité à cet endroit :  $g = G M/d^2$  ;  $M$  étant la masse de l'astre attirant,  $d$  la distance, et  $G$  la constante de la gravitation universelle.  $t$  est la durée de chute, depuis le temps  $t = 0$ , où l'objet est immobile. Newton en déduit la propriété suivante : Toute trajectoire d'un corps dans un champ de gravité, peut être décomposée en une suite infinie de durées infinitésimales  $dt$ . Pendant chaque durée  $dt$ , le mouvement peut être décomposé en un petit mouvement de translation en ligne droite, le même, qu'il aurait par inertie si la gravité était annulée, suivi d'un mouvement de chute comme chuterait à cet endroit-là (où au point de départ de la durée choisie  $dt$ ) un objet immobile. [La vidéo de ce lien explique très clairement cela.](#)

Il applique d'abord cette idée au mouvement de la Lune autour de la Terre. L'été 1666, Newton a 23 ans. Il fuit Cambridge où il y a une épidémie de peste. Il se retrouve dans la maison de sa mère à la campagne au manoir de Woolsthorpe à Grantham dans le Lincolnshire. Alors qu'il est assis d'une manière contemplative dans le jardin, il voit une pomme tomber. Là lui vient l'idée géniale que la Lune tombe pour cette même raison vers la Terre. La Lune reste à distance constante de la Terre, emportée par son élan tangentiel. Il raconte cet épisode à son ami Stukeley le soir, après dîner, le 15 avril 1726, un an et demi avant sa mort, à un moment où il est avec son ami dans le jardin à prendre le thé auprès d'un pommier à Kensington près de Londres. Lors de l'épisode de la pomme, il a tout de suite l'idée de la gravitation universelle. Tous les objets matériels s'attirent en raison de leurs masses, et de l'inverse du carré de leurs distances. L'image ci-dessous est extraite du manuscrit rédigé en 1666 par Newton où il calcule avec cette idée la durée de révolution de la Lune autour de la Terre et où il trouve bien 27 jours. Ce manuscrit fut vu par David Gregory lors d'une visite chez Newton en 1694. Avec le même calcul, on retrouve bien que les planètes décrivent approximativement des cercles autour du Soleil avec la fameuse loi  $T^2/a^3 = \text{constante}$ .



En 1728, Newton publie *A Treatise Of The System Of The World*, un livre de vulgarisation pour faire comprendre ses idées sur la gravitation sans calculs. On y trouve le célèbre dessin ci-dessous où on voit qu'en lançant un objet d'une tour en l'élançant à l'horizontal, en supposant qu'il n'y ait pas le frottement de l'air, l'objet a une trajectoire de moins en moins courbée, jusqu'à ce que, pour une certaine vitesse initiale, la courbure épouse comme il faut la courbure de la surface terrestre, pour que l'objet soit satellisé à altitude constante. Il y a donc continuité et même nature entre la trajectoire balistique d'un objet lancé de la surface de la Terre comme un ballon de foot, et les trajectoires des planètes autour du Soleil.

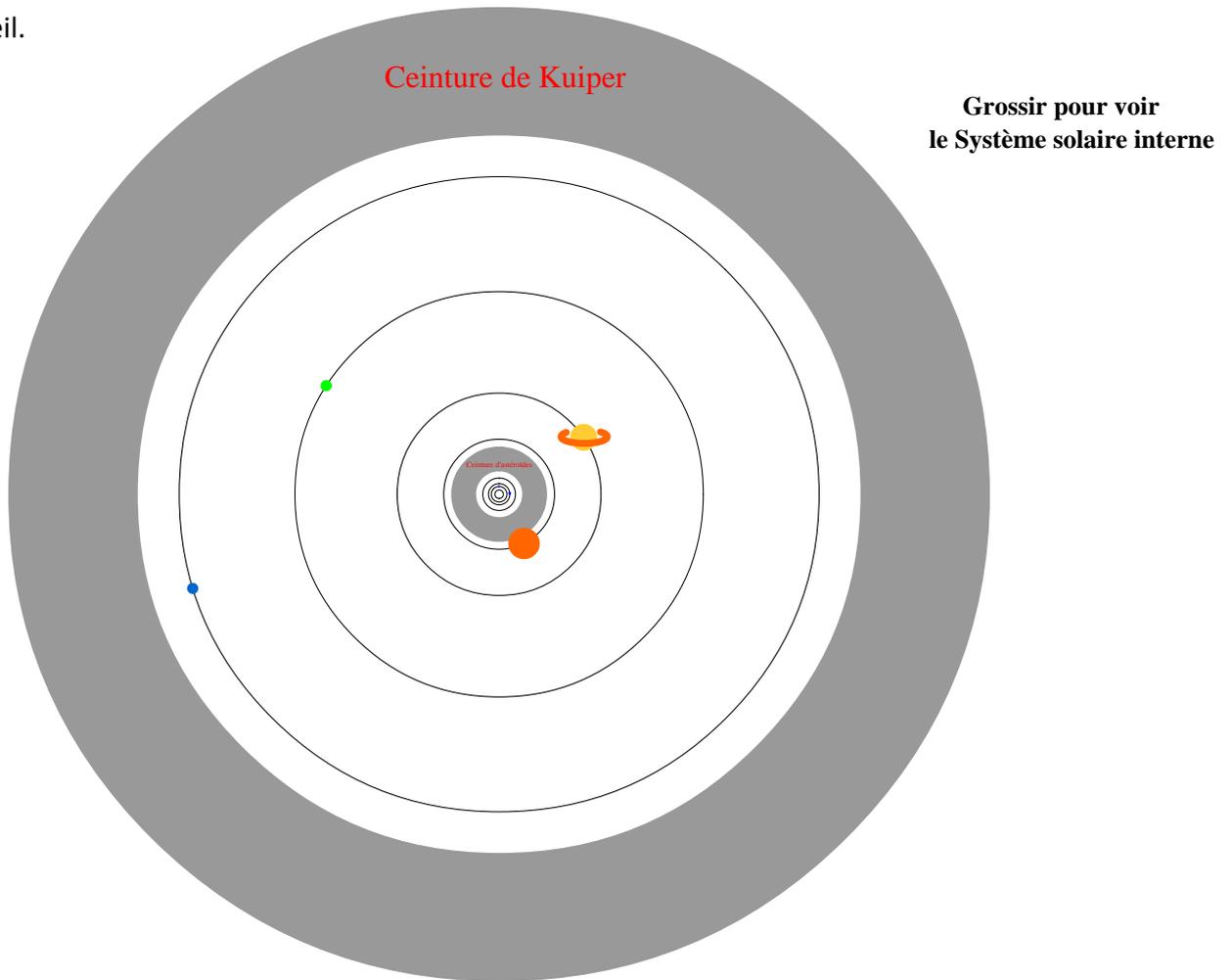


**4- Et après.** Foucault (1819-1868) réalise en 1851 avec son pendule la première expérience censée prouver que la Terre tourne sur elle-même. Cette expérience peut être observée au musée des Arts et métiers à Paris et au Palais de la découverte.

Einstein (1879-1955) prouve définitivement en 1915 avec sa théorie de la relativité générale, que la question de savoir si c'est la Terre qui tourne sur elle-même ou si c'est tout l'Univers qui tourne autour de la Terre n'a pas de sens et est pure convention du choix de référentiel.

### III- DESCRIPTION DU SYSTÈME SOLAIRE

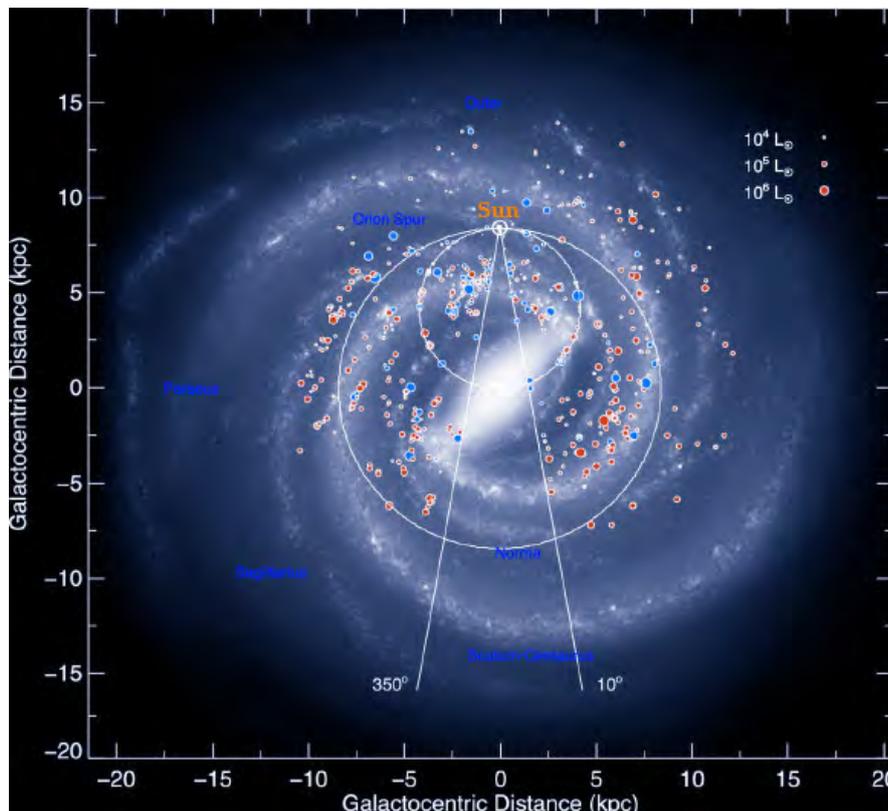
**1- Schéma.** Sur le schéma ci-dessous, l'échelle n'est pas la même pour la taille des planètes et pour leur distance au Soleil.



**2- Généralités.** Le Système solaire est formé principalement du Soleil et des 8 planètes. Le Soleil représente 99,9% de la masse totale du Système solaire. C'est une étoile comme toutes les étoiles qu'on voit dans le ciel. Il s'agit donc d'une gigantesque boule de gaz tellement chaud qu'il est ionisé. Il s'agit d'un plasma donc conducteur de l'électricité. Des courants électriques dans le Soleil forment un gigantesque champ magnétique. Les taches solaires sont des zones de très fort champ magnétique où la convection est freinée. Elles sont donc plus froides, d'où leur aspect plus sombre. Le Soleil est environ 100 fois plus gros que la Terre (en diamètre) et 10 fois plus gros que la plus grosse planète, Jupiter. La Terre est à une distance d'environ 100 diamètres solaires du Soleil. Les étoiles sont très lumineuses car très chaudes. La plupart des étoiles ont une masse comprise entre 0,3 et 0,5 masses solaires. On a une étoile si  $m > 0,08$  masse solaire. Les plus grosses étoiles possibles ont une masse de 125 masses solaires. Au-delà, on a la limite d'Eddington. La lumière émise est tellement forte qu'elle expulse par pression de radiation les couches externes de l'étoile. La surface du Soleil est à 6000 °C. Les étoiles émettent ainsi leur propre lumière. Ce sont des sources primaires de lumière. Par contre les planètes sont froides et reflètent la lumière de l'étoile autour de laquelle elles tournent. Il s'agit de sources secondaires de lumière. Le cœur du Soleil est à 15 millions de degrés, température suffisante pour allumer la réaction nucléaire de fusion de l'hydrogène en hélium. Il faut en effet que les protons aillent suffisamment vite par l'agitation thermique pour vaincre la barrière de répulsion électrostatique par effet tunnel. Le Soleil dure très longtemps (environ 10 milliards d'années) car il brûle très lentement son combustible. En effet, il faut que certains protons se transforment en neutron par l'interaction faible, ce qui prend plusieurs secondes une fois en contact. De plus, les protons doivent se rejoindre en passant par l'effet tunnel de la mécanique quantique, tellement leur répulsion électrostatique est forte, ce qui entraîne une très

faible probabilité de rencontre. Par contre, la réaction de fusion qui met en jeu l'interaction forte dégage une énergie gigantesque.

Le Soleil est à 26000 années-lumière du centre de notre galaxie la Voie lactée, une très belle spirale barrée. L'image ci-dessous est de J. S. Urquhart, année 2013. Elle vient du Spitzer Science Center. Le cercle blanc représente la trajectoire du Soleil en 250 millions d'années autour du centre de notre galaxie. Les ronds représentent les endroits de formations de jeunes étoiles massives. À moins de 10 000 années lumières du centre, la concentration en étoiles est trop forte pour assurer une stabilité sur le long terme à un système planétaire. Plus loin du centre que le Soleil, la diminution des supernovae, fait que la quantité d'éléments lourds comme le fer, nécessaires à la vie, est insuffisante.



Pluton n'est pas une planète. Cela a été décidé en août 2006 par l'union internationale des astronomes. C'est une planète naine. Il fait partie de la ceinture de Kuiper, zone d'une multitude de petits corps glacés orbitant au-delà de Neptune. Il ne tourne pas dans le même plan que les planètes du Système solaire. Il est trop petit pour évacuer les autres objets orbitant dans sa zone, en les agrégeant ou en les expulsant. Son orbite est très elliptique, l'amenant parfois plus près du Soleil que Neptune.

Aux confins du Système solaire, il y a le nuage de Oort, de forme approximativement sphérique. C'est ce qui reste de la nébuleuse ayant donné naissance au Système solaire. Il s'agit de la partie restant accrochée gravitationnellement au Soleil, mais sans s'être effondrée. Il est constitué d'une multitude de petits corps glacés. Il s'étend jusqu'à 1,5 années-lumière du Soleil. La plus proche étoile, Proxima du Centaure est à 4,2 années-lumière de distance.

En ordre de grandeur, si l'on fait une maquette du Système solaire où Neptune est à 10 centimètres du Soleil, la plus proche étoile, Proxima du Centaure, serait à un kilomètre. Notre galaxie, la Voie Lactée, une galaxie spirale de 100 000 années-lumière de diamètre et contenant 200 milliards d'étoiles aurait la taille de la Terre, et la galaxie la plus proche, la galaxie d'Andromède, à 2,5 millions d'années-lumière, serait ramenée à la distance de la Lune.

L'univers est né il y a 13,7 milliards d'années dans une phase pratiquement infinie en température et densité. C'est le Big Bang, terme inventé dans les années 1950 (au cours d'un programme de la BBC) par

l'astrophysicien anglais Fred Hoyle qui n'y croyait pas, pour le tourner en dérision, sans savoir que ce deviendrait le nom officiel de ce phénomène. En expansion, il se refroidit. Pendant cette phase, les particules élémentaires de l'Univers, en se refroidissant, se lient pour donner la matière sous forme de 80% d'hydrogène et 20% d'hélium. Les fluctuations quantiques à cette époque sont à l'origine des germes ayant donné naissance aux galaxies. Les galaxies sont réparties en amas et superamas en forme de filaments. L'univers a une structure alvéolaire en nid d'abeilles où ces amas de galaxies sont dans les murs. Les galaxies spirales grâce au frottement dû au gaz qu'elles contiennent sont devenues planes avec une structure en spirales avec des bras de forte densité de gaz et d'étoiles. Les galaxies elliptiques qui sont le résultat de collision de galaxies spirales sont dépourvues de gaz et non planes. L'amas dans lequel se trouve notre galaxie s'appelle le Groupe local.

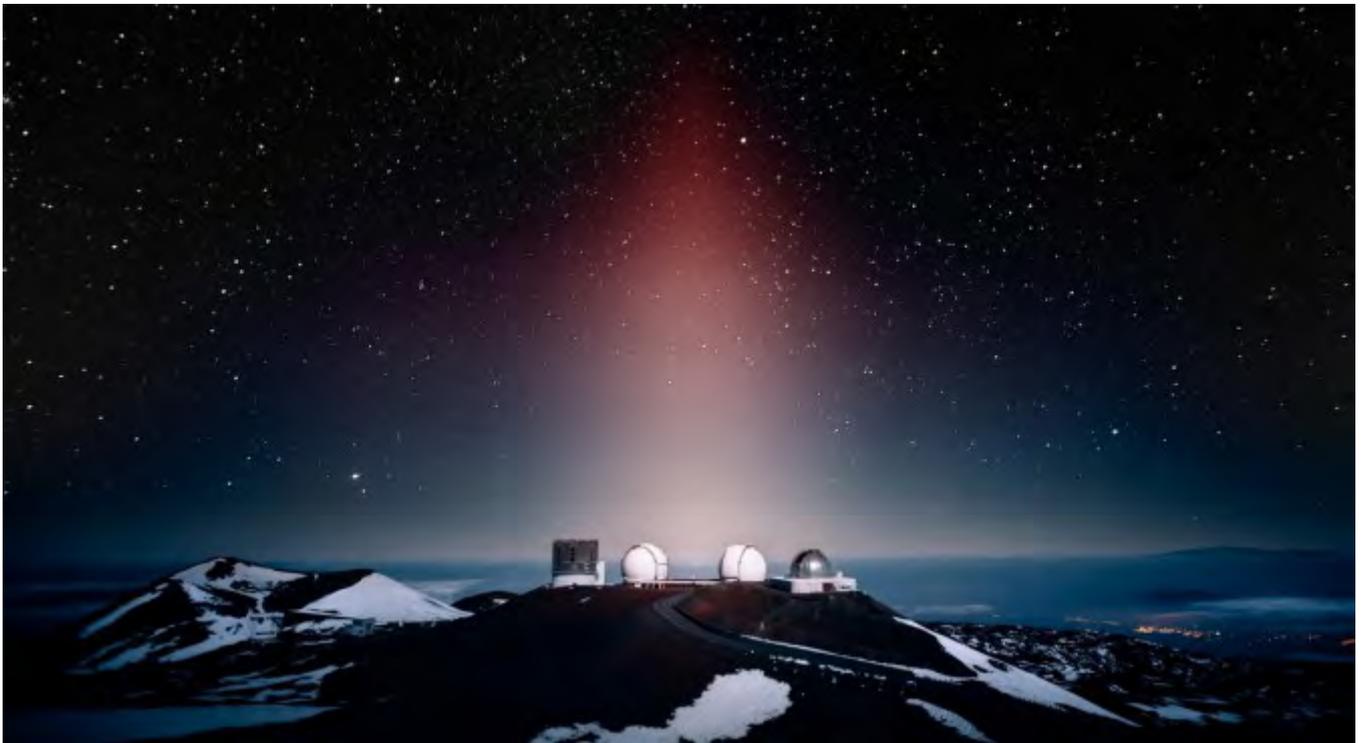
Les étoiles supérieures à 8 masses solaires fabriquent dans leur cœur les éléments chimiques jusqu'au fer. À la fin de leur vie, elles explosent en supernovae, dispersant ces éléments dans l'Univers. Nous sommes donc des poussières d'étoiles, comme le dit l'astrophysicien Hubert Reeves. Les éléments chimiques d'une masse supérieure au fer sont produits lors de cette explosion.

**3- Les comètes.** Le mot comète vient d'un mot grec qui veut dire chevelu. Les comètes proviennent soit de la ceinture de Kuiper, soit du nuage de Oort. Leur trajectoire est très elliptique et en dehors du plan du Système solaire. En effet, elles peuvent provenir de la ceinture de Kuiper après une collision provoquant une orbite elliptique dans n'importe quel plan. Si elles proviennent du nuage de Oort, leur plan d'orbite est quelconque, le nuage de Oort étant à symétrie sphérique autour du Soleil. Les débris glacés du nuage de Oort peuvent être déstabilisés gravitationnellement par le passage proche d'une étoile, et donner de nouvelles comètes. Ce sera le cas d'une manière intense dans 1,3 million d'années, selon les résultats d'observation du satellite Gaia qui mesure à la fois la position et la vitesse des étoiles. L'étoile Gliese 710 dont la masse est égale à 2/3 de celle du Soleil, passera alors à 0,2 a.l. du Soleil, en plein dans le nuage de Oort. Elle ne devrait cependant pas modifier sensiblement les orbites des planètes du Système solaire. Heureusement donc, que dans les galaxies, les étoiles sont à des distances les unes des autres, très grandes devant leurs diamètres.

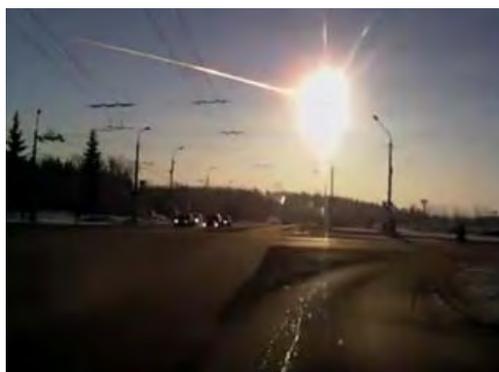


Sur l'image ci-dessus de la comète Hale Bopp qui est passée au printemps 1997 et qui était splendide à l'œil nu, on voit à côté à gauche, la galaxie d'Andromède. On distingue la queue de plasma, ionisée, poussée par le vent solaire et qui est bleue et assez rectiligne. La queue de poussière est blanche et plus diffuse. Elle est poussée par la pression de radiation de la lumière du Soleil. Ces deux queues sont donc toujours à l'opposé du Soleil. Elles résultent de la sublimation des glaces d'eau, de dioxyde de carbone et d'ammoniac par la chaleur apportée par la lumière du Soleil, libérant les poussières agglomérées, quand la comète s'approche de ce dernier. La courbure de la queue de poussière résulte du cheminement lent de la poussière, pendant que la comète décrit son orbite. Par contre, les ions dans la queue de plasma se déplacent à 400 km/s. La zone très brillante est la tête, poche de gaz qui enveloppe le noyau solide. Le bord de la tête est la chevelure

**4- Les météorites.** Ce sont des débris rocheux se baladant dans le Système solaire, d'une taille du micron à plusieurs kilomètres. Les plus gros résultent de collisions dans la ceinture d'astéroïde entre Mars et Jupiter propulsant des débris à l'intérieur vers la Terre. Les plus petits sont les poussières débris des queues de comètes. Ces poussières dans le plan du Système solaire forment la lumière zodiacale, faible lueur le long de l'écliptique quand le Soleil n'est pas trop loin sous l'horizon. Dans l'image ci-dessous, on voit cette lueur vue depuis le Mauna Kea à 4200 mètres d'altitude.



La chute de ces petits grains dans l'atmosphère les chauffe à incandescence, par frottement à grande vitesse contre l'air, et donne les étoiles filantes. Les plus célèbres sont les Perséides les 12 et 13 août quand la Terre traverse la trajectoire de la comète Swift-Tuttle. Le vendredi 15 février 2013, un bolide tomba dans l'Oural. Le bang supersonique fit beaucoup de destructions (image ci-dessous).



Il faut citer le bolide de la Toungouska de 50 mètres de diamètre qui rasa 100 kilomètres de forêt de Sibérie centrale le 30 juin 1908. Il faut citer aussi le bolide à l'origine de la disparition des dinosaures il y a 65 millions d'années (15 kilomètres de diamètre) qui atterrit dans le golfe du Mexique (cratère de Chicxulub). Le Meteor Crater en Arizona (ci-dessous) a un diamètre de 1500 m et une profondeur de 200 m. Il s'est formé il y a 50 000 ans par l'impact d'un bolide de 50 mètres de diamètre.

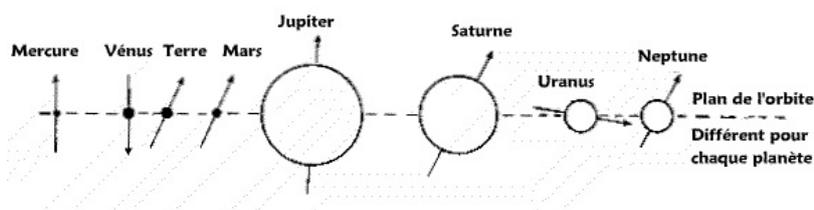


On surveille maintenant ces géocroiseurs.

## 5- Tableau du Système solaire.

| Nom     | Demi-grand axe de l'orbite (UA) | Distance moyenne au Soleil (10 <sup>6</sup> km) | Excentricité de l'orbite | Inclinaison de l'orbite sur l'écliptique | Durée de la révolution sidérale | Diamètre équatorial (Terre = 1) | Diamètre équatorial (km) | Temps mis par la lumière | Masse (Terre = 1) | Durée du jour sidéral |         | Poids d'un homme de 60kg | Température moyenne à la surface | Densité par rapport à l'eau | Nombre de satellites             | Atmosphère | Inclinaison de l'équateur |
|---------|---------------------------------|---|--------------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|-----------------------|---------|--------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------|---------------------------|
|         |                                 |   |                          |  |                                 |                                 |                          |                          |                   | jours                 | h.min   |                          |                                  |                             |                                  |            |                           |
| Mercure | 0,387                           | 57,9  | 0,206                    | 7° 00'                                   | 88 j                            | 0,38                            | 4 878                    | 0h 03                    | 0,06              | 58j 14h               | 22 kg   | 300 °C                   | 5,4                              | 0                           | Aucune                           | 2°         |                           |
| Vénus   | 0,723                           | 108,2   | 0,007                    | 3° 23'                                   | 225 j                           | 0,95                            | 12 104                   | 0h 06                    | 0,82              | 243j                  | 54 kg   | 480 °C                   | 5,2                              | 0                           | CO <sub>2</sub>                  | 177,4°     |                           |
| Terre   | 1,000                           | 149,6   | 0,016                    | 0° 00'                                   | 1,00 an                         | 1,00                            | 12 756                   | 0h 08                    | 1                 | 23h 56                | 60 kg   | 14,5 °C                  | 5,5                              | 1                           | N <sub>2</sub> et O <sub>2</sub> | 23,45°     |                           |
| Mars    | 1,524                           | 229,0   | 0,093                    | 1° 51'                                   | 1,88 an                         | 0,53                            | 6 795                    | 0h 12                    | 0,11              | 1j 0h 37              | 24 kg   | -25 °C                   | 3,9                              | 2                           | CO <sub>2</sub>                  | 24°        |                           |
| Jupiter | 5,210                           | 779,4   | 0,050                    | 1° 18'                                   | 11,87 an                        | 11,21                           | 142 985                  | 0h 43                    | 317,89            | 9h 55                 | 156 kg  | -150 °C                  | 1,3                              | 16                          | H <sub>2</sub> et H <sub>e</sub> | 3,1°       |                           |
| Saturne | 9,585                           | 1433,9  | 0,056                    | 2° 29'                                   | 29,48 an                        | 9,45                            | 120 537                  | 1h 20                    | 95,15             | 10h 14                | 66 kg   | -150 °C                  | 0,7                              | 17                          | H <sub>2</sub> et H <sub>e</sub> | 26,7°      |                           |
| Uranus  | 19,233                          | 2877,2  | 0,044                    | 0° 46'                                   | 84,07 an                        | 4,01                            | 51 119                   | 2h 40                    | 14,54             | 16h 50                | 54 kg   | -210 °C                  | 1,2                              | 15                          | CH <sub>4</sub>                  | 97,9°      |                           |
| Neptune | 30,110                          | 4504,4  | 0,011                    | 1° 46'                                   | 164,90 an                       | 3,96                            | 50 538                   | 4h 10                    | 17,23             | 18h                   | 66 kg   | -223 °C                  | 1,7                              | 2                           | CH <sub>4</sub>                  | 29,6°      |                           |
| Pluton  | 39,254                          | 5872,3  | 0,244                    | 17° 09'                                  | 247,85 an                       | 0,18                            | 2320                     | 5h 30                    | 0,002             | 6j 9h                 | 30 kg   | ?                        | 0,9                              | 1                           | Aucune                           | > 50°      |                           |
| Soleil  |                                 |   |                          |  |                                 | 109,12                          | 1 392 000                |                          | 333000            | 27j                   | 1680 kg | 5500 °C                  | 1,4                              |                             | H <sub>2</sub> et H <sub>e</sub> |            |                           |

### DIRECTIONS ET SENS DES AXES DE ROTATIONS DES PLANÈTES



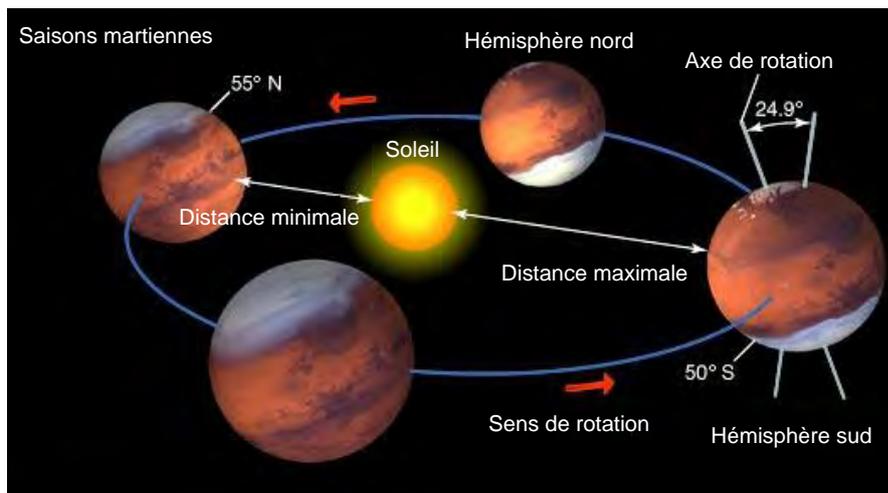
**6-Mercure.** Sa surface cratérisée ressemble beaucoup à celle de la Lune. Cette planète est trop petite et trop près du Soleil pour avoir une atmosphère.

**7- Vénus.** Vénus est semblable à la Terre en taille mais très différente par les conditions qu'elle a subi. La Terre faisant écran, elle a reçu beaucoup moins d'eau. Cette eau n'a pas réussi à se liquéfier vu la chaleur causée par la trop grande proximité du Soleil. Les molécules d'eau décomposées par les radiations UV du Soleil ont donc disparu. Il ne reste que le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>.

L'atmosphère de Vénus est donc constituée à 90% de CO<sub>2</sub> et l'effet de serre gigantesque associé, et le fait qu'il n'y a pas de cycle de l'eau pour refroidir le sol entraîne au sol une température de 477°C.

Suite à l'absence d'eau liquide, contrairement à la Terre, Vénus n'a pas de tectonique des plaques.

**8- Mars** Le noyau de métal de Mars s'est solidifié. Ce n'est pas le cas de la Terre où il est chauffé par les marées lunaires. Pour avoir un champ magnétique puissant, une planète doit avoir un noyau de fer liquide et être en rotation rapide. Pour Mars, il n'y a donc plus de courants de convections possibles dans ce métal conducteur pouvant créer un champ magnétique par effet dynamo. Le vent solaire a donc frappé de plein fouet l'atmosphère de Mars la dispersant dans l'espace, d'autant plus facilement que Mars étant beaucoup plus petit que la Terre, la gravité plus faible est moins efficace que sur la Terre pour retenir l'atmosphère. Mars est environ dix fois moins massive que la Terre mais dix fois plus massive que la Lune. Sa topographie présente des analogies aussi bien avec la Lune, à travers ses cratères et ses bassins d'impact, qu'avec la Terre, avec des formations d'origine tectonique et climatique telles que des volcans, des rifts, des vallées, des champs de dunes et des calottes polaires. La plus grande montagne du Système solaire, Olympus Mons (qui est aussi un volcan bouclier), et le plus grand canyon, Valles Marineris, se trouvent sur Mars. La pression atmosphérique est celle du point triple de l'eau, de 0,006 atmosphère. La surface de Mars est principalement constituée de déserts caillouteux avec des dunes de sable, le tout coloré en rouge par la grande présence de l'oxyde de fer.

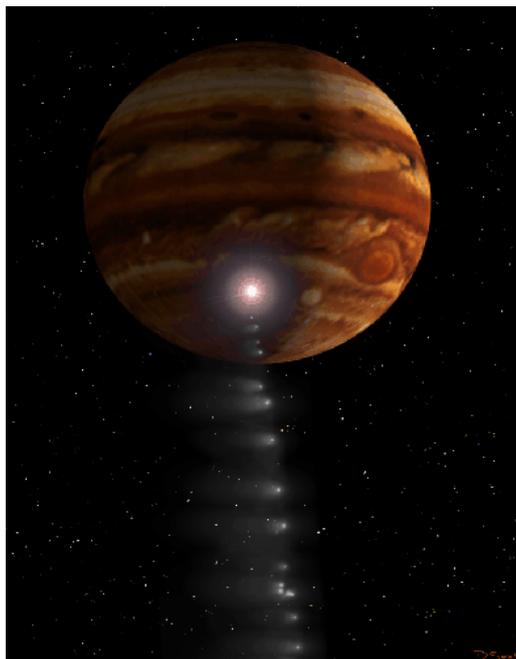


À priori, du fait que l'inclinaison de l'axe des pôles est presque la même que pour la Terre, le phénomène des saisons devrait être identique sur Terre et sur Mars. Déjà du fait que Mars tourne en environ 2 ans autour du Soleil, les saisons y durent deux fois plus longtemps. Mais, on voit sur l'image ci-dessus, que l'hémisphère sud est loin du Soleil l'hiver, il y fera donc très froid, et la masse de glace y sera énorme, d'autant plus que Mars étant loin du Soleil va alors plus lentement. Dans l'hémisphère sud, l'hiver dure donc plus longtemps que l'été. Par contre, l'été sera très chaud, même s'il est bref, et la calotte sud diminue beaucoup. Pour l'hémisphère nord, l'été est long mais frais, et la calotte polaire de glace diminue moins. Par contre, l'hiver y est court et peu froid, et la calotte polaire y est peu développée.

**9- Jupiter.** La grande tache rouge dans l'atmosphère de Jupiter est remarquable par le fait qu'elle dure depuis 350 ans. On l'a en effet observée pour la première fois en 1665.

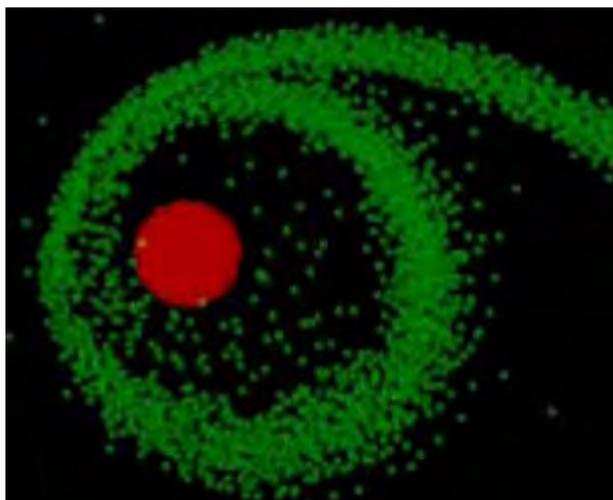


La photographie ci-dessous montre l'impact de la comète Shoemaker Levy 9 avec Jupiter en juillet 1994. On voit sur cet exemple que Jupiter sert de bouclier pour éviter à la Terre de trop fréquentes collisions avec des objets célestes. Jupiter aurait été plus près de la Terre qu'il aurait empêché sa formation. S'il avait été plus loin, il aurait été un bouclier moins efficace, rendant la vie sur la Terre plus aléatoire.



Io, le satellite naturel de Jupiter le plus près de la planète est soumis à un volcanisme intense. L'intérieur de Io est chauffé par l'effet de marée très puissant de Jupiter. La rotation sur elle-même de la planète est en permanence désynchronisée sur sa position autour de Jupiter, par le fait que décrivant une ellipse autour de Jupiter, elle accélère puis décélère en permanence.

**10- Saturne.** Les anneaux de Saturne sont remarquables. Ils résultent de l'approche tangentielle d'un astre détruit par effet de marée, ayant franchi la limite de Roche, où le gradient de gravité est supérieur à la cohésion gravitationnelle propre de l'astre.



Comme pour la lune de Jupiter Europe, Encelade, satellite de Saturne, est supposée abriter sous sa croûte glacée un océan d'eau liquide contenant peut-être de la vie. Les geysers d'Encelade alimentent les anneaux de Saturne.

**11- Uranus et Neptune.** Uranus est verte et Neptune bleue. Ces teintes sont principalement causées par les atmosphères riches en méthane d'Uranus et Neptune. Neptune est vue bleue car elle contient plus de

méthane qu'Uranus et a une atmosphère plus turbulente. L'axe de rotation d'Uranus est couché sur son plan de rotation autour du Soleil, à cause d'une collision. On a découvert également des anneaux autour d'Uranus.

## IV- OBSERVATION DU SYSTÈME SOLAIRE

**1- Le Soleil.** On peut observer le Soleil par projection avec un solarscope. Il est intéressant d'observer les taches dont le lent déplacement d'un jour à l'autre est lié à la rotation du Soleil sur lui-même en 25 jours à l'équateur et 35 jours aux pôles.

**2- Observation des planètes.** Il est intéressant avec des enfants en classe, à l'école primaire, de voir en fonction de la position présente des planètes autour du Soleil, les planètes qui sont visibles ou non depuis la Terre à ce moment-là, et également à quel moment de la nuit elles sont le plus visibles. On trouve la position des planètes à : <http://bouteloup.pierre.free.fr/astro/planeta/planeta.html> ; Cliquer sur *Voir le ciel* , puis sur *Syst sol* ; nécessité d'avoir Flash Player sur l'ordinateur. Le Système solaire étant plan, les planètes sont alignées dans le ciel sur l'écliptique, qui est le plan de rotation de la Terre autour du Soleil. Les planètes se promènent donc dans les 12 constellations du Zodiac astrologique, ce qui est à l'origine de l'astrologie. Le mot planète vient du latin planeta qui vient du grec planêtês qui veut dire errant, vagabond. On montre ci-dessous un alignement remarquable en avril 2002.



**3- Quelques caractéristiques de l'observation des planètes.** Avec une lunette astronomique, elles sont vues comme des disques, alors que les étoiles ne sont pas grossies et restent ponctuelles. La photographie ci-dessous, prise au télescope, montre comment on voit Saturne avec son anneau à travers une petite lunette astronomique. À l'œil nu, il est vu orangé et ne scintille pas.



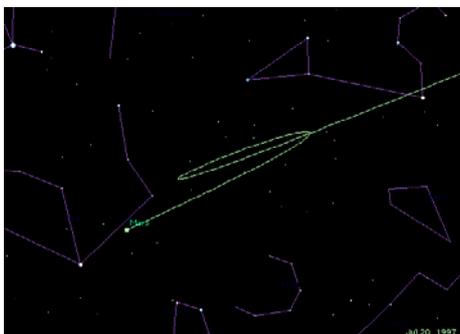
La photographie ci-dessous, prise au télescope, montre Jupiter tel qu'on le voit avec des jumelles, accompagné de ses quatre satellites galiléens. En quelques minutes, on voit que les satellites se sont déplacés. Sur le site : <http://bouteloup.pierre.free.fr/astro.html> on voit où sont les satellites tels qu'ils sont vus directement avec une paire de jumelle. Il faut avant, avoir été dans *sécurité java* pour déclarer ce site où il y a cette applet java comme site de confiance. Ce Système solaire en modèle réduit convainquit Galilée de la réalité du modèle de Copernic, quand il fut le premier à observer Jupiter avec une lunette. Les satellites sont vus alignés, car ils sont eux-mêmes approximativement dans le plan de l'écliptique.



Jupiter faisant un tour du Zodiaque en 12 ans, change de constellation du Zodiaque chaque année. S'il est une année dans le Verseau par exemple, il sera l'année suivante dans les Poissons.

Mercure et Vénus présentent des phases comme la Lune quand ils sont vus avec une lunette astronomique, ce qui est expliqué d'une manière évidente par le modèle héliocentrique de Copernic, ainsi que les variations très grandes de la taille apparente de Vénus, en liaison avec ses phases : elle est vue très grosse quand elle est en croissant très fin. Galilée, le premier homme devant ce spectacle, ne pouvait plus douter que les planètes tournent autour du Soleil. Vénus est l'astre le plus brillant du ciel en dehors du Soleil et de la Lune. Il peut donner une ombre. On l'appelle l'étoile du Berger, bien que ce soit une planète, car Vénus est vue très tôt le matin et juste après le coucher du Soleil.

Pour voir Mercure, ce qui est difficile, car il est toujours très près du Soleil, il faut choisir un jour où il est près d'un croissant de lune, de Jupiter ou de Vénus, et chercher à le trouver avec des jumelles. C'est très facile s'il est suffisamment près de l'autre astre pour qu'on puisse les voir en même temps tous les deux dans les jumelles. Quand Mars est très près de la Terre, avec un télescope de 200 mm d'ouverture, on distingue des zones plus ou moins sombres, et on voit un pôle, blanc à cause de la glace et de la neige carbonique. Il est intéressant de suivre à cette occasion, sur plusieurs semaines, la rétrogradation de Mars sur le fond des étoiles.



Uranus et Neptune, sont des petits disques respectivement verts et bleus, vus avec un télescope de 200 mm d'ouverture. Ces couleurs sont très frappantes et impressionnantes. Ils sont invisibles à l'œil nu.

## V- MAQUETTE DU SYSTÈME SOLAIRE

**1- Maquette avec deux échelles différentes.** Pour bien visualiser les tailles différentes des planètes, il faut que cette taille soit appréciable, ce qui nécessite de prendre une échelle plus grande pour les tailles que pour les distances au Soleil. Les élèves vont à cette occasion faire de l'interdisciplinarité avec les mathématiques en manipulant les grands nombres. Ils peuvent découvrir la loi de proportionnalité en enlevant par exemple le même nombre de zéros à droite à tous les nombres. Ils peuvent aussi garder les mêmes chiffres, mais en disant que ce n'est plus des kilomètres mais des centimètres par exemple. Ils vont être amenés à se poser le problème de la mesure du diamètre d'une boule, soit en la traversant avec une tige, soit en mesurant avec une ficelle le périmètre. On peut aussi poser la boule entre deux livres parallèles avec les faces verticales.

Le mieux est d'acheter des boules de polystyrènes de tailles adéquats dans une papeterie pour les planètes géantes. Pour les planètes rocheuses, il vaut mieux prendre de la pâte à modeler. Les boules de polystyrènes seront peintes avec de la peinture à l'eau. Uranus sera vert et Neptune bleu. Pour la pâte à modeler, on prendra de la pâte à modeler rouge pour Mars, bleue pour la Terre, blanche pour Vénus, et noire pour Mercure.

**2- Maquette avec une seule échelle.** Cette maquette est intéressante à faire pour montrer l'immensité du Système solaire. Il faut disposer d'un terrain d'une centaine de mètres de longueur. Même avec une telle distance, Jupiter sera tout petit et sera fait avec une pâte à modeler orange. Pour les planètes telluriques, il y aura juste un écriteau avec leur nom de planté au bon endroit. On peut tracer un point sur cet écriteau, où y planter une épingle. Il y a encore une interdisciplinarité avec les mathématiques en faisant mesurer ces grandes longueurs par les enfants avec une chaîne d'arpenteur.

Si l'on place la direction Terre Soleil de la maquette dans la direction du soleil couchant, et si on se place au niveau de la Terre de la maquette, quand le soleil se couche, il doit avoir la même taille apparente que le soleil de la maquette. On voit très bien cela sur la vidéo du site :

[http://www.sciencesetavenir.fr/espace/planetes/video-le-systeme-solaire-reconstitue-a-l-echelle-dans-le-desert\\_101657](http://www.sciencesetavenir.fr/espace/planetes/video-le-systeme-solaire-reconstitue-a-l-echelle-dans-le-desert_101657)

