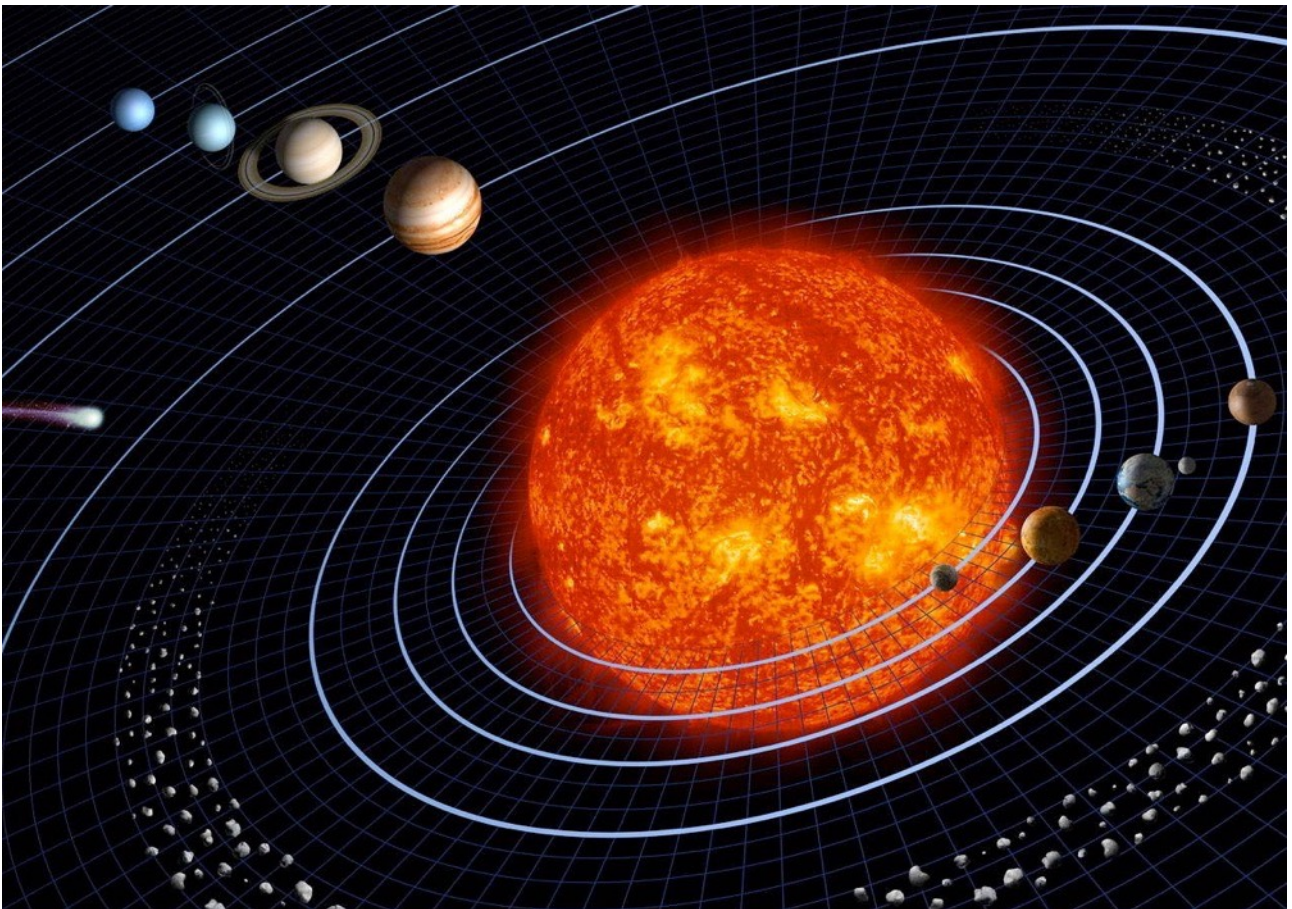


Notre système solaire

Jacques Deferne



Notre système solaire

Premières idées sur notre Planète

Les premiers hommes pensaient que la Terre était plate et située au centre de tout, que que les astres étaient fixés sur des sphères emboîtées les unes dans les autres, la sphère la plus proche supportant la Lune, la sphère la plus extérieure supportant les étoiles qui paraissaient fixes dans le temps.. Le fond étoilé du ciel était considéré comme une tapisserie garnissant les limites de l'Univers.

Les Grecs ont été les premiers à imaginer que la Terre était **sphérique** en voyant les bateaux qui s'éloignaient disparaître progressivement derrière l'horizon et en devinant que c'était l'ombre de la Terre qu'ils voyaient projetée sur la Lune lors des éclipses. Mais ils imaginaient toujours que la Terre était au centre de leur univers, ce qu'on appelle aujourd'hui le **géocentrisme**, et que tous les astres, dont le Soleil, tournaient autour d'elle.

Ils distinguaient aussi **les astres errants**, c'est-à-dire ceux qui, au cours de l'année, se déplaçaient lentement dans le ciel par rapport au décor des étoiles qui leur paraissaient fixe à l'échelle de temps de la vie humaine. Ces astres errants étaient, outre le Soleil et la Lune, cinq planètes qu'ils avaient déjà identifiées et baptisées : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne.

Système géocentrique ou héliocentrique ?

Archimède rapporte qu'un certain **Aristarque de Samos** (310-230) plaçait le Soleil au centre de l'Univers, ce qu'on appelle **l'héliocentrisme**, et que la Terre et les astres errants tournaient autour de celui-là. Malheureusement son hypothèse ne fut pas retenue.



Ptolémée (90-168)

Claude Ptolémée (90-168), un savant grec qui vivait à Alexandrie, s'était rendu célèbre par ses écrits sur la géographie, l'astrologie et l'astronomie. Sa notoriété était telle que sa théorie plaçant la Terre au centre de l'Univers, **le géocentrisme**, fut universellement adoptée malgré les difficultés pour expliquer les mouvements apparemment rétrogrades de certaines planètes.

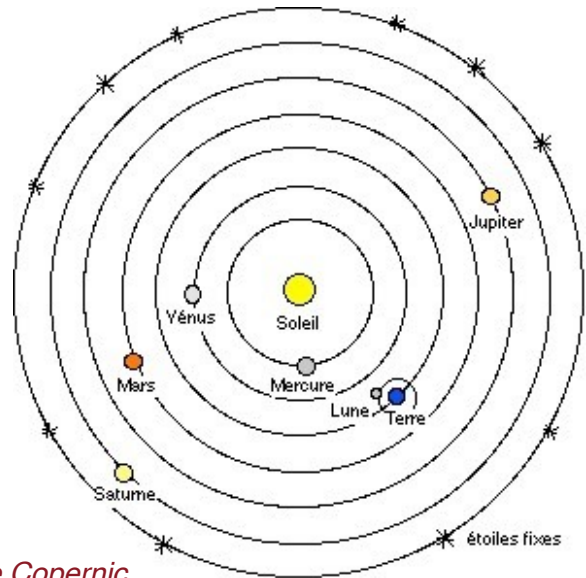
Il fallut attendre près de 1'500 ans avant qu'un moine polonais passionné d'astronomie, **Nicolas Copernic** (1473-1543), ne remette en question le système de Ptolémée.

Dans son ouvrage «De Revolutionibus», il montre que la Terre n'est ni immobile ni au centre du Monde. Selon lui, la Terre tourne sur elle-même en un jour et tourne autour du Soleil en un an. Son argument (fort peu scientifique) est que son système était plus logique et plus harmonieux que celui de Ptolémée.

Le système de Copernic fut condamné par l'Eglise en 1616 et Galilée, qui était un remuant défenseur de la théorie copernicienne, fut condamné par un tribunal ecclésiastique en 1633. L'acceptation de la nouvelle théorie sera lente et ce n'est qu'en 1830 que l'Eglise acceptera l'idée que la Terre tourne autour du Soleil.



Nicolas Copernic (1473-1543)

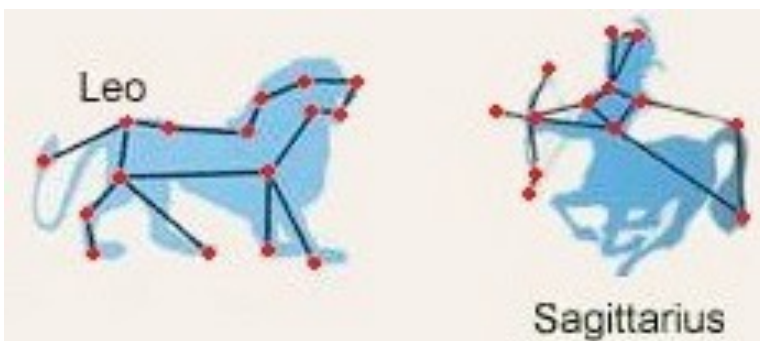


Système de Copernic

Les astres errants et le zodiaque

Bien avant l'ère chrétienne, les observateurs connaissaient l'existence de sept "astres errants" qu'ils voyaient se déplacer, nuit après nuit, sur le fond du ciel le long d'une bande de ciel relativement étroite. C'est un peu comme si ces astres parcouraient une sorte d'autoroute dans le ciel dont la largeur est d'un peu plus de 8° de part et d'autre de l'équateur céleste. Cette "autoroute" a ensuite été baptisée du nom de **zodiaque**.

Pour repérer la course des "astres errants" dans le ciel, les anciens ont divisé le zodiaque en un certain nombre de secteurs reconnaissables par des groupes d'étoiles auxquels ils ont attribué les noms figuratifs des constellations qui sont situées sur ce parcours. Les treize constellations présentes dans le zodiaque sont : le Bélier, le Taureau, les Gémeaux, le Cancer, le Lion, la Vierge, la Balance, le Serpentaire, le Scorpion, le Sagittaire, le Capricorne, le Verseau et les Poissons.



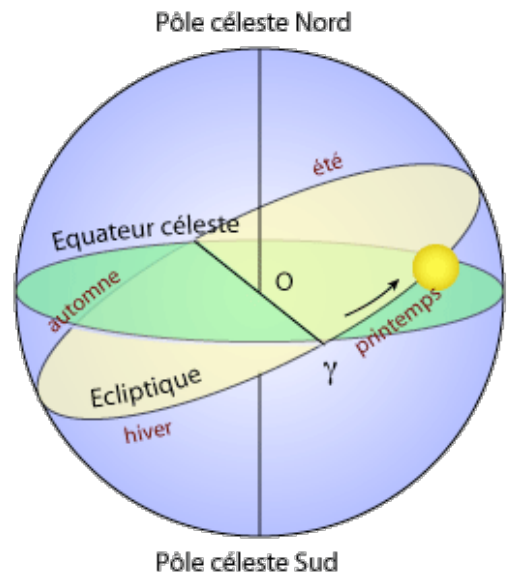
Représentation imagée des constellations du Lion et du Sagittaire

Ptolémée, vers 130, a développé l'Astrologie et a associé des attributs et des pouvoirs propres aux planètes en fonction de leur position relative à chaque signe du zodiaque. Par ailleurs, les astrologues ont ramené le nombre des constellations du zodiaque à douze afin de mieux les faire correspondre avec les mois de l'année. La plupart des astronomes pratiquaient l'astrologie car c'était souvent la seule source de financement de leur observatoire.

Un peu de vocabulaire

Nous venons de définir le **zodiaque** que nous avons situé près de l'**équateur céleste**. Ce dernier est le prolongement de l'équateur terrestre sur la voûte céleste. Voici quelques définitions :

- **La sphère céleste** est une sphère imaginaire dont le centre est occupé par la Terre. Elle permet de représenter tous les *astres* tel qu'on les voit depuis la Terre.
- **L'équateur céleste** est le prolongement de l'équateur terrestre sur la sphère céleste. Tout comme la Terre, la notion d'équateur implique celle de pôles.
- **Les pôles célestes** sont les points où l'axe de la Terre perce la sphère céleste. Actuellement le pôle céleste nord pointe exactement sur l'Etoile polaire.
- **L'écliptique** est le plan dessiné par l'orbite de la Terre autour du Soleil. L'écliptique recoupe l'équateur céleste en deux points qui correspondent aux équinoxes de printemps et d'automne. *En parcourant l'écliptique, le Soleil traverse l'équateur céleste à l'équinoxe de printemps et à celui d'automne.*
- **Le point vernal 'Y**, correspond au point de rencontre de l'écliptique et de l'équateur céleste à l'équinoxe de printemps. Il a été défini comme l'origine de la longitude dans le système de coordonnées de la sphère céleste.
- **Les constellations** sont des groupes d'étoiles qui forment sur la sphère céleste comme des figures imagées. Les anciens Grecs les ont décrites en leur attribuant des noms poétiques. Elles permettent de situer des zones de ciel sur la sphère céleste. On connaît un peu plus de 80 constellations. Les plus connues sont celles qui sont situées sur le parcours du Soleil et des planètes sur le zodiaque.



Pose photographique montrant la rotation apparente du ciel autour de l'axe terrestre. L'étoile fixe au milieu de la photo est dans le prolongement de l'axe terrestre vers le Nord. C'est l'étoile polaire.

Les jours de la semaine

Si nous comprenons bien qu'un jour correspond à la durée de la rotation de la Terre sur elle-même, qu'une année correspond au temps mis par la Terre pour accomplir son périple autour du Soleil, qu'un mois correspond grossièrement à la durée de la rotation de la Lune au tour de la Terre, il est plus difficile de savoir pourquoi on a défini une semaine de 7 jours.

Depuis la plus haute Antiquité la semaine comporte sept jours. La Bible indique que Dieu a créé la Terre en six jours et que le septième il s'est reposé. Mais ce qui est certain c'est que les noms des jours de la semaine ont pour origine les noms des sept astres errants connus dans l'Antiquité :

Tableau 1

Lundi	☾ La Lune	Vendredi	♀ Vénus
Mardi	♂ Mars	Samedi	♄ Saturne
Mercredi	☿ Mercure	Dimanche	☀ Soleil (Sunday)
Jeudi	♃ Jupiter		

Les forces qui régissent l'Univers

Au Panthéon du monde qui nous entoure, quatre forces, tels quatre dieux dominant de leur puissance toute la matière qui constitue l'Univers. D'une manière imagée, on peut les assimiler à deux dieux et deux déesses qui régneraient sur l'ensemble de l'univers. Ils sont responsables de la façon dont la matière est organisée, ils règlent les mouvements des astres et régissent toutes les formes d'énergie. Ils ont pour nom :

Gravitor, Elektra, Micromegakratos et Perturbatora.

Ils sont en constants désaccords les uns avec les autres, chacun d'entre eux essayant de contrecarrer les efforts des autres. La querelle explosive qui a vu naître leurs divergences semble s'être produite au cours d'un événement catastrophique qui a eu lieu il y a environ quatorze milliards d'années et que les astrophysiciens nomment le **Big-bang**.

Les physiciens les plus imaginatifs pensent qu'avant cet épisode ces dieux vivaient en bonne harmonie dans une sorte d'âge d'or, dans un univers précédent dont les secrets exacerbent au plus haut point l'imagination des astrophysiciens.

Gravitor est responsable de la gravité

Le placide **Gravitor**, celui qui nous intéresse le plus ici, est le plus grand d'entre eux. Depuis longtemps il ne parle plus aux autres dieux. Il s'est désolidarisé des autres divinités, attendant patiemment que les particules issues du Big-bang s'éloignent suffisamment les unes des autres pour les rappeler à l'ordre et organiser leur répartition dans l'Univers.

Il règne souverainement sur la totalité de l'Univers sans s'inquiéter des chamailleries auxquelles se livrent ses trois autres collègues au sein du petit monde des atomes.

Son influence ne souffre d'aucune exception et s'étend à toutes les particules qui peuplent l'Univers. Sa force est uniquement attractive. Elle tend à rapprocher toutes les particules entre elles.

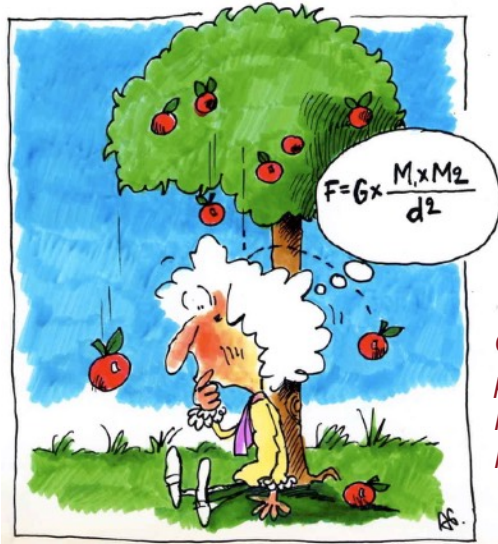
L'union fait la force

Toutefois, comme cette force d'attraction est extraordinairement faible, des milliards de milliards de fois plus faible que la force qui, par exemple, colle un aimant sur du fer, il applique l'adage "l'union fait la force". Ainsi les centaines de milliards de milliards de particules qui forment la Lune unissent leur extrême faiblesse d'attraction pour rester dans la zone d'influence des centaines de milliards de milliards de particules qui constituent la Terre. Cette force est bien connue sous le nom de **force gravitationnelle** ou, plus simplement, sous le nom de **gravité**.

C'est elle qui fait tomber la pomme d'un arbre, maintient nos pieds solidement accrochés à la Terre et empêche l'atmosphère de s'échapper dans l'Espace. Elle assure la cohésion des matériaux qui constituent les astres, elle retient la Lune autour de notre Terre et organise la ronde des planètes autour du Soleil et des étoiles dans le cosmos.

Cette force attractive qui lie deux corps est proportionnelle à la masse de l'un des corps (M_1) multipliée par la masse de l'autre (M_2), et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare (d^2).

$$F = G \frac{(M_1 \times M_2)}{d^2}$$



Newton et la pomme.

C'est, dit-on, en observant la chute d'une pomme sur le sol qu'Isaac Newton eut l'intuition qui lui fit découvrir, en 1667, la loi de gravitation universelle.

La constante de gravitation universelle G a pu être mesurée expérimentalement par Henri Cavendish en 1798.

Il a imaginé l'expérience suivante : un haltère constitué de deux petites masses M_1 liées par une tige est suspendue à un fil très fin. Sous l'influence de deux grosses masses M_2 qu'il approche des précédentes, il mesure la force de torsion F qui s'exerce sur le fil. Connaissant la distance d , il détermine la valeur de la constante G .

Elle vaut :

$$G = 6,67428 \times 10^{-8} \text{ [cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-2}\text{]}$$

Dès lors il devenait facile de calculer la masse de la Terre, celle de la Lune et celle des autres planètes et du Soleil.



Expérience de Cavendish en 1798

Elektra est la déesse des forces électromagnétiques

Cette déesse ne s'occupe que des objets porteurs de charges électriques, en particulier **les protons** et les **électrons**. Elle ignore les objets neutres. Elle est **répulsive** pour les particules de même charge, **attractive** pour les particules de charge opposée.

C'est elle qui détient l'exclusivité d'organiser la chevauchée fantastique des électrons autour des protons. C'est elle aussi qui lie les atomes entre eux pour constituer les molécules. Elle est donc responsable de toutes les réactions chimiques et permet l'existence de tous les composés chimiques que nous utilisons journalièrement.

Elle commande aussi la foudre, rend possible les moteurs électriques et tout ce qui touche à l'électricité, au magnétisme et à l'électronique.

Tout comme la force de gravité, son influence ne connaît pas de limite et est inversement proportionnelle à la distance à laquelle elle s'exerce.

Toutefois, dans l'immensité de l'univers, elle n'a aucune influence majeure car les corps célestes sont globalement constitués d'autant de charges positives que de charges négatives, ce qui annule les effets de la force électromagnétique.

Son influence est surtout prépondérante dans l'environnement proche des atomes et c'est elle qui régit toutes les lois de la chimie.

Dans l'infiniment petit, elle exerce une énorme force répulsive entre les protons qui sont agglomérés au sein des noyaux atomiques, force contrée par son ennemi héréditaire Megakratos.

Dans le monde de l'infiniment petit

Le nain **Micromegakratos** et la petite déesse **Perturbatora** règnent sur le monde de l'infiniment petit. Micromegakratos montre une force herculéenne, mais sa forte myopie limite considérablement son champ d'action. Sa zone d'influence est inférieure à un cent milliardième de millimètre. Sa force ne s'exerce qu'au sein du noyau des atomes dont il assure la cohésion. Sa responsabilité est de souder les quarks trois par trois pour constituer les protons et les neutrons et de lier fortement ces derniers pour assurer la cohésion du noyau atomique. Son principal souci est aussi de réprimer les velléités des protons à vouloir échapper à son contrôle sous l'influence sournoise de sa collègue Elektra qui cherche à exercer sa force répulsive entre particules de même charge.

Le mode d'action de cette force est curieux en soi : contrairement à ce qui se passe chez ses autres collègues, cette force augmente avec la distance à laquelle elle s'exerce puis cesse brutalement au delà d'une certaine limite. On pourrait comparer cette force à celle d'un élastique dont la force augmente lorsqu'on l'étire mais qui se rompt subitement au-delà d'une certaine limite.

Perturbatora joue les trouble fêtes

Perturbatora, cette petite déesse, montre une animosité marquée envers Micromegakratos. Environ 100'000 fois plus faible que son rival, elle attend patiemment les moments de distraction de ce dernier pour couper subrepticement les liens qui tiennent ensemble les particules du noyau, occasionnant alors les phénomènes de **radioactivité** et de **fission** qui permettent la **transmutabilité** des éléments.

Son rayon d'action est encore plus limité que celui de l'interaction forte (un millionième de milliardième de mm) et ne s'exerce qu'à l'intérieur des particules, au niveau de quarks, au sein même des protons et des neutrons.

Les physiciens, qui n'ont pas toujours le sens de la poésie, désignent ces quatre divinités par les expressions :

- force gravitationnelle,
- force électromagnétique,
- interaction forte
- interaction faible.

Ces quatre divinités règnent sans partage sur tout l'Univers, de l'infiniment petit à l'infiniment grand.

Les distances qui séparent les étoiles ou les galaxies sont colossales et le kilomètre est une unité très insuffisante. Aussi on exprime les distances en **années lumière**. C'est la distance parcourue par la lumière en une année. La vitesse de la lumière étant de 300'000 km par seconde, une année lumière est donc égale à 9'461 milliards de km.

Les astrophysiciens utilisent aussi **L'unité astronomique** qui correspond au demi-grand axe de l'orbite de la Terre et vaut environ 150 millions de km (plus exactement 149'597'871, 691 m.).

L'Homme n'est pas le nombril du Monde

Nous sommes dans une Galaxie

Notre Galaxie est un immense système stellaire constitué de quelques centaines de milliards d'étoiles semblables à notre Soleil, ainsi que de gigantesques masses de gaz et de poussière. Elle a la forme d'un disque spiralé, renflé en son centre. Son diamètre est d'environ 100'000 années lumière. Elle tourne sur elle-même, entraînant sur sa partie extérieure des sortes de bras spiraux. La rotation est plus rapide au centre qu'à l'extérieur.

Notre Soleil se trouve un peu à l'extérieur, dans un des bras spiraux. Là où il se trouve, une rotation complète de la Galaxie dure un peu plus de 220 millions d'années.

Par les nuits claires d'été, loin de toute lumière parasite, on peut observer la **"Voie Lactée"**, cette magnifique bande lumineuse qui traverse tout le ciel. Avec une paire de jumelles on découvre qu'elle est peuplée d'une immense quantité d'étoiles. C'est une vue partielle de notre Galaxie que nous entrevoyons par la tranche, à partir d'un des bras spiraux en bordure duquel est situé notre système solaire.



Une galaxie semblable à la notre



La voie lactée (photo Noël Cramer)

Naissance du système solaire

Le système solaire est constitué d'une étoile, le Soleil, autour duquel gravitent neuf planètes. En regard du Soleil, les planètes ne sont que de minuscules grains de poussière, puisque leur masse totale ne représente que 0.2% de celle du système solaire contre 99.8% pour le Soleil lui-même.

Le système solaire est né il y a quatre milliards et demi d'années, de la contraction d'un immense nuage d'hydrogène et de poussière. En s'effondrant sur lui-même et en se comprimant, ce nuage s'est échauffé jusqu'au moment où la température a été suffisamment élevée en son centre pour amorcer la fusion nucléaire de l'hydrogène en hélium et qui a conféré à cette masse gazeuse l'énergie nécessaire pour en faire une étoile.

L'effondrement sur lui-même du nuage originel, dû à la force gravitationnelle, a généré un lent mouvement tourbillonnaire responsable de la rotation du Soleil sur lui-même et a entraîné autour de lui-même les planètes sur des orbites presque circulaires.

Le Soleil

Le Soleil est l'une des 200 milliards d'étoiles qui constituent notre Galaxie. C'est la seule dont la surface soit accessible à notre observation. Sa masse fluide, d'un diamètre de 1'390'000 kilomètres, est composée presque uniquement d'hydrogène et d'hélium. Tous les autres éléments chimiques y ont été décelés, mais en très petites quantités. Le Soleil tourne sur lui-même, avec une période d'environ 27 jours terrestres. Comme il est fluide, sa vitesse de rotation est plus élevée à l'équateur qu'aux pôles.



Au coeur du Soleil, une gigantesque fournaise nucléaire

A la surface du Soleil la température atteint 5'500° degrés. En son centre, où règne une température de 16 millions de degrés, une gigantesque fournaise nucléaire transforme chaque seconde 650 millions de tonnes d'hydrogène en hélium. Au cours de cette réaction, 5'000 tonnes de matière disparaissent chaque seconde, converties en énergie [E] en accord avec la loi d'Einstein¹ :

$$E = m \times c^2$$

L'énergie ainsi dégagée empêche d'une part la matière solaire de s'effondrer sur elle-même, et génère d'autre part le rayonnement qui réchauffe et illumine les planètes. Ce rayonnement est principalement de nature électromagnétique, lumière, chaleur, auquel s'ajoute un flux de plasma constitué d'ions et d'électrons éjectés de la haute atmosphère du Soleil.

Surface et atmosphère

La partie visible du Soleil est la **photosphère**. C'est une couche gazeuse d'environ 300 km d'épaisseur, constamment agitée par de gigantesques cellules de convection qui lui confèrent son aspect granulé. Sa température atteint 5'500°.

Des taches sombres, dites **taches solaires**, apparaissent régulièrement avec une périodicité de onze ans. Elles correspondent à des zones plus froides soumises à un champ magnétique intense. Leur origine et leur nature font encore l'objet d'hypothèses variées.

1. L'énergie [E] produite est égale à la masse disparue [m] multipliée par le carré de la vitesse de la lumière [c²]

La **chromosphère** et la **couronne**, qui composent respectivement la basse et la haute atmosphère du Soleil, ne sont visibles que lors des éclipses totales.

Dans cette atmosphère, des jets de gaz soutenus par des champs magnétiques intenses sont projetés à des centaines de milliers de kilomètres d'altitude, constituant les **protubérances solaires**.

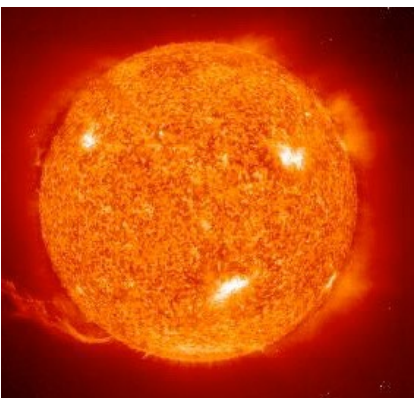
Cette atmosphère solaire, dont la température peut atteindre un million de degrés sous l'effet des turbulences et des contraintes magnétiques, est en continuelle expansion. Elle envoie dans l'espace un flux de particules ionisées - le vent solaire - à plus de 400 kilomètres par seconde.



Photosphère avec une tache solaire
(Wikipedia)



Couronne (en rouge) et chromosphère (en gris) photographées lors de l'éclipse totale du 11 août 1999

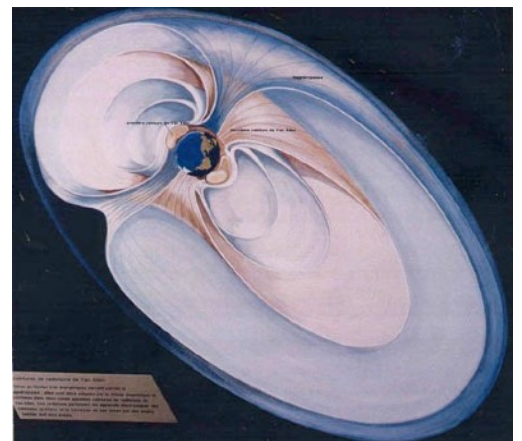


Eruptions solaires
Les éruptions solaires sont à l'origine du vent solaire

Qu'est-ce que le vent solaire?

C'est un flux de particules ionisées, constitué principalement de protons et d'électrons, qui s'échappent en permanence de la couronne solaire vers les espaces interplanétaires à une vitesse moyenne de 450 km par seconde. Le champ magnétique terrestre dévie heureusement ce bombardement et nous protège de ses effets nocifs sur les tissus vivants.

Visualisation du champ magnétique terrestre qui dévie et piège les particules du vent solaire.



Le Soleil est encore dans la force de l'âge

Agé de 4,6 milliards d'années, on estime que le Soleil continuera à briller sans modification notable pendant encore environ 4 milliards d'années avant d'avoir épuisé tout l'hydrogène qui alimente sa fournaise nucléaire. Mais, lorsque ce combustible sera épuisé, le noyau du Soleil s'effondrera sur lui-même en provoquant l'augmentation de sa température dans ses couches profondes. Les couches gazeuses de la surface se dilateront et le diamètre du Soleil augmentera considérablement (environ 100 fois son diamètre actuel). Les couches extérieures, moins chaudes, vireront au rouge. Il se transformera alors en une **géante rouge**. Sa surface atteindra la planète Mercure qui sera entièrement absorbée. Si la Terre parvient à échapper à cette absorption, la température s'y élèvera de plusieurs centaines de degrés et la vie disparaîtra totalement.

Un milliard d'années plus tard, faute de combustible, cette géante rouge s'effondrera sur elle-même pour atteindre le stade de **naine blanche**, astre de quelques milliers de kilomètres de diamètre, constitué de matière dégénérée d'une densité supérieure à une tonne par cm^3 , et qui n'émettra plus qu'une faible luminosité blanche.

Et, dans une nuit profonde, la Terre continuera de tourner dans un environnement glacé. Seul un point blanc à peine perceptible dans le ciel marquera l'emplacement autrefois occupé par un Soleil rayonnant.



Le Soleil transformé en géante rouge, (vue de la Terre par un artiste)



Une naine blanche.

Principales caractéristiques du Soleil

distance moyenne à la Terre	150'000'000 km
diamètre	1'392'400 km
masse	330'000 fois la masse terrestre
densité moyenne	1.4
température de surface	5'500°
température au centre	16'000'000°
âge	4.6 milliards d'années

Les Planètes

Une planète est un astre qui gravite autour du Soleil et qui n'a pas ou peu d'énergie propre. Sa luminosité n'est que le reflet de son éclairage par le Soleil. Pour mériter son appellation de planète, sa taille doit être suffisante pour qu'elle prenne une forme sphérique et le plan de son orbite ne doit pas être très éloigné du plan de l'écliptique.

Huit planètes de taille notable, répondant à la définition ci-dessus, gravitent autour du Soleil. Cinq d'entre elles sont visibles à l'œil nu. Ce sont **Mercury**, **Vénus**, **Mars**, **Jupiter** et **Saturne**. Les deux autres ne sont visibles qu'au télescope. **Uranus** a été découvert en 1781 par l'observation systématique du ciel au moyen d'un télescope. Quant à **Neptune**, sa découverte en 1846, a été rendue possible grâce à l'astronome Le Verrier qui avait calculé la position probable de la planète dans le ciel en se basant sur les irrégularités de l'orbite d'Uranus.

Pluton, qu'on ne considère plus aujourd'hui comme une planète, a été découvert en 1930 par l'observation patiente de milliers de photographies du ciel pour voir si un "objet" semblait s'être déplacé d'une observation à l'autre.

Formation des Planètes

Elles se sont formées par accrétion des résidus de poussière et de gaz qui gravitaient autour du Soleil en formation, à des distances variant entre 58 millions et 6'000 millions de kilomètres, sur des orbites faiblement elliptiques.

Les quatre plus proches du Soleil, Mercury, Vénus, la Terre et Mars sont de petite taille, leur densité est élevée et elles sont constituées de roches. On les appelle les "**planètes intérieures**".

Par opposition, les planètes dites "**extérieures**" sont de grande taille, leur densité est faible. Elles sont fluides, constituées principalement d'hydrogène, et d'hélium comme le Soleil. Ce sont Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.

La plus éloignée et la plus petite de toutes, Pluton, montre quelques particularités qui en font un cas à part. Récemment l'Union Astronomique Internationale a retiré à Pluton son statut de planète.

Entre Mars et Jupiter

Une loi mathématique (loi dite de Titus-Bode), qui est censée prévoir la distance moyenne qui sépare les planètes du Soleil, montre qu'une planète aurait dû se trouver entre Mars et Jupiter. Elle manque à l'appel mais, en lieu et place, on a découvert des centaines de milliers de fragments rocheux, **les Astéroïdes**, dont les plus volumineux atteignent presque mille kilomètres de diamètre.



Taille relative des planètes en regard d'une portion du disque solaire de gauche à droite : le Soleil, Mercure, Vénus, la Terre, Mars, les Astéroïdes, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et Pluton.

Au delà de Neptune

*Le perfectionnement des moyens d'investigation, tels les télescopes géants installés au Chili, les télescopes en orbite et les sondes d'exploration, a permis de découvrir au delà de Neptune de très nombreux objets dont certains ont un diamètre analogue à celui de Pluton. C'est ainsi qu'on a découvert **Eris**, un objet sphérique d'un diamètre compris entre 2'000 et 3'000 km, situé à plus de 10 milliards de km du Soleil, ainsi que **Sedna** un objet encore plus éloigné, de 1'500 km de diamètre.*

Comment observer les planètes

On distingue les planètes des étoiles par le fait qu'elles ne scintillent pas dans des conditions normales d'observation, et qu'on peut observer leur déplacement d'une nuit à l'autre par rapport aux étoiles qui constituent leur arrière-plan.

Les planètes intérieures restent toujours dans le voisinage du Soleil. On les observe soit dans le ciel crépusculaire si elles suivent le Soleil dans sa course, soit à la fin de l'aube, si elles le précèdent.

***Vénus** est facile à observer car c'est l'objet le plus brillant du ciel nocturne après la Lune. Elle ne s'écarte jamais de plus de 49° du Soleil.*

***Mercure** est nettement moins brillante que Vénus. Tout comme sa voisine, elle reste dans le voisinage du Soleil (28° d'éloignement maximum). Elle n'apparaît que dans un ciel crépusculaire ou une aube relativement clairs.*

Les planètes extérieures ne sont pas confinées au voisinage du Soleil mais voyagent sur tout le plan de l'écliptique. Il faut consulter des éphémérides pour savoir où les trouver.

***Mars** est facilement reconnaissable à l'oeil nu par sa brillance et sa couleur rougeâtre caractéristiques.*

***Jupiter** est aussi très brillante. A l'aide d'une paire de jumelles on peut même apercevoir ses quatre plus gros satellites, ceux que Galilée avait découverts en pointant sa lunette vers cet astre.*

***Saturne** est un peu moins brillante que Jupiter, mais toujours bien visible à l'oeil nu. Sa couleur orangée permet de la distinguer. Il faut toutefois utiliser un petit télescope pour apercevoir ses anneaux.*



*Les planètes Vénus et Mercure photographiées le 6 février 2007
(Photo Michel Dionne)*

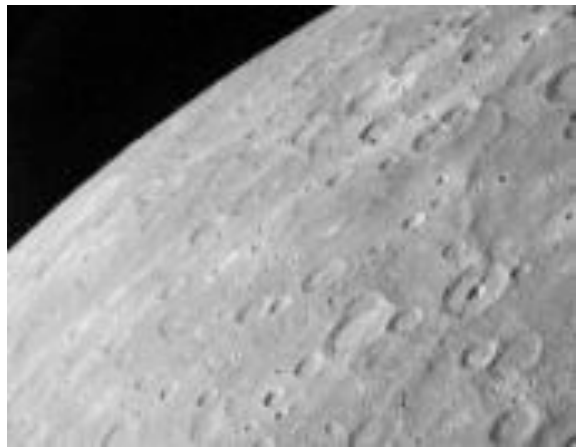
Petite description des planètes

Mercurure



diamètre	4'878 km
période de rotation	59 jours
densité	5.4
distance au Soleil	58 millions de km
révolution autour du Soleil	88 jours
Inclinaison sur l'écliptique	7°
Nombre de satellites	aucun
Poids d'un homme de 70 kg	26.5 kg

A peine plus volumineuse que la Lune, Mercurure est la plus petite des planètes intérieures et la plus proche du Soleil. Pour cette raison, vue de la Terre, elle ne s'écarte jamais de plus de 28° du Soleil et on ne l'aperçoit guère qu'au crépuscule, toujours très basse-au dessus de l'horizon. Très inhospitalière, presque sans atmosphère, la température à sa surface oscille entre 430° le jour et -170° la nuit. Par beaucoup d'aspects elle ressemble à la Lune avec ses cratères météoriques et ses plaines de laves issues d'un volcanisme ancien, probablement antérieur à trois milliards d'années. Toutefois, sa densité élevée et son faible champ magnétique, analogue à celui de la Terre, indiquent que Mercurure possède sous son manteau rocheux un important noyau métallique.



Surface de Mercurure photographiée par la sonde Mariner 10 en 1974

Vénus



diamètre	12'104 km
période de rotation	243 jours
densité	5.2
distance au Soleil	108 millions km
révolution autour du Soleil	224.7 jours
Inclinaison sur l'écliptique	3°24'
Nombre de satellites	aucun
Poids d'un homme de 70 kg sur Terre	64 kg

Vénus est notre plus proche voisine. Dans le ciel nocturne, elle est l'objet le plus brillant après la Lune. Dans l'imagerie populaire, on l'a baptisée "**l'étoile du berger**". Elle est même si brillante qu'on peut parfois l'observer de jour.

À sa surface la réalité est tout autre. En effet, le sol de Vénus est plongé en permanence dans une profonde pénombre causée par les épais nuages chargés d'acide sulfurique qui le recouvrent. En altitude, des vents violents, dépassant 350 km à l'heure à l'équateur, entraînent ces nuages élevés dans une ronde tourbillonnaire autour de la planète. Son atmosphère, 90 fois plus dense que la nôtre, est principalement composée de gaz carbonique. A cause de l'effet de serre engendré par cette atmosphère, la température au sol atteint 480°. Les images radar transmises par les sondes spatiales montrent de grandes étendues désolées recouvertes de pierraille, de nombreux cratères météoritiques et des volcans éteints.

Vénus a presque la même taille et la même masse que la Terre. Sa composition paraît aussi très semblable.



Première image du sol vénusien réalisée par la sonde soviétique Venera 9, en 1962.

La Terre



diamètre	12'756 km
période de rotation	1 jour
densité	5.5
distance au Soleil	149 millions de km
révolution autour du Soleil	365 jours
Inclinaison sur l'écliptique	0°
Nombre de satellites	1

C'est la seule planète à bénéficier de toutes les conditions nécessaires à l'apparition de la vie :

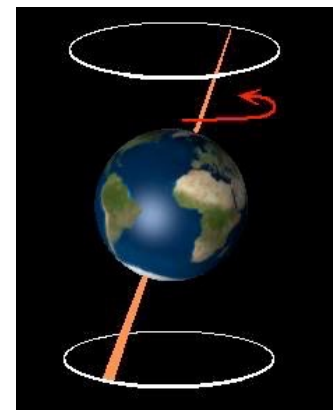
- sa masse est suffisamment élevée pour retenir une atmosphère, principalement composée d'azote et d'oxygène, atmosphère qui filtre les radiations ultraviolettes et atténue les différences de température entre le jour et la nuit,
- son juste éloignement du Soleil, combiné avec un certain effet de serre dû à son atmosphère, lui confère une température moyenne de 15° à 18°, maintenant la plus grande partie de son eau sous forme liquide,
- ses océans fonctionnent comme régulateurs de température et, en absorbant le CO₂ excédentaire, ils stabilisent la composition chimique de l'atmosphère,
- son champ magnétique dévie le "vent solaire" dont les particules ionisantes seraient nocives à toute forme de vie.

Contrairement aux autres planètes, la Terre est aussi vivante sur le plan géologique. La chaleur résiduelle qu'elle renferme est encore suffisante pour déplacer les continents, soulever des chaînes de montagnes et entretenir les phénomènes volcaniques.¹

Par ailleurs, l'énergie solaire et la présence de l'atmosphère engendrent le régime des vents, le cycle des précipitations et favorise la croissance des végétaux. Indirectement, l'énergie solaire est aussi responsable de l'érosion des continents et de la formation des roches sédimentaires. La Terre a subi aussi les mêmes bombardements météoritiques que les autres planètes mais les cratères ont été détruits par l'action de l'érosion. Seuls les plus récents sont encore visibles.

L'axe de la Terre oscille

L'axe de la Terre est incliné de 23° 45' par rapport au plan de l'écliptique. Cette inclinaison est responsable des saisons. Mais, telle une toupie, l'axe de la Terre pivote et décrit un mouvement de rotation, décrivant un cône. Ce déplacement s'appelle la précession. Le temps mis par l'axe terrestre pour effectuer une rotation complète est de 28'796 ans. L'extrémité nord de l'axe de la Terre est



¹ voir des mêmes auteurs "Que savons-nous de notre planète ?"

actuellement dirigé vers l'étoile polaire mais dans 12'000 ans, cet axe pointera vers Véga dans la constellation de la Lyre. La cause de ce déplacement est due à la non uniformité de la sphère terrestre qui est aplatie aux pôles et montre un certain renflement à l'équateur.

La conséquence de ce mouvement est que l'intersection entre le plan de l'écliptique et celui de l'équateur céleste varie avec le temps. Le point vernal 'Y se déplace d'environ 50 secondes d'arc par an entraînant ce qu'on appelle **la précession des équinoxes**.

Comme les astronomes utilisent le point vernal comme origine des méridiens célestes et que ce point n'est pas fixe, ils ont décidé de se référer à la position qu'il avait le premier janvier 2000 à midi.

L'inclinaison de l'axe de rotation varie de la Terre sur l'écliptique varie aussi entre $22,1^\circ$ et $24,5^\circ$ avec une période de 41'000 ans.

Mais ce n'est pas tout !

La Terre décrit une orbite elliptique dont le Soleil occupe un des foyers. L'excentricité¹ de cette ellipse varie au cours du temps avec une période d'environ 100'000 ans. L'excentricité passe de 0,005 (presque un cercle) à 0,058. Cette variation est due à l'attraction conjointe de toutes les autres planètes.

Notre satellite

La Lune, l'unique satellite de notre planète, est remarquable par sa taille très importante en regard de celle de la Terre.

Plus qu'une planète et son satellite, on peut considérer l'ensemble Terre-Lune comme une planète double. Un chapitre plus important lui est consacré plus loin.



Taille de la Lune comparée à celle de la Terre

¹ l'excentricité d'une ellipse est égale à la distance d'un foyer au centre de l'ellipse divisé par son demi grand axe.



Mars

diamètre	6'787 km
période de rotation	24.5 heures
densité	3.9
distance au Soleil	228 millions km
révolution autour du Soleil	687 jours
Inclinaison sur l'écliptique	1.8°
Nombre de satellites	2
Poids d'un homme de 70 kg sur Terre	27 kg

Les premières images de Mars nous font découvrir des paysages parsemés d'une multitude de blocs rocheux partiellement ensevelis sous une poussière rougeâtre riche en oxyde de fer. Une atmosphère ténue de gaz carbonique soulève périodiquement d'immenses tempêtes de poussière.

Sa surface montre des cratères d'impact de météorites, des édifices volcaniques, des champs de dunes. Son relief présente quelques caractéristiques remarquable. Ainsi le Mont Olympus est un volcan de 24 kilomètres d'altitude et de plus de 500 km de diamètre. Dans la zone équatoriale, on observe de gigantesques canyons dont l'origine demeure encore mystérieuse.

Il est probable que l'eau a dû exister sur Mars, comme en témoignent des formes d'érosion fluviale, mais, pour des raisons encore inexplicées, il n'en subsiste que de très faibles quantités, sous forme de glace dans les régions polaires. On suppose que des quantités d'eau plus importantes existent sous forme de permafrost.



Aspect de la surface de Mars

Le cas curieux des satellites de Mars

Mars entraîne dans sa course deux satellites minuscules : **Deimos**, un rocher de 12 x 15 km, situé à env. 20'000 km de sa planète mère et **Phobos**, un autre bloc à peine plus grand (21 x 25 km), qui gravite à moins de 6'000 km d'altitude, c'est-à-dire largement au-dessous de l'altitude de l'orbite dite **géostationnaire**¹.

¹Ce terme n'est pas parfaitement adapté. Il faudrait dire "marsostationnaire", mot qui n'existe pas ! Rappelons que c'est l'altitude à laquelle un satellite acquiert une période de révolution égale à la période de rotation de la planète. Le satellite demeure alors stationné en permanence au dessus du même point géographique.

La période de révolution de Phobos étant plus courte que la période de rotation de la planète, ce satellite est progressivement freiné et il se rapproche lentement de la surface de Mars. Il finira par se désagréger lorsqu'il descendra en-deçà de la "Limite de Roche" ¹

Deimos est suffisamment éloigné de Mars et sa période de révolution est plus longue que la période de rotation de la planète. Deimos subit donc une accélération qui l'éloigne lentement de sa planète mère.



Phobos



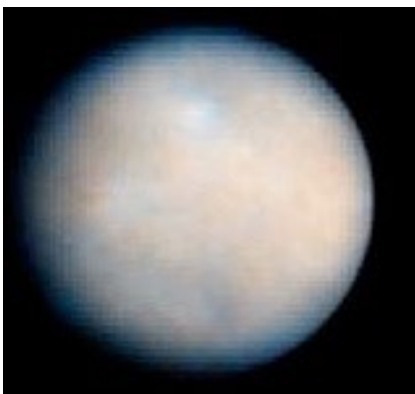
Deimos

Ces deux petits satellites, dont les formes font penser à une pomme de terre, ont probablement la même composition que les météorites pierreuses.

Les astéroïdes

Séparant les petites planètes des géantes que sont Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, on rencontre les Astéroïdes. Ce sont des petits corps rocheux situés pour la plupart entre les orbites de Mars et de Jupiter, dans une zone où des calculs théoriques laissaient prévoir la présence d'une planète. On estime à plus de 40'000 le nombre de ceux qui ont plus d'un kilomètre de diamètre. Le plus grand d'entre eux, Cérès, atteint 960 km de diamètre.

Certains astéroïdes ont des orbites très excentriques qui recoupent périodiquement celle de la Terre. Les météorites qui heurtent la Terre proviennent presque toutes de la région des Astéroïdes. Il est probable que les Astéroïdes sont constitués d'un peu de la matière originelle du système solaire qui n'a pu s'agglomérer en une planète dans cette région à cause des perturbations gravitationnelles dues à la proximité de l'énorme planète Jupiter.

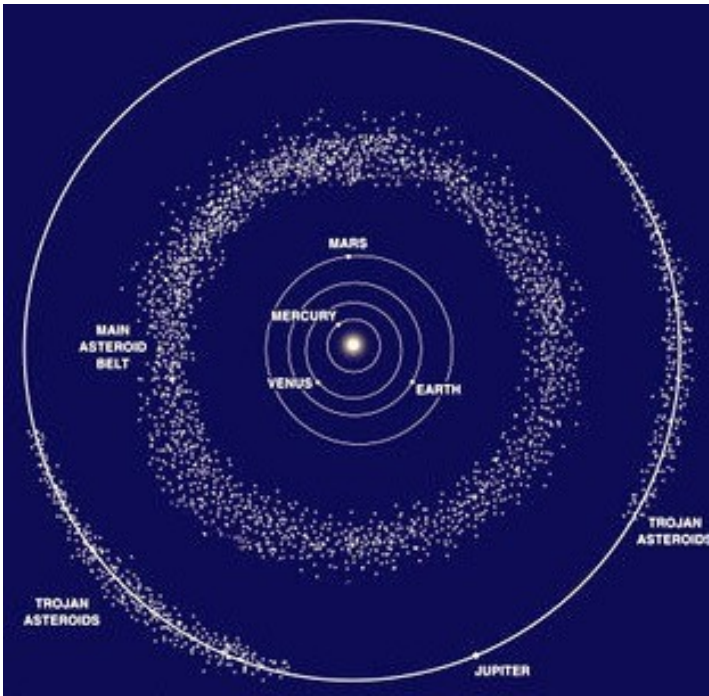


Cérès, 940 km de diamètre, est le plus gros des Astéroïdes.

Gaspra, premier astéroïde survolé par la sonde spatiale Galileo en 1991.
Taille : 12 km sur 16 km



¹ Explications concernant la Limite de Roche» à la page 28



On classe les Astéroïdes en trois catégories sur la base de leur spectre optique. Cette distinction correspond parfaitement aux catégories de météorites qui régulièrement atteignent la Terre : météorites pierreuse, métalliques ou mixtes.

En reconstituant les trajectoires de plusieurs météorites arrivées sur la Terre, on a constaté que la partie haute de leur orbite était située à l'intérieur de la ceinture des Astéroïdes.

Les orbites des astéroïdes sont situées entre celles de Mars et de Jupiter. Deux groupes d'astéroïdes parcourent la même orbite que Jupiter, l'un précède la planète, l'autre la suit. Ce sont les astéroïdes dits "troyens".

Jupiter



diamètre	142'800 km
période de rotation	9.9 heures
densité	1.3
distance au Soleil	778 millions de km
révolution autour du Soleil	12 ans
Inclinaison sur l'écliptique	1.3°
Nombre de satellites	16
Poids d'un homme de 70 kg sur Terre	165 kg

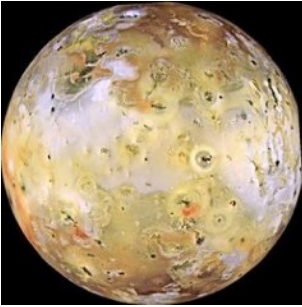
Jupiter est la plus volumineuse de toutes les planètes. A elle seule, elle renferme plus de matière que toutes les autres réunies. C'est un astre glacé, fluide, constitué de 93% d'hydrogène et de 7 % d'hélium. Sa faible densité (1.33) ne représente que le quart de celle de la Terre. En son centre la pression atteint 50 millions d'atmosphères et la température 30'000 degrés. Toutefois ces valeurs sont insuffisantes pour amorcer les réactions nucléaires qui auraient pu faire de Jupiter une étoile.

Sa surface est la proie de vents violents et de cyclones gigantesques. La tache rouge, qui depuis trois siècles intrigue les astronomes, s'est révélée être un immense tourbillon qui mesure plus de 30'000 km dans sa plus grande longueur. Il est intéressant de noter que Jupiter rayonne plus d'énergie qu'elle n'en reçoit du Soleil. La quantité de chaleur produite à l'intérieur de la planète est presque égale à celle reçue du Soleil. Ce rayonnement s'explique par la contraction progressive des gaz qui la constituent. On estime que cette contraction entraîne la diminution de son diamètre de 2 cm par an.

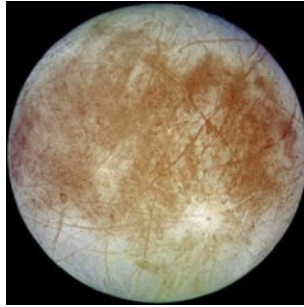
Jupiter est aussi très brillante. A l'aide d'une paire de jumelles on peut même apercevoir ses quatre plus gros satellites, ceux que Galilée avait découvertes en pointant sa lunette vers cet astre.

Les satellites de Jupiter

Parmi les seize satellites de Jupiter, quatre sont remarquables par leur dimension importante. Ce sont Io, Europa, Ganymède et Callisto. Leurs orbites subissent des perturbations notables dues aux effets de marées qu'ils induisent les uns sur les autres. Il est probable même que ce soient ces forces qui sont responsables de l'activité volcanique observée sur Io.



Io, dont le diamètre est de 3720 km, est remarquable par les éruptions volcaniques qu'on y a observées.



Europa, de taille comparable à la Lune, est parfaitement lisse. Sa composition est analogue à celle des météorites pierreuses.

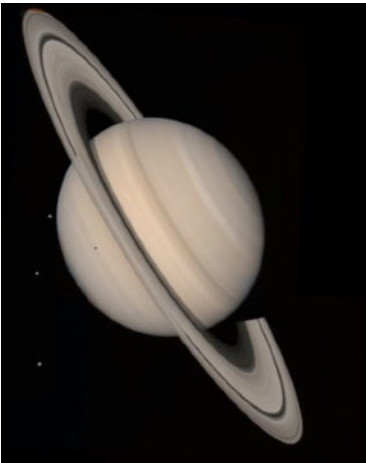


Ganymède, est le plus volumineux satellite du système solaire. Son rayon (5'262 km) est supérieur à celui de Mercure.



Callisto est fortement cratérisée. Elle semble recouverte d'une grande épaisseur de glace.

Saturne

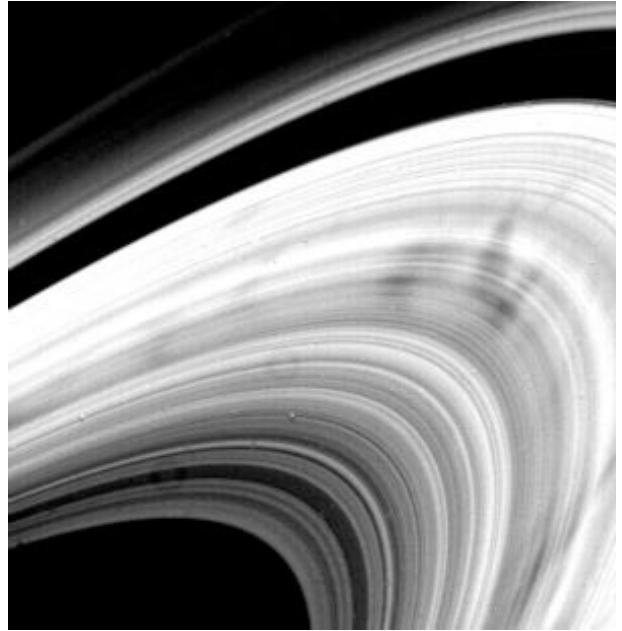


diamètre	120'000 km
période de rotation	10.6 heures
densité	0.7
distance au Soleil	1'427 millions de km
révolution autour du Soleil	29.5 ans
Inclinaison sur l'écliptique	2.5°
Nombre de satellites	17 au-delà des anneaux
Poids d'un homme de 70 kg	74 kg

Deuxième planète par sa taille, Saturne, tout comme Jupiter, est un astre glacé composé d'hydrogène et d'hélium liquide. Sa densité (0.7) est la plus faible que celles de toutes les autres planètes. Toutefois il semble que Saturne possède un noyau rocheux très dense dont la température serait de 12'000°. Cela explique pourquoi cette planète, tout comme Jupiter, dégage plus d'énergie qu'elle n'en reçoit du Soleil. A cause de sa rapide rotation sur elle-même, la planète est aplatie aux pôles et passablement renflée à l'équateur. Le diamètre équatorial est de 120'500 km alors que le diamètre polaire n'est que de 110'500 km.

Saturne est surtout connue pour les centaines d'anneaux concentriques qui l'entourent sur un diamètre de 270'000 km, mais dont l'épaisseur ne dépasse pas 3 km. Ce sont des débris rocheux et des fragments de glace dont la taille est comprise entre quelques centimètres et plusieurs mètres. Chaque fragment possède sa propre orbite. On observe des discontinuités entre certains groupes d'anneaux. Elles sont dues à des perturbations engendrées par les gros satellites qui gravitent au-delà des anneaux et, pour certains, entre les anneaux.

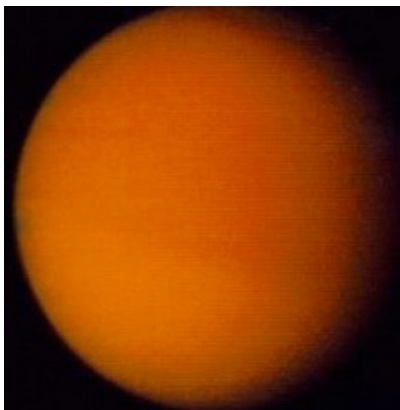
Les anneaux de Saturne photographiés par la sonde Voyager 2, le 22 août 1981



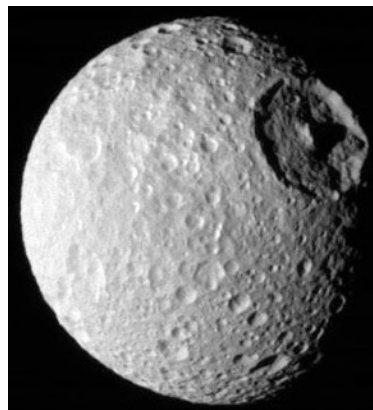
Les satellites de Saturne

On dénombre aujourd'hui plus de 50 satellites gravitant autour de Saturne. Ils sont presque tous de très petite taille. Certains ont moins de 10 km de diamètres. Ce sont probablement des blocs de glace entourant un cœur rocheux. Les plus gros sont Titan, Rhéa, Dioné, Thétys, Encelade et Mimas. Ils gravitent presque tous à l'extérieur des fameux anneaux qui caractérisent la planète. Quelques petits satellites existent juste à la limite des anneaux et même un peu à l'intérieur.

Titan, qui fait exception par sa taille (5'150 km de diamètre), est le plus remarquable d'entre eux. Sa surface est constituée de matériel rocheux et de glace. Il possède une atmosphère un peu plus dense que celle de la Terre, composée aussi en grande partie d'azote auquel s'ajoute du méthane et de l'argon. *Mimas* est un petit satellite criblé d'impacts de météorites et montre un énorme cratère de plus de 100 km de diamètre.



Titan est le plus gros satellite du système solaire.



Mimas et son énorme cratère

Uranus



diamètre	51'120 km
période de rotation	17.9 heures
densité	1.3
distance au Soleil	2'870 millions de km
révolution autour du Soleil	84 ans
Inclinaison sur l'écliptique	0.8°
Nombre de satellites	15
Poids d'un homme de 70 kg sur Terre	62 kg

Située très loin du Soleil, Uranus ne reçoit que très peu d'énergie et sa température est inférieure à -200° . Son atmosphère d'hydrogène, d'hélium et de méthane lui confère une couleur bleu-vert. On ne connaît pratiquement rien de sa surface. Elle montre toutefois une particularité singulière: son axe de rotation est situé dans le plan même de son orbite. C'est comme si elle "roulait" sur son orbite. Cette particularité fait qu'alternativement ses pôles sont parfaitement exposés au Soleil. Ils reçoivent ainsi plus d'énergie que les régions équatoriales.

Les satellites d'Uranus

Récemment on a découvert autour d'Uranus une douzaine d'anneaux très fins, peu visibles. Une quinzaine de satellites de petite taille complètent l'environnement de la planète. Ce sont des masses de glace mélangée avec de la poussière et des débris rocheux.

Seuls *Ariel*, *Umbriel*, *Titania* et *Obéron* ont un diamètre supérieur à 500 km. Leur nom est tiré du Songe d'une nuit d'été de Shakespeare.

Neptune



diamètre	49'530 km
période de rotation	19.2 heures
densité	1.6
distance au Soleil	4'497 millions km
révolution autour du Soleil	165 ans
Inclinaison sur l'écliptique	1.8°
Nombre de satellites	10
Poids d'un homme de 70 kg sur Terre	88 kg

Neptune photographiée par la sonde Voyager 2, en 1989.

On ne sait que très peu de choses de Neptune. Elle a été découverte par calcul à partir des perturbations qu'elle engendrait sur le mouvement d'Uranus. Au télescope, elle apparaît vert-bleu, ce qui est un indice de la présence d'un peu de méthane dans son atmosphère

constituée d'hydrogène et d'hélium. En 1989, la sonde Voyager 2 mit en évidence la présence d'une dizaine de petits satellites et d'un système d'anneaux fins asymétriques.

Les satellites de Neptune

Neptune possède huit satellites dont certains parcourent des orbites très inclinées par rapport à l'équateur de la planète. Le plus volumineux est **Triton**, dont le diamètre est de 2'700 km. Il montre la particularité de tourner dans le sens opposé de la rotation de la planète. A cause de ce mouvement dit rétrograde, sa vitesse orbitale décroît rapidement et il se rapproche de sa planète mère. Dans un avenir de quelques dizaines de millions d'années, il se disloquera probablement sous l'effet des marées et ses débris se joindront aux anneaux déjà existants.



Triton prise par Voyager 2 lors de son passage le 25 août 1989.

Pluton



Pluton et son satellite Charon

diamètre	2'250 km
période de rotation	6.3 jours
densité	2.0
distance au Soleil	5'214 millions km
révolution autour du Soleil	248 ans
Inclinaison sur l'écliptique	17.2°
Nombre de satellites	1
Poids d'un homme de 70 kg sur Terre	5 kg

Pluton est une toute petite planète très mystérieuse. Son diamètre, inférieur à celui de la Lune, est d'environ 2'300 km. Avec Charon, un satellite de près de 1'200 km de diamètre, Pluton constitue un système planétaire double. La densité moyenne de Pluton et Charon est de 2.0. Leur orbite autour du Soleil est non seulement fortement inclinée par rapport à celle des autres planètes (17°), mais aussi très excentrique. Cette particularité a fait que, jusqu'en l'an 2000, Pluton et son compagnon étaient plus proches du Soleil que Neptune.

Récemment, l'Union Astronomique universelle lui a retiré son statut de planète. Elle l'a reléguée au rang de "planète naine".

A propos des satellites et des anneaux

On observe des satellites autour de la plupart des planètes. Certains d'entre eux sont de grande taille, d'autres ne sont que de minuscules îlots rocheux de quelques dizaines ou quelques centaines de kilomètres de diamètre seulement.

Les planètes volumineuses possèdent également des systèmes d'anneaux dont les plus connus, visibles de la Terre, sont ceux de Saturne. L'exploration du système solaire par les sondes spatiales a mis en évidence l'existence d'anneaux ténus autour de Jupiter, de neuf anneaux concentriques très étroits autour d'Uranus ainsi que de quatre anneaux au moins autour de Neptune.

Les effets de marée et la "limite de Roche"

Chaque satellite induit un effet de marée sur la planète qu'il accompagne. Réciproquement il existe aussi sur chaque satellite un effet de marée dû à la planète centrale. Provoqués par les forces de la gravitation, les effets de marées sont d'autant plus intenses que satellites et planète sont plus proches les uns des autres et que leur masse est plus grande.

Si, pour les raisons que nous expliquerons plus loin, un satellite se rapproche de sa planète mère, les forces d'attraction réciproques augmentent et, à un moment donné, elles vont être supérieures aux forces de cohésion qui maintiennent ensemble tous les constituants du satellite : celui-ci aura alors tendance à se désagréger !

Pour chaque planète il existe donc une distance limite en deçà de laquelle aucun corps céleste ne peut pénétrer sans risquer de se disloquer. Cette limite, dite de "Roche" - du nom du mathématicien qui l'a mise en évidence - dépend du volume de la planète et des densités des deux astres. Cette distance est assez faible pour les planètes de petite taille mais elle est beaucoup plus importante pour les planètes volumineuses.

Toutefois, les anneaux peuvent s'étendre un peu au-delà de la limite de Roche et les satellites peuvent exister un peu en deçà de cette limite. La valeur de limite de Roche calculée pour le système Terre-Lune est de 13'000 km.

Les anneaux

A l'intérieur de la limite de Roche, les petits objets rocheux ne peuvent pas s'agréger en un satellite unique. Ils gravitent tous autour de leur planète, chacun avec son orbite propre, entrant en collision les uns avec les autres. Ils constituent alors des ceintures concentriques aplaties : ce sont les anneaux. Les principaux anneaux de Saturne sont presque tous situés à l'intérieur de la limite de Roche qui est d'environ 140'000 km en ce qui concerne cette planète.

Au delà de la limite de Roche, les satellites

C'est surtout autour des grandes planètes que les satellites sont les plus abondants. On en dénombre seize autour de Jupiter, une cinquantaine autour de Saturne, une quinzaine autour d'Uranus. Neptune en possède au moins dix, Mars deux, la Terre et Pluton n'en ont qu'un seul, alors que Vénus et Mercure n'en ont pas du tout. Les masses des satellites

restent toujours très faibles comparées à celles des planètes qu'ils accompagnent. Ainsi Ganymède, le plus gros de tous les satellites et dont le diamètre est supérieur à 5'000 km, ne dépasse pas un demi-millionième de la masse de Jupiter.

Le cas de la Lune par contre, est exceptionnel. En effet sa masse représente 1/81 de celle de la Terre. Récemment, on a découvert un cas encore plus exceptionnel : le satellite Charon, dont la masse est 1/8 de celle de Pluton.

Les météorites, ces messagères de l'espace¹

Quelque centaines de météorites de taille notable heurtent la Terre chaque année. Leur poids est compris entre quelques grammes et plusieurs tonnes. Beaucoup plus rarement, notre planète reçoit des météorites énormes dont la masse peut dépasser 100'000 tonnes.



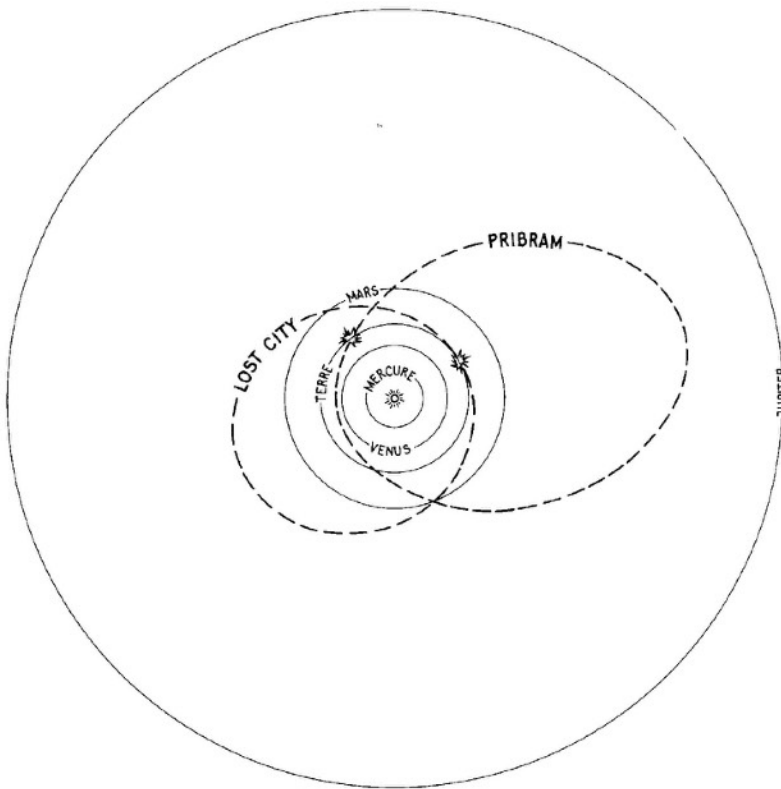
Meteor Crater, Arizona

Il a été provoqué par la chute d'une météorite géante il y a environ 20'000 ans.

Elle créent à leur arrivée un cratère d'impact analogue à ceux qu'on peut observer sur la Lune et sur la plupart des astres du système solaire. Toutefois, soumis à l'action de l'érosion, ces cratères finissent par disparaître. Le plus fameux d'entre eux est celui de Cañon Diablo, en Arizona. Il a plus d'un kilomètre de diamètre et a été provoqué par la chute d'une météorite géante qui est tombée là, il y a une vingtaine de milliers d'années.

Les météorites viennent, pour la plupart, de la région des astéroïdes, ces débris, témoins du matériau originel qui a contribué à la formation des planètes. Elles représentent un stade final de l'accrétion, ce phénomène qui a permis aux planètes de se former par l'agglomération de matériaux épars qui gravitaient autour du Soleil en formation. En effet, les premières centaines de millions d'années d'existence des planètes ont été marquées par un intense bombardement de météorites. Puis, avec la diminution du nombre des petits corps gravitant dans le système solaire, le bombardement a rapidement diminué. Aujourd'hui, la probabilité que la Terre puisse être heurtée par un astéroïde de grande taille est extrêmement faible. Quelques rares météorites proviennent indirectement de la Lune ou de Mars. Ce sont des météorites géantes qui se sont écrasées sur ces astres, entraînant la projection de "giclures" dans l'espace et qui ont été capturées par l'attraction terrestre. On a pu reconstituer l'orbite de plusieurs météorites. Ce sont des ellipses dont le périhélie (la partie haute) se situe presque toujours entre Mars et Jupiter.

¹ Voir aussi des mêmes auteurs "Les météorites, messagères de l'espace"



Reconstitution des orbites de deux météorites, Pribram et Lost City. La partie haute de leur orbite se situe dans la ceinture des Astéroïdes.

Les Comètes, des visiteuses discrètes

Périodiquement, des comètes provenant de régions extrêmement éloignées, s'approchent du Soleil, frôlant parfois une planète, puis retournent dans leur région lointaine. Leur apparition sporadique et les phénomènes spectaculaires qui marquent leur passage ont toujours fasciné les hommes.

Les astrophysiciens ont profité du passage de la comète de Halley en 1986 pour envoyer plusieurs sondes spatiales dans son voisinage immédiat. La sonde Giotto a passé à 596 km du noyau de la comète. Les résultats de ces diverses missions ont montré que le noyau de la comète de Halley est une masse sombre dont la forme est semblable à celle d'un ananas de 16 km de long et de 8 km de diamètre, constitué de plus de 80% de glace, recouverte de poussière.

En s'approchant du Soleil une faible partie de la glace se volatilise entraînant avec elle de fines poussières et divers autres gaz. Ces éléments alimentent l'enveloppe gazeuse qui entoure le noyau ainsi que la queue de la comète. Cette dernière est provoquée par la pression du vent solaire sur les parties volatiles de la comète.

De nombreuses comètes reviennent périodiquement et on peut calculer leur périodicité. La plus connue d'entre elles est la comète de Halley qui passe au voisinage de la Terre tous



Comète de Hale Bopp visible durant l'été 1997

les 76 ans. Les comètes abandonnent sur leur passage des nuages de poussière qui à leur tour, dans les nuits claires, marqueront leur passage sous forme d'essaims d'étoiles filantes. Les poussières les plus fines, distribuées en un disque épais autour de la terre, reflètent la lumière du soleil et sont à l'origine de la **lumière zodiacale**, cette faible lueur qu'on perçoit parfois dans le ciel nocturne.

Au delà de Neptune, la ceinture de Kuiper¹

Un peu au-delà de l'orbite de Neptune existe une ceinture en forme d'anneau analogue à la ceinture des Astéroïdes, constituée d'objets pouvant atteindre plus de 100 km de diamètre. A ce jour, on a déjà répertorié plusieurs dizaines de milliers d'objets, le plus gros dépassant 1000 km de diamètre. A la différence de la ceinture des Astéroïdes, la ceinture de Kuiper est peuplée de petits astres constitués de composés volatils gelés comme le méthane, l'ammoniac ou l'eau.

Il semble encore que le périhélie (la partie la plus éloignée d'une orbite) des comètes à courte période se situerait dans la Ceinture de Kuiper.

Plus loin encore, l'hypothétique Nuage de Oort²

Le nuage d'Oort serait une vaste zone située bien au-delà de la ceinture de Kuiper, aux confins du Système solaire Elle contiendrait des milliards de comètes.

Aucune observation directe n'a pu mettre en évidence ce nuage mais les calcul des orbites des comètes à longue période semble montrer qu'elles sont issues de cette région qui constituerait donc un "réservoir de comètes". Ce nuage serait le reliquat de la nébuleuse originelle qui s'est effondrée pour former le Soleil et les planètes il y a environ cinq milliards d'années.

¹ Gérard Guiper (1905-1973), astronome hollandais qui le premier a postulé l'existence de cette ceinture en 1951.

² Jan Oort (1900-1992), astronome hollandais.

La Lune, compagne de la Terre

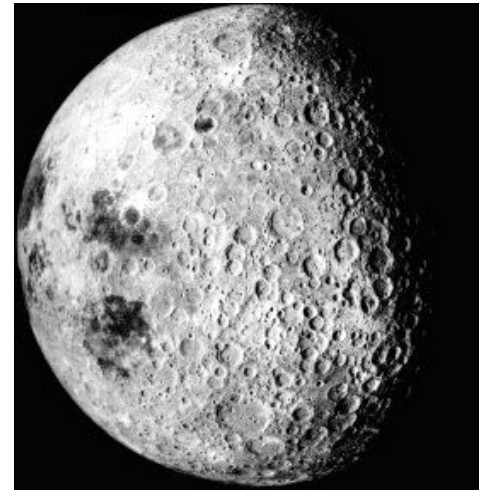
La Lune



<i>Diamètre</i>	3'473 km
<i>période de rotation</i>	27.3 jours
<i>densité</i>	3.3
<i>distance à la terre</i>	384'000 km
<i>révolution autour de la Terre</i>	27,3 jours
<i>Inclinaison sur l'écliptique</i>	5.1°
<i>Poids d'un homme de 70 kg</i>	12 kg

La Lune tourne sur elle-même avec la même période que sa rotation autour de la Terre. Elle présente donc toujours la même face au regard des Terriens.

Les mesures géophysiques effectuées par les modules qui se sont posés sur notre voisine révèlent une structure interne assez semblable à celle de la Terre. Bien que cette structure ne paraisse pas homogène, elle possède un petit noyau central moins dense que celui de la Terre entouré d'un manteau rocheux, lui-même recouvert d'une croûte superficielle d'une trentaine de kilomètres d'épaisseur. Cette structure résulte du refroidissement et de la différenciation par gravité d'un magma originel en fusion. Il semble toutefois que la croûte soit plus épaisse sur sa face cachée, ce qui pourrait expliquer son mouvement synchrone. Son refroidissement plus avancé que celui de la Terre fait qu'aujourd'hui la Lune est géologiquement inactive.



Face cachée de la Lune cartographiée par la sonde Appolo 16 ,en 1972

Le système Terre-Lune, un haltère asymétrique



La Lune occupe donc une place à part dans le cortège des satellites. Distante en moyenne de 384'000 km, sa masse et son volume, relativement à ceux de la Terre (1/81e et 1/50e), en font un satellite particulier. De plus, le diamètre de la Terre n'est que quatre fois supérieur à celui de la Lune.

On affirme généralement que la Lune tourne autour de la Terre. Ce n'est pas vraiment exact et il est plus correct de

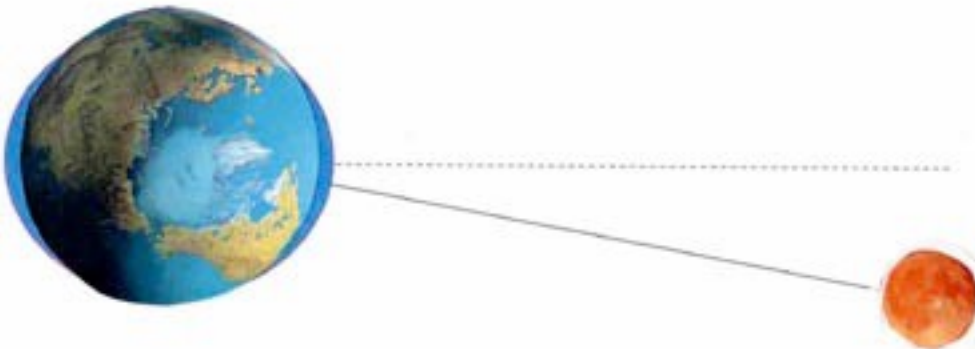
préciser que l'ensemble Terre-Lune, tel un haltère asymétrique, tourne autour du centre de gravité commun situé sur l'axe qui relie les deux astres, à 4'667 km du centre de la Terre.



La Lune est responsable des marées

Chacun sait que l'attraction de la Lune sur les océans provoque un gonflement du niveau des eaux - la marée - lors du passage de notre satellite au zénith. Mais ce qu'on sait moins - les manuels scolaires n'en parlent généralement pas - c'est qu'il y a aussi une marée haute sur la face de la Terre opposée à la Lune. Cette autre marée est provoquée par la force centrifuge occasionnée par la rotation asymétrique de la Terre autour du centre de gravité de "l'haltère" Terre-Lune.

Le phénomène des marées n'est pas restreint à la masse des océans mais il affecte aussi les continents: il y a en effet des marées terrestres, tout à fait analogues aux marées marines, qui soulèvent les continents d'une quarantaine de centimètres deux fois par jour.



L'ensemble Terre-Lune, un haltère asymétrique. On distingue les deux bourrelets que constituent les marées .

Les marées, de gigantesques freins.

Sur le dessin de la page précédente, on voit les deux "bourrelets" que sont les marées, toujours orientés selon l'axe Terre-Lune, mais avec une légère avance. Celle-ci est due à l'entraînement de la masse des océans par la rotation de la Terre qui décale la déformation causée par l'attraction de la Lune vers l'avant. Ces deux bourrelets agissent comme d'immenses mâchoires de frein qui, à la longue, provoquent un ralentissement de la rotation de la Terre.



Les marées agissent comme de gigantesques freins.

La Lune s'éloigne, la Terre ralentit !

L'énergie de freinage, ainsi perdue par notre planète, est transmise à la Lune et transférée à son mouvement orbital, l'éloignant petit à petit de nous. Cet éloignement augmente de 3 cm chaque année alors que le ralentissement de la rotation de la Terre entraîne une augmentation de la durée du jour d'environ 2 millièmes de seconde par siècle ! Cette valeur peut paraître faible mais, si on tient compte des quatre milliards et demi d'années d'existence de la Terre, ce ralentissement est loin d'être négligeable. On a pu démontrer en effet qu'à l'ère primaire la Terre tournait sur elle-même en 22 heures et que l'année comptait alors 400 jours !

Si on remonte dans le temps de quelques centaines de millions d'années, on est obligé d'admettre que la Lune était à une distance beaucoup plus proche de la Terre, peut-être à moins de 100'000 km.

Petite histoire "géologique" de la Lune

On doit les premières descriptions cartographiques de la Lune à Galilée qui, dès 1609, pointait sa lunette en direction de notre satellite. Très vite on a distingué deux sortes de formations :

- des zones sombres, plates, grossièrement circulaires, improprement appelées *maria* ou *mers*,
- des "continents", plus clairs, montagneux, occupant le reste de la surface.

Mers et continents sont criblés de cratères circulaires de toutes dimensions, dont les plus grands dépassent plusieurs centaines de km de diamètre.



Les "continents"

Caractérisés par une couleur claire, les continents recouvrent la moitié de la surface lunaire. Ils sont marqués par la juxtaposition et le recouvrement mutuel d'une multitude de cratères de toutes dimensions et de leurs "éjecta".

Le sol lunaire, épais d'une dizaine de mètres, s'appelle "régolite". C'est une couche de poussière et de débris rocheux plus ou moins grossiers. Ce sont les débris d'impacts de météorites. Les roches rapportées sur terre sont toutes des roches éruptives, principalement des anorthosites, plus rarement des basaltes.¹ Toutes ces roches montrent une fracturation intense due aux innombrables impacts météoritiques et sont transformées en de véritables brèches. L'âge de la cristallisation des minéraux est compris entre -4.4 et -4.6 milliards d'années, alors que l'âge de la transformation en brèches s'étend de 4.6 à 3.8 milliards d'années.



Anorthosite lunaire

Les "mers"

Les "mers" sont les taches sombres qu'on peut apercevoir à l'oeil nu au cours des nuits de pleine Lune. Ce sont de vastes plaines peu cratérisées de forme grossièrement circulaire. Elles sont nombreuses sur la face visible de notre satellite et, curieusement, très rares sur sa face cachée. Ces "mers" recouvrent les "continents" en laissant émerger les parties les plus hautes, donnant l'impressions de caps, d'îles et de péninsules. Elles sont constituées de basalte. On pense que ce sont des météorites géantes qui ont percé le manteau et favorisé l'invasion du cratère par des basaltes en fusion.

¹ Voir des mêmes auteurs "Le Monde fascinant des Roches"

Y-a-t-il sur la Lune des minéraux inconnus sur Terre ?

Seules trois espèces minérales inconnues sur Terre ont été identifiées dans les roches lunaires. Il s'agit de minéraux cristallisés à des pressions très élevées (impact de météorites) ou dans des conditions fortement réductrices.

Nouveaux minéraux découverts sur la Lune

Tranquillityite	$Fe_3(Zr, Y)_2 Ti_3Si_3O_{24}$	Le zirconium, l'yttrium et le titane sont des éléments relativement abondants dans les basaltes lunaires où ce minéral a été identifié.
Pyroxferroite	$Fe_6CaSi_7O_{21}$	Minéral de haute pression trouvé dans un gabbro.
Armalcolite	$(Mg, Fe)Ti_2O_5$	Le nom du minéral est composé des premières syllabes des noms des astronautes Armstrong, Aldrin et Collins.

Les roches lunaires

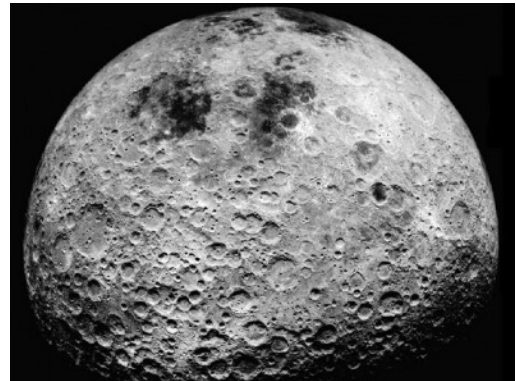
Elles sont toutes de nature éruptive, à l'exception des brèches de la surface qui ont été produites par les impacts des météorites. Leur composition est comparable à celle des roches éruptives terrestres. Toutefois, globalement, elles contiennent plus de calcium, d'aluminium et de titane, un peu moins de sodium et de potassium. Elles sont de nature anorthositique¹.

La composition des roches qui constituent les mers est différente de celles des continents : ce sont des basaltes qui ont envahi les parties basses d'anciens bassins et cratères géants. L'âge de ces basaltes est compris entre - 3.9 milliards d'années pour les plus anciens et -3.2 milliards d'années pour les plus récents.

Les cratères

Ils représentent la principale caractéristique du relief lunaire. Ils sont l'aboutissement d'un bombardement intense de météorites de toutes tailles qui s'est produit au début de l'histoire de la Lune. Ils sont toujours entourés d'une couronne de débris, les "éjecta".

Les dimensions des cratères varient de quelques mètres pour les plus petits à plusieurs centaines de km pour les plus vastes. On nomme souvent "**bas-sins**" ceux dont le diamètre dépasse 200 km. L'étude des âges relatifs des cratères suivant leur taille, selon le principe qu'un cratère qui se superpose à un autre est plus jeune que celui-ci, permet de reconstituer l'intensité du bombardement météoritique dans le temps.



Cratères sur la face cachée de la Lune (photo Apollo 16)

¹ Voir des mêmes auteurs et sur le même site *Le Monde fascinant des roches*

L'origine de la Lune

L'origine de la Lune est toujours une énigme pour les savants. Plusieurs hypothèses ont été échafaudées :

- La Lune serait une partie du manteau terrestre qui se serait séparé de la Terre très tôt dans l'histoire commune des deux astres.
- La Lune se serait formée ailleurs dans le système solaire et aurait été capturée lors de son passage à proximité de la Terre.
- Les deux astres se seraient formés simultanément à proximité l'un de l'autre, à partir du même nuage de poussière et de gaz.
- La Lune se serait formée à partir du matériel éjecté à la suite d'une collision entre la Terre et un autre astre.

Les deux premières ont été abandonnées car elles ne parviennent pas à expliquer la dynamique des mouvements des deux astres ni les analogies et différences dans leur composition pétrographique.

L'hypothèse de la formation simultanée des deux astres à proximité l'un de l'autre a eu longtemps la faveur des savants. Toutefois elle n'explique ni pourquoi la Lune n'a pas de noyau métallique, ni le moment cinétique actuel du système.

L'hypothèse de l'impact connaît actuellement un regain de faveur et des simulation mathématiques semblent indiquer que ce modèle permet d'expliquer tous les paramètres physiques et dynamiques caractéristiques des deux astres.

Très tôt dans l'histoire du système solaire, une collision se serait produite entre la Terre et un autre objet de grande taille. Cette collision aurait entraîné l'éjection d'une énorme quantité de matière qui se serait agglomérée dans le voisinage de la Terre pour donner naissance à la Lune.

Cette théorie peut expliquer toutes les différences et similarités entre la Terre et la Lune. La matière éjectée provenait principalement du manteau, plus pauvre en fer, ce qui explique que la Lune contient une faible proportion de cet élément. Cette hypothèse explique mieux pourquoi la Terre est la seule planète interne du système solaire à posséder un satellite de si grande taille.



Une collision avec une gigantesque astéroïde, il y a 4.5 milliards d'années serait à l'origine de la formation de la Lune (system.solaire.free.fr)

<i>Résumé de l'histoire géologique de la Lune</i>		
<i>Age en m.a</i>	<i>Activité géologique</i>	
0.5		<i>Les chutes de météorites deviennent rares</i>
1.0		
1.5	<i>Astre "mort"</i>	<i>L'activité volcanique est terminée. Quelques rares météorites de faibles dimensions s'écrasent encore parfois à sa surface. Des poussières cosmiques "sablent" les roches et adoucissent très lentement le relief lunaire.</i>
2.0		<i>Les chutes de météorites diminuent.</i>
2.5		
3.0	<i>Formation des "mers" (de -3.8 m.a. à -2.8 m.a.)</i>	<i>Des zones de fusion partielle provoquent l'émission de magmas basaltiques qui envahissent les bassins météoritiques les plus affaissés, formant ainsi les "mers"</i>
3.5		<i>Les chutes de météorites sont encore abondantes.</i>
4.0	<i>Formation de la croûte (de -4.3 m.a. à -3.8 m.a.)</i>	<i>La chaleur entraîne la fusion partielle de la Lune. En se refroidissant, les minéraux les moins denses se concentrent en surface pour former la croûte lunaire de composition anorthositique.</i>
4.5	<i>Naissance de la Lune</i>	<i>Le bombardement météoritique est très intense</i>

Conclusion provisoire

Notre système solaire n'est pas unique : on sait aujourd'hui qu'un très grand nombre d'étoiles parmi les milliards d'autres qui peuplent notre Galaxie, possèdent un système planétaire analogue au nôtre et que les processus donnant naissance à une forme de vie ont certainement existé pour des planètes inconnues gravitant autour d'étoiles lointaines.

*Les progrès de l'astrophysique ont d'ailleurs permis de découvrir de nombreuses planètes dans le voisinage d'étoiles relativement proches. On les a baptisées **exoplanètes**.*

Il est donc certain que la vie existe également ailleurs, non seulement dans notre galaxie, mais aussi dans les milliards d'autres qui peuplent notre Univers. Mais sous quelle forme ? Nous ne le saurons jamais !

L'incommensurabilité de cet univers et toutes les questions que son existence font apparaître sont là pour nous rappeler la précarité et l'infinie petitesse de l'Homme.

Par ailleurs, l'Astronomie est la seule science qui nous permette de remonter dans le temps. Les galaxies très lointaines que nous observons aujourd'hui sont les images prises il y a plusieurs milliards d'années et qui ont mis tout ce temps à nous parvenir.

Imaginons encore que nous ayons un télescope ultra puissant et que nous le pointions sur une planète située à 80 millions d'années lumière. Imaginons encore que sur cette planète un lac parfaitement immobile qui se comporte comme un miroir. Nous pourrions alors voir une image de la Terre telle qu'elle était il y a 160 millions d'années et, peut-être, pourrions nous voir courir les dinosaures !
