

Eclairage scientifique

Cycles 1, 2, 3 et 4

Brève histoire de l'astronomie et des représentations du monde de l'Antiquité à Galilée

Résumé

La Terre tourne sur elle-même et autour du Soleil avec toutes les planètes. Ces deux affirmations semblent évidentes aujourd'hui, mais il n'en a pas toujours été ainsi, loin de là ! L'astronomie a occupé une place majeure dans l'histoire de la connaissance, au point d'être considérée comme la mère de toutes les sciences. Depuis plus de 6 000 ans, elle a façonné notre vision du monde et, inversement, a été influencée par les hommes et les femmes qui l'ont faite. Examinons les grandes étapes de cette évolution, depuis la Grèce antique jusqu'à Galilée.

Éclairage scientifique

Brève histoire de l'astronomie et des représentations du monde de l'Antiquité à Galilée

La Terre tourne sur elle-même et autour du Soleil avec toutes les planètes. Ces deux affirmations semblent évidentes aujourd'hui, mais il n'en a pas toujours été ainsi, loin de là! L'astronomie a occupé une place majeure dans l'histoire de la connaissance, au point d'être considérée comme la mère de toutes les sciences. Depuis plus de 6000 ans, elle a façonné notre vision du monde et, inversement, a été influencée par les hommes et les femmes qui l'ont faite. Examinons les grandes étapes de cette évolution¹, depuis la Grèce antique jusqu'à Galilée.

L'astronomie grecque

On peut se faire une idée des connaissances astronomiques de l'Antiquité grâce aux philosophes grecs ayant vécu entre Thalès (VII^e-VI^e siècle av. J.-C.) et Socrate (470?-399 av. J.-C.). Les textes qui nous sont parvenus permettent de savoir que des faits astronomiques d'importance furent établis dès cette époque: la distinction entre étoile et planète, la démonstration que la Lune est éclairée par le Soleil, la reconnaissance que l'étoile du soir et l'étoile du matin forment un seul astre – la planète Vénus – et la compréhension que les éclipses de Soleil et de Lune sont dues à l'interposition de la Lune ou de la Terre. On ne sait pas exactement quand ni comment fut découverte la sphéricité de la Terre, mais il est probable que cela a à voir avec le changement d'aspect du ciel au cours des voyages.

Le philosophe Platon (428?-348? av. J.-C.) distinguait le mouvement diurne et le mouvement annuel du ciel et donnait un ordre géocentrique (avec la Terre au centre de l'Univers).

La découverte de la sphéricité de la Terre a dû suggérer l'idée d'une sphéricité analogue du ciel et d'un mouvement circulaire des astres: Eudoxe de Cnide (390?-337? av. J.-C.) décrivait les mouvements du Soleil et de la Lune par la combinaison de mouvements uniformes de deux sphères concentriques. Cela lui permettait d'expliquer la différence entre le mouvement apparent des planètes et celui des étoiles, mais ne permettait notamment pas d'expliquer la variation d'éclat des planètes, qui semblait indiquer une variation de la distance.

La période hellénistique

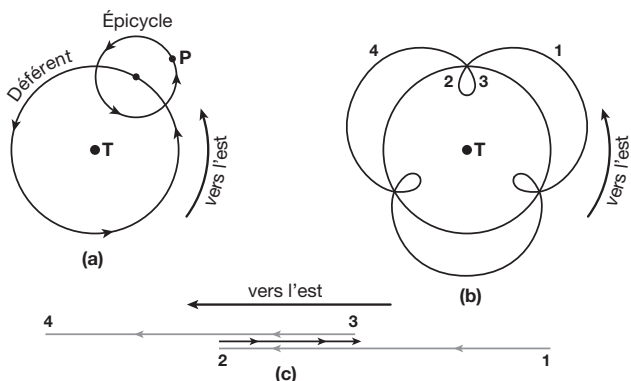
L'astronomie hellénistique s'étend des conquêtes orientales d'Alexandre le Grand (IV^e siècle av. J.-C.) jusqu'aux conquêtes romaines du II^e siècle av. J.-C., mais a perduré bien après dans quelques foyers intellectuels. Elle s'est épanouie de la Grèce à l'Égypte en passant par l'Asie Mineure et une partie de l'actuelle Syrie. Ce que l'on sait de l'astronomie de cette période nous est connu essentiellement à travers Ptolémée (II^e siècle ap. J.-C.) dont l'œuvre a éclipsé le travail de ses prédécesseurs.

Les écrits d'Aristote (384?-322? av. J.-C.) ont eu une influence considérable en astronomie. En particulier, sa conception de l'Univers a perduré jusqu'au XVII^e siècle. Elle est exposée plus spécialement dans deux ouvrages, *Physique* et *Traité du ciel*. Aristote y distinguait le monde infralunaire et le monde supralunaire. Le premier, situé sous la Lune, était le monde du changement dans lequel les mouvements étaient rectilignes et s'effectuaient soit vers le haut, soit vers le bas, à partir ou en direction du centre de la Terre. Au-delà de la Lune s'étendait le monde supralunaire rempli d'une substance appelée « éther », régi par des lois différentes. On n'y trouvait que des mouvements circulaires

¹ L'histoire des calendriers est décrite p. 88.

et uniformes, tout y était immuable, rien ne pouvait y naître ni périr. La Terre, immobile, occupait le centre de cet univers sphérique, qui abritait, après la Lune, le Soleil, Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne, puis le ciel des étoiles fixes.

Un pas fondamental fut franchi par Apollonius de Perge (vers 200 av. J.-C.): il expliquait les mouvements du ciel comme une combinaison de cercles (épicycles) pas tous centrés sur la Terre.



- (a) - Combinaison d'un cercle déferent et d'un épicycle
- (b) - Mouvement de la planète P autour de la Terre
- (c) - Parties 1. 2. 3. 4 du mouvement décrit en (b), tel qu'il serait vu depuis la Terre

(a) Cercle déferent et épicycle cherchant à expliquer la rétrogradation des planètes. (b) et (c) En effet, depuis la Terre, le mouvement d'une planète semble aller vers l'avant, puis vers l'arrière, puis à nouveau vers l'avant.

On doit à Hipparque de Nicée (190-120 av. J.-C.), l'un des plus grands astronomes de l'Antiquité, d'importantes découvertes, comme la précession des équinoxes, mais aussi un catalogue contenant environ 850 étoiles.

L'œuvre de Ptolémée

C'est dans la ville d'Alexandrie, célèbre pour sa bibliothèque, que vécut Claude Ptolémée (100-170 ap. J.-C.), le plus grand astronome de l'Antiquité, dont l'œuvre est considérable par sa richesse et sa diversité.

Son ouvrage le plus connu, qui resta jusqu'au XVII^e siècle la base des connaissances de tout astronome compétent, fut l'*Almageste*. Ptolémée commençait par y rappeler sa vision du monde, dont les fondements ont été établis par Aristote, avec une Terre sphérique, immobile au centre du monde. C'est dans la théorie du mouvement de la Lune qu'il apportait une contribution majeure en découvrant une irrégularité de son mouvement. Enfin, il exposait une méthode de calcul des éclipses de Soleil, qui permettait de savoir si l'éclipse serait partielle ou totale, mais aussi de calculer sa durée. Cette méthode ne subit pratiquement aucune modification jusqu'au XVII^e siècle! Ptolémée établit également le premier catalogue complet d'étoiles que nous ayons conservé; elles étaient classées par constellations, avec leurs coordonnées et leur éclat.

C'est sans doute dans la théorie du mouvement des planètes que Ptolémée a le plus excellé en proposant de mettre un autre point que la Terre au centre du mouvement du ciel (le principe du « point équant »). En effet, les théories d'Apollonius et d'Hipparque n'expliquaient pas toutes les irrégularités du mouvement des planètes. En généralisant le point équant à presque toutes les planètes, Ptolémée parvint à rendre compte de façon très satisfaisante de leur position le long de l'écliptique (longitude).

Au total, l'*Almageste* permettait de calculer, grâce à des tables et à des exemples, la position du Soleil, de la Lune, l'occurrence d'une éclipse de Lune ou de Soleil, la position d'une étoile ou d'une planète, une opposition, une élongation, tout ceci pour une date quelconque.

La période médiévale

Après Ptolémée, on assista à un déclin graduel de l'astronomie, surtout dans l'Occident latin. Les efforts tendaient essentiellement à la préservation du savoir acquis, plutôt qu'à son accroissement. L'Orient connut un meilleur climat pour la science. L'astronomie grecque fut redécouverte par les Arabes. Ainsi, il y eut cinq traductions de l'*Almageste* en arabe, dont deux seulement nous sont parvenues. En revanche, il est presque impossible de faire l'inventaire de tous les commentaires et abrégés dont l'*Almageste* a fait l'objet.

À partir du ^x^e siècle, les astronomes arabes devinrent très critiques vis-à-vis de Ptolémée. Ainsi, Ibn al-Haytam (965-1040?), connu en Occident sous le nom d'Alhazen, résuma les quatre principes physiques sur lesquels reposait la construction du monde dans son traité *Sur la configuration du monde*:

- un corps naturel céleste ne peut pas, par nature, se mouvoir de plus d'un mouvement;
- un corps céleste simple ne peut être mû d'un mouvement irrégulier;
- un corps céleste est impassible et ne saurait subir aucune division ou pénétration;
- le vide n'existe pas dans l'Univers.

Cet accord de principe avec Aristote étant posé, Alhazen tenta d'intégrer ces principes dans la doctrine des mouvements célestes de l'*Almageste*. C'est grâce à son traité que la vision ptoléméenne se répandit dans le monde arabe et dans l'Occident médiéval. Dans un second traité plus tardif, Alhazen reprocha à Ptolémée d'avoir utilisé le principe de l'équant comme artifice mathématique, qu'il savait faux d'un point de vue philosophique, puisqu'il violait le principe des mouvements circulaires uniformes. Toutes ces critiques furent reprises en Occident à partir du ^{xiii}^e siècle, mais ces réfutations ne menacèrent jamais sérieusement les bases mathématiques et les résultats de l'*Almageste*.

Le ^{xii}^e siècle connut une intense activité de traduction notamment en Espagne, en Italie du Sud et en Sicile. C'est à Tolède que Gérard de Crémone traduisit l'*Almageste* de l'arabe en latin, ainsi que des traités d'Aristote, d'Apollonius et d'auteurs arabes. Une grande partie du corpus aristotélicien et de nombreux ouvrages d'astronomie se répandirent en Europe au ^{xiii}^e siècle, certains très rudimentaires, d'autres plus savants.

Professeur de mathématiques et astronome à l'université de Paris à partir de 1221, Jean de Sacrobosco composa un manuel qui devint rapidement populaire, le *Traité de la sphère*. Ce petit ouvrage, premier livre d'astronomie imprimé (en 1472 à Ferrare), était encore étudié dans les universités au ^{xvii}^e siècle! Il s'agissait pourtant d'un ouvrage rudimentaire, composé de quatre chapitres, qui rappelait succinctement la physique aristotélicienne et qui survolait les théories du mouvement du Soleil et des planètes.

L'Occident latin a disposé de tables astronomiques à partir du ^{xii}^e siècle. Au ^{xiii}^e siècle, l'intérêt croissant pour l'astronomie, dû notamment à l'importance accordée à l'astrologie par les puissants, permit de stimuler le développement des tables. Celles des ^{xii}^e et ^{xiii}^e siècles étaient des tables arabes traduites en latin: tables d'al-Khwarizmi, tables d'al-Battani et surtout tables d'Arzaquiel, dites *tables de Tolède* en raison de leur méridien de référence, les seules à avoir connu une diffusion quasi générale. Les *tables de Tolède*, conçues pour le calendrier arabe, sont à l'origine d'une longue descendance, avec des adaptations pour le calendrier chrétien. Vers 1320, dans les milieux astronomiques parisiens, des tables beaucoup plus ambitieuses se répandirent, établies indépendamment d'un calendrier particulier et mises au compte du roi Alphonse X de Castille: les *Tables alphonsines*. Leur succès fut tel qu'à partir du ^{xiv}^e siècle, on ne rencontra pratiquement plus que les *Tables alphonsines* ou leurs adaptations. Ce succès résulta plus de leur mode d'emploi simple que de la qualité des positions prédites.

Au début de la Renaissance, l'astronomie se trouvait dans une impasse. L'héritage aristotélico-ptoléméen exerçait une telle domination sur l'astronomie qu'il paraissait impossible d'en sortir. La rareté des observations et l'imprécision des tables astronomiques, souvent mises à rude épreuve par leur incapacité à prévoir correctement des phénomènes célestes majeurs, nourrissaient chez certains auteurs le sentiment qu'une réforme profonde de l'astronomie et de son statut vis-à-vis de la physique était nécessaire. Ce fut l'œuvre des astronomes du ^{xvi}^e siècle: Copernic, Tycho Brahe, Kepler et Galilée.

La révolution copernicienne

La publication en 1543 du *De revolutionibus orbium coelestium* (*Des révolutions des sphères célestes*) de Nicolas Copernic (1473-1543) marqua un tournant décisif dans l'histoire de l'astronomie. L'auteur proposait, pour la première fois, un modèle du monde dans lequel les planètes tournaient autour du Soleil, la Terre tournant en plus sur elle-même, ce qui expliquait la succession des jours et des nuits.

Les raisons de l'adoption de l'héliocentrisme par Copernic restent une énigme. Depuis longtemps, de nombreux astronomes avaient pris conscience des imperfections du système géocentrique de Ptolémée. Encore fallait-il proposer un autre système aussi efficace.

L'idée que l'on a traditionnellement de Copernic découvrant que la Terre tourne autour du Soleil suite à de nombreuses observations est un mythe. Copernic n'a pratiquement jamais effectué d'observations. En outre, son système était en partie verrouillé par la physique et l'astronomie anciennes. Il continuait de voir le mouvement circulaire uniforme comme le seul possible pour les planètes. Ayant peu observé, il a massivement emprunté à ses prédécesseurs, en particulier à Ptolémée, sans discuter leurs observations. Il a repris les modèles de l'*Almageste* en effectuant un changement de repère, adoptant le point équatorial de façon déguisée. Considérer le système de Copernic comme un modèle simple, avec un Soleil central et des planètes effectuant autour des cercles à vitesse uniforme, est purement esthétique. En réalité, l'échafaudage copernicien était plus compliqué encore que celui de Ptolémée, preuve que l'héliocentrisme (la position centrale du Soleil dans l'Univers) n'était pas forcément un facteur d'amélioration par rapport au système géocentrique de l'Antiquité.

Paradoxalement, c'est l'aspect « calcul prédictif » qui, dans un premier temps, assura la diffusion des idées coperniciennes. En 1551 parurent les *Tables pruteniques* de l'astronome allemand Érasme Reinhold (1511-1553). Elles étaient les premières à se fonder sur le modèle copernicien, tout en comblant les lacunes du *De revolutionibus*, et permirent aux astronomes de calculer longtemps à l'avance la position du Soleil, de la Lune et des planètes, et de prévoir les éclipses. Leurs bonnes prévisions, dues en partie à l'utilisation d'observations plus récentes, mais aussi la publicité dont elles bénéficièrent, les placèrent progressivement sur le devant de la scène astronomique, et contribuèrent à familiariser leurs utilisateurs avec le calcul copernicien. Les éphémérides établies pour plusieurs années à partir des *Tables pruteniques* dominèrent l'astronomie pendant près de quatre-vingts ans, jusqu'à ce qu'elles soient, à leur tour, supplantées par des tables encore plus précises, les *Tables rodolphines* que Johannes Kepler publia en 1627.

Tycho Brahe

Pour certains astronomes, le système de Copernic demeurait un artifice de calcul, aucune preuve n'étant avancée pour confirmer le système du monde sur lequel il se fondait. Telle était l'opinion de Tycho Brahe (1546-1601), un des plus illustres astronomes du XVI^e siècle. Convaincu très tôt de l'insuffisance des tables astronomiques en usage, Tycho Brahe avait conscience que l'amélioration de l'astronomie passait par l'accumulation d'observations précises. En 1572, l'apparition dans le ciel d'une étoile nouvelle (nous savons maintenant qu'il s'agissait d'une explosion d'étoile, une supernova) l'engagea dans cette voie. L'astronomie du XVI^e siècle restait encore fortement imprégnée par la vision aristotélicienne de ciels immuables. L'apparition de cette nouvelle étoile, en totale contradiction avec le dogme, décida Tycho Brahe à consacrer sa vie à l'observation du ciel.

Un autre coup sévère fut porté à la physique d'Aristote quelques années plus tard, lorsque Tycho Brahe et d'autres astronomes observèrent une série de comètes et démontrèrent que ces objets n'étaient pas des phénomènes atmosphériques, comme on le pensait alors, mais des astres situés au-delà de la sphère lunaire. Sous la pression des faits accumulés par les astronomes, philosophes et théologiens abandonnèrent au cours du XVII^e siècle, non sans réticence, les sphères de la cosmologie aristotélicienne. Mais l'origine du mouvement des astres dans le ciel restait un mystère. La réponse allait être donnée par Newton au XVII^e siècle, avec la découverte de la gravitation.

Tycho Brahe reste avant tout le plus grand astronome observateur de son temps. Dans son observatoire

d'Uraniborg, situé dans l'île de Hveen, non loin de Copenhague au Danemark, il observa dès 1576 les positions d'étoiles, de planètes, de la Lune et du Soleil. Il perfectionna de nombreux instruments. Il augmenta leurs dimensions et les gradua précisément tout en améliorant le système de visée. La notion d'erreur personnelle prit une véritable importance, Tycho et ses assistants refaisant la même mesure avec des instruments différents. La précision atteinte dans les observations devint dix fois meilleure que celle obtenue par ses prédécesseurs.

En 1588, Tycho Brahe publia le *De mundi aetheri recentioribus phaenomenis* (*Les Phénomènes les plus récents du monde étheré*), ouvrage consacré aux observations cométaires dans lequel il rejetait le système de Ptolémée – irrecevable notamment parce que le mouvement des planètes par rapport au Soleil était mal expliqué – et de Copernic.

Si le système de Copernic n'était pas tenable, c'était pour des raisons théologiques mais aussi astronomiques et physiques. Selon Brahe, la Terre était inapte au mouvement parce qu'elle était un corps lourd, dense et opaque. Cet argument traditionnel était directement emprunté à Aristote. En outre, si la Terre tournait autour du Soleil, pourquoi n'observait-on pas les étoiles sous différents angles au cours de l'année? Pour prévenir cet argument de poids, que Copernic avait déjà tenté de réfuter, il fallait postuler que les étoiles étaient situées à des distances considérables, *a priori* qui ne pouvait être accordé sans preuve. La difficile question de la distance des étoiles, preuve du mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil, occupa des générations d'astronomes, et s'acheva seulement en 1838 avec la première mesure directe de la distance d'une étoile par Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846).

Tycho Brahe proposait une nouvelle vision du monde dans laquelle la Terre restait immobile tandis que les planètes tournaient autour du Soleil, lui-même tournant en un an autour de la Terre. Ce compromis géohéliocentrique n'était pas un véritable système. Adopté par les Jésuites au XVII^e siècle puis par d'autres auteurs pour des raisons d'ordre philosophique et théologique, il ne survécut pas à la parution des *Principia* de Newton en 1687.

En 1597, Tycho Brahe trouva refuge à Prague, auprès de l'empereur Rodolphe II, qui lui confia la charge de mathématicien impérial. C'est là qu'il rencontra Johannes Kepler (1571-1630), lequel devint l'un des plus grands astronomes de l'histoire. Kepler arriva à Prague en 1600 dans le but d'obtenir les observations de Tycho Brahe. Il y demeura jusqu'en 1601, date de la mort tragique de Brahe qui laissait derrière lui une œuvre largement inachevée. Les observations de Tycho Brahe furent publiées en 1602 par Kepler dans les *Progyrnasmata* (*Exercices préliminaires*) et c'est de cette masse considérable d'observations que sortirent ses découvertes fondamentales.

Johannes Kepler

Lorsqu'il arriva à Prague, Kepler était un copernicien convaincu. En 1596, il avait déjà publié un livre, le *Mysterium cosmographicum* (*Le Secret du monde*), qui lui avait donné une certaine notoriété. Il y proposait les polyèdres réguliers comme archétypes des sphères planétaires. Il s'agissait là d'un problème auquel Kepler attachait toute sa vie une importance considérable: pourquoi le système solaire comporte-t-il six planètes¹ et quel lien existe-t-il entre les dimensions de leurs orbites? Euclide ayant montré qu'il existait cinq polyèdres réguliers – chacun inscriptible dans une sphère et circonscriptible à une autre sphère de même centre –, les cinq intervalles qui existaient entre les six planètes ne pouvaient pas, aux yeux de Kepler, être le fruit du hasard: le Créateur avait agi en géomètre et l'homme était en mesure de découvrir le plan et la perfection du monde créé.

De loin, Kepler soumit ses idées au jugement du grand Tycho Brahe. La réponse lui parvint dans une lettre en 1598. Malgré les éloges, l'astronome danois ruinait l'échafaudage construit par Kepler:

1 Uranus, Neptune et Pluton n'avaient pas encore été découvertes. Jusqu'à la fin du XX^e siècle, le système solaire comptait officiellement neuf planètes, avant que Pluton ne perde ce statut en 2006 pour être rétrogradée au rang de « planète naine ». De nos jours, le système solaire compte huit planètes: Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.

notamment parce que les valeurs utilisées par Kepler, qui dérivait de Copernic, étaient erronées. La solution préconisée par Brahe était évidemment l'adoption de son système et la reprise par Kepler de ses travaux à partir des observations effectuées au terme de longues années de recherches.

Nommé mathématicien impérial après la mort de Tycho Brahe, Kepler s'attela pendant huit ans au difficile problème du calcul de la trajectoire de Mars. À partir des observations accumulées par Tycho Brahe, il se rendit assez vite compte qu'il fallait abandonner l'hypothèse des mouvements circulaires uniformes. Pour résoudre le problème, il choisit quatre positions de la planète et effectua de laborieux calculs entachés d'erreurs qui, par chance, se compensaient. Or deux observations s'écartaient de près de 8 minutes d'arc de la position théorique. Au lieu de les rejeter, Kepler renonça à son hypothèse d'une orbite circulaire.

Il reprit alors son étude de l'orbite de Mars et, en calculant un grand nombre de positions, il obtint un ovale. Ne connaissant pas les propriétés géométriques de cette figure, il passa par l'intermédiaire d'une courbe qu'il connaissait bien : l'ellipse. Il constata alors que toutes les positions de Mars étaient correctement représentées. Il appliqua également l'ellipse à l'orbite terrestre. Il formula alors ce que l'on appelle maintenant sa première loi : les planètes décrivent autour du Soleil des ellipses dont ce dernier occupe l'un des foyers. Kepler publia ses découvertes en 1609 dans *Astronomia nova* (*Astronomie nouvelle*). Il découvrit deux autres lois du mouvement planétaire : les planètes ne tournent pas avec une vitesse uniforme le long de leur orbite (elles vont plus vite quand elles sont près du Soleil) et la période de révolution d'une planète ne dépend que de sa distance au Soleil (plus la planète est éloignée du Soleil, plus elle met de temps pour tourner autour de lui).

Si la chance a favorisé Kepler dans ses recherches, on doit reconnaître en lui un travailleur acharné que de longs calculs ne rebutaient pas et qui était toujours prêt à remettre l'ouvrage sur le métier. On lui doit surtout l'abandon du mouvement circulaire uniforme, principe remontant à l'Antiquité auquel Tycho Brahe accordait encore une valeur absolue. Contrairement à Copernic, il avait aussi un souci constant de vérifier que les hypothèses s'accordaient avec les observations.

L'accueil fait aux lois de Kepler fut mitigé ; Galilée, par exemple, ne se rallia jamais à l'ellipse. C'est la valeur prédictive des tables et des éphémérides képlériennes qui assura leur succès, avant que Newton ne montre que les découvertes de Kepler étaient des conséquences de la loi de la gravitation.

Parallèlement à toutes ces recherches, Kepler publia en 1627 les *Tabulae rudolphinae* (*Tables rodolphines*), aboutissement du long effort qu'il avait entrepris depuis 1600 pour mettre en ordre les résultats de Tycho Brahe. Ces tables, les plus précises jamais parues, bénéficièrent de l'invention récente des logarithmes par John Napier (1550-1617).

Galileo Galilei

Au nombre des coperniciens de poids, Galilée (1564-1642) tient, avec Kepler, une place de premier plan. Professeur à l'université de Pise, il fut projeté sur le devant de la scène en 1610, par la publication d'un petit livre, le *Sidereus nuncius* (*Le Messager céleste*). Il y rendait compte de ses découvertes faites grâce à la lunette qu'il avait pointée vers le ciel : montagnes de la Lune, satellites de Jupiter, phases de Vénus, Voie lactée composée de myriades d'étoiles. En quelques nuits, il porta un coup mortel à deux mille ans de physique aristotélicienne.

La plus importante découverte concernait les satellites de Jupiter. Galilée tenait la preuve que la Terre n'était pas le centre de toutes les révolutions célestes. Non seulement quatre satellites tournaient autour de Jupiter, mais ils étaient entraînés avec la planète dans son déplacement apparent.

Le *Sidereus* souleva rapidement des critiques. Les détracteurs de Galilée accusaient la lunette d'être un instrument trompeur et Galilée d'être un imposteur. En outre, Galilée était plus physicien qu'astronome, mais ses découvertes sapèrent les fondements de la cosmologie ancienne et les idées coperniciennes commençaient à inquiéter certains théologiens.

En 1632, après de multiples démêlés, Galilée obtint l'*imprimatur* pour son *Dialogue sur les deux grands*

systèmes du monde. Il y faisait discuter trois personnages fictifs : Salviati, penseur brillant, qui représentait Galilée; Sagredo, qui figurait l'honnête homme feignant la neutralité; et Simplicio, défenseur de la doctrine aristotélicienne. Le *Dialogue*, écrit non en latin, la langue savante, mais en italien, n'était ni un livre d'astronomie, ni un livre de physique mais une véritable machine de guerre contre l'héritage aristotélicien. Galilée y comparait « deux grands systèmes du monde », celui de Ptolémée et celui de Copernic, avant de montrer que, seul, le système héliocentrique permettait d'expliquer les découvertes effectuées avec sa lunette.

L'ouvrage lui valut d'être convoqué devant l'Inquisition. Le 22 juin 1633, devant la Congrégation du Saint-Office réunie à Rome, alors que son livre était interdit et lui-même condamné à l'incarcération, il abjura, à genoux, ses idées héliocentriques. La rumeur rapporte qu'à l'issue de l'abjuration il aurait cependant ajouté: « Eppur si muove » (Et pourtant, elle tourne). Deux ans plus tard, le *Dialogue* était traduit en latin et diffusé dans toute l'Europe. Retiré dans sa villa d'Arcetri, Galilée rédigea alors son chef-d'œuvre, le *Discours concernant deux sciences nouvelles*, édité à Leyde à 1638.

De Galilée à l'époque contemporaine

En 1687, la publication par Isaac Newton (1643-1727) de ses *Philosophiae naturalis principia mathematica* sonna le glas des idées aristotéliciennes. Dans cet ouvrage, Newton dévoilait sa loi universelle de la gravitation, qui lui permit de démontrer les lois de Kepler et d'expliquer l'origine des marées. L'utilisation que ses successeurs firent de sa théorie fut à l'origine d'une description extrêmement précise du mouvement de la Terre, de la Lune et des planètes du système solaire. Les plus infimes mouvements planétaires rentraient dans le cadre de la théorie.

Le point culminant de la théorie newtonienne fut certainement atteint quand Urbain Le Verrier (1811-1877) s'attaqua au problème des anomalies du mouvement de la planète Uranus. Pour les expliquer, il invoqua, en 1846, l'existence d'une nouvelle planète, dont la gravité perturbait le mouvement d'Uranus, et en calcula l'orbite. Quelque temps plus tard, l'astronome allemand Johann Galle (1812-1910) découvrait la planète Neptune à moins d'un degré de la position prédite par Le Verrier. Rien ne semblait alors capable d'ébranler une théorie porteuse de si magnifiques prédictions. Il restait bien une petite anomalie dans l'orbite de Mercure, mais nul ne doutait que l'on découvrirait un jour la source de ce minuscule écart...

L'origine de cette anomalie fut comprise en 1915, avec la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein (1879-1955), qui permit de construire, dans les années 1920-1930, les premiers modèles cosmologiques, notamment ceux désormais connus sous le nom de « modèles du big-bang ». Cette théorie décrivait également l'action des objets les plus compacts comme les étoiles à neutrons et les trous noirs. Mais il s'agit là d'une autre histoire...

La Terre

La Terre est, en partant du Soleil, la troisième planète du système solaire. Elle en est distante, en moyenne, de 149,6 millions de kilomètres et son diamètre est de 12 756 km. Elle s'est formée il y a 4,56 milliards d'années dans le disque de matière qui entourait le Soleil en gestation, disque dans lequel gaz et poussières se sont agglomérés pour former de petits corps, les planétésimaux, embryons des planètes que nous connaissons aujourd'hui.

Les plus vieilles roches connues ayant environ 3,8 milliards d'années, la surface de la Terre est donc très jeune car constamment modifiée par l'érosion et renouvelée par les processus tectoniques. La Terre est la seule planète du système solaire à la surface de laquelle on trouve de l'eau liquide. C'est d'ailleurs la présence d'eau sous ses trois états (solide, liquide et gazeux) qui a permis à la vie de prospérer.

L'atmosphère de notre planète est constituée majoritairement de diazote (N_2 : 78 %) et de dioxygène (O_2 : 21 %) et comporte des traces d'autres gaz, dont la vapeur d'eau.

La Terre possède un champ magnétique qui la protège des particules de hautes énergies émises par le Soleil. L'interaction de ces particules avec la magnétosphère terrestre provoque les aurores polaires. La Terre a un seul satellite naturel, la Lune, qui orbite à environ 380 000 km.

Le haut et le bas

L'une des questions qui revient fréquemment concernant la Terre résulte de la manipulation d'un globe terrestre : comment les Australiens font-ils pour tenir sur la Terre en ayant la tête en bas ? Il suffit de retourner le globe pour constater que les Australiens doivent se poser la même question : pour eux, c'est nous qui avons la tête en bas ! Mais la question est peut-être mal posée...

Commençons par définir le mot « bas ». Une simple expérience suffit : saisissez-vous d'un objet et lâchez-le. La direction vers laquelle il évolue spontanément s'appelle « le bas » et la direction opposée « le haut ». Sur une planète, le bas est toujours dirigé vers le sol, plus précisément vers le centre de la planète (alors que dans l'espace, en situation d'impesanteur, l'objet reste apparemment immobile : les notions de haut et de bas n'ont pas cours).

Le bas des Australiens irait donc en direction... du haut des Français. Mais d'un point de vue terrestre, le bas est toujours dans la même direction, celle vers laquelle tombent les pierres, c'est-à-dire vers le centre de la Terre. Le paradoxe de la question résulte de ce que nous oublions facilement que nous ne vivons pas sur une surface plane mais sphérique. Cela implique qu'il n'y a pas un seul haut et un seul bas valables pour toute la Terre, mais que ces notions ne sont définies que localement.

Le jour et la nuit

L'alternance du jour et de la nuit résulte du mouvement de rotation de la Terre sur elle-même. La preuve de ce mouvement fut longue à obtenir : il fallut attendre 1851 et la démonstration de Léon Foucault, qui installa un pendule géant sous la voûte du Panthéon. La Terre tourne sur elle-même d'ouest en est, ce qui se traduit par un mouvement apparent du ciel d'est en ouest. Ce mouvement est visible sur les étoiles, qui se lèvent du côté est, montent dans le ciel, culminent en passant au méridien, puis descendent et se couchent à l'ouest. La durée de la « rotation sidérale » de la Terre, rotation comptée par rapport aux étoiles, se mesure en chronométrant la durée séparant deux passages au méridien (dans la direction du sud) d'une étoile ; on trouve environ 23 h 56 min 4 s.

Mais, alors, pourquoi dit-on que la durée du jour est de 24 heures ? Cette question classique en astronomie est fondamentale. La différence vient du choix du repère par rapport auquel on compte la durée de rotation de la Terre. Si l'on tourne sur soi-même, dans une pièce, on choisit automatiquement un repère : une fenêtre, une porte, un cadre... Mesurer la période de rotation revient à mesurer l'intervalle de temps séparant deux passages de cet objet dans la direction du regard. Imaginons maintenant que cette pièce est posée sur un manège qui tourne. Immobile dans la pièce, l'observateur n'a pas l'impression qu'elle tourne puisque les objets gardent la même position par rapport à lui. En revanche, emporté par le mouvement de la pièce, il tourne par rapport à l'extérieur. Autrement dit, la vitesse de rotation n'est pas absolue : elle dépend du cadre auquel on se réfère.

Qu'en est-il de la Terre ? Pour définir la période de rotation de la Terre, il faut choisir un astre et mesurer la durée entre deux passages consécutifs de cet astre dans une même direction du ciel. Quand l'astre choisi est une étoile, la période de rotation de la Terre est de 23 h 56 min 4 s. Mais le choix du Soleil semble inévitable puisque c'est lui dont le mouvement apparent règle l'alternance jour-nuit. La période qui sépare deux passages consécutifs du Soleil dans la direction du sud est égale à 24 heures. En réalité, cette durée n'est pas strictement constante au cours de l'année mais vaut 24 heures *en moyenne*. On peut aussi se demander pourquoi la période de rotation mesurée par rapport aux étoiles n'est pas identique à celle mesurée par rapport au Soleil. Nous reviendrons sur ces deux questions dans le paragraphe ci-dessous consacré au mouvement de la Terre autour du Soleil.

La division du jour en 24 heures date vraisemblablement de l'Égypte antique. Observant le ciel toutes les nuits, les astronomes avaient noté que certaines étoiles sont invisibles pendant une partie de



Les étoiles semblent effectuer un cercle autour de l'étoile polaire. En réalité, c'est la Terre qui tourne sur elle-même.

l'année. On appelle « lever héliaque » d'une étoile le moment où elle redevient visible, en se levant du côté est, un peu avant le Soleil. Par un heureux hasard, le lever héliaque de l'étoile Sirius (la plus brillante du ciel) coïncidait avec le retour des crues du Nil après une période d'invisibilité de 70 jours. Ce lever héliaque marquait ainsi le nouvel an égyptien. D'autres étoiles étaient particulières car leurs levers héliaques étaient séparés de dix jours, ce qui permettait de découper l'année en environ 36 périodes ou décans. Voyant se lever douze étoiles décanales au cours d'une nuit, les Égyptiens la découpèrent en douze périodes et, par symétrie, il en fut de même pour les journées. Ainsi, le jour fut-il divisé en 24 « heures », de durées variables selon la période de l'année. L'adoption d'heures à durée fixe est due aux astronomes arabes du Moyen Âge. Ce n'est qu'au ^{xiv}^e siècle que leur usage se généralisa.

Le mouvement de la Terre autour du Soleil

Le mouvement apparent du Soleil

Le mouvement diurne du Soleil, qui détermine la succession des jours et des nuits, est le plus banal mais aussi le plus important des phénomènes astronomiques. On sait, par expérience, que son lever, son coucher et son passage au méridien (dans la direction du sud) ne se reproduisent pas de façon immuable au cours de l'année, contrairement à ceux des étoiles. Si le mouvement diurne du Soleil n'offre pas la régularité et la simplicité de celui des étoiles, c'est que cet astre est lui-même mobile.

Ce mouvement du Soleil par rapport aux étoiles permet de comprendre pourquoi le jour sidéral (de 23 h 56 min 4 s) et le jour solaire (de 24 heures en moyenne) ne sont pas égaux. Comme nous l'avons vu, ces durées de rotation de la Terre ne sont pas mesurées par rapport au même repère. Le jour sidéral sépare deux passages consécutifs d'une étoile dans une direction fixe (en général, le sud), tandis que le jour solaire sépare deux passages consécutifs du Soleil dans une direction fixe (le sud aussi). Au bout d'un jour sidéral, le Soleil n'est pas revenu dans la direction de départ. Pour qu'il y revienne, la Terre doit encore tourner un peu sur elle-même pour compenser le mouvement apparent du Soleil par rapport aux étoiles. Elle met environ 4 minutes pour faire cette rotation complémentaire. Finalement, la différence entre jour solaire et jour sidéral résulte du fait que la Terre est affectée de deux mouvements qui agissent simultanément : la rotation autour d'elle-même et la révolution autour du Soleil. La « vraie » période de rotation de la Terre est de 23 h 6 min 4 s, la durée de 24 heures étant une combinaison de la vitesse de rotation sur elle-même et de la révolution autour du Soleil.

Qu'entend-on exactement par année ? Comme pour la rotation de la Terre sur elle-même, la définition

du temps que la Terre met pour faire un tour autour du Soleil dépend du choix de l'origine du compte. L'intervalle de temps moyen qui sépare deux équinoxes de printemps porte le nom d'« année tropique ». Sa valeur moyenne est de 365,2422 jours (soit 365 jours 5 h 48 min 46 s).

Durée de la journée, culmination du Soleil et origine des saisons

Dès l'Antiquité, les astronomes ont reconnu que le mouvement annuel apparent du Soleil est régi par trois lois :

- en une année (tropique), le Soleil décrit un grand cercle sur la sphère céleste ;
- son mouvement annuel apparent se fait d'ouest en est, en sens opposé du mouvement diurne ;
- la vitesse de ce mouvement n'est pas uniforme.

Les astronomes ont appelé « écliptique » le grand cercle décrit par le Soleil. Le mouvement du Soleil sur l'écliptique permet de comprendre les variations annuelles de la hauteur de culmination du Soleil et de la durée de la journée : sous nos latitudes, on constate aisément que le Soleil culmine plus haut et que les journées sont plus longues en été qu'en hiver.

Dans la vision héliocentrique (avec le Soleil au centre de l'Univers), l'écliptique n'est autre que l'orbite que la Terre décrit autour du Soleil. Le plan de l'écliptique est incliné par rapport au plan de l'équateur d'un angle à peu près égal à $23^{\circ}26'$ qui se nomme « obliquité de l'écliptique » et qui correspond à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique.

Un observateur terrestre se réfère plus volontiers au plan de l'horizon pour compter les angles et l'on aimerait savoir comment connaître la hauteur de culmination du Soleil, quand il passe dans la direction du sud. Elle dépend du lieu d'observation et de la période de l'année. En tous lieux de l'hémisphère Nord, le Soleil culmine plus haut en été qu'en hiver. Ces variations de hauteur de culmination du Soleil au cours de l'année résultent du mouvement annuel de la Terre autour du Soleil et de l'inclinaison de son axe de rotation par rapport au plan de son orbite. C'est ce qui est à l'origine des saisons.

On comprend aisément que, si le Soleil culmine plus haut, il parcourt entre son lever et son coucher un arc plus grand au-dessus de l'horizon : les journées les plus longues correspondent aux culminations les plus élevées.

Le jour des équinoxes, le « terminateur », c'est-à-dire le cercle séparant la partie de la Terre plongée dans la nuit de celle en plein jour, passe par les deux pôles terrestres. À ce moment, la durée de la journée est égale à la durée de la nuit pour tous les lieux de la surface terrestre. En outre, aux équinoxes, le Soleil se lève exactement à l'est et se couche exactement à l'ouest.

Le jour du solstice d'hiver, la demi-sphère définie par le terminateur recouvre une grande partie de la surface de l'hémisphère Nord. C'est le jour de l'année pendant lequel la durée de la nuit est maximale et celle de la journée minimale pour l'hémisphère Nord. C'est également le jour où le Soleil se lève le plus au sud-est, culmine au méridien avec une hauteur minimale et se couche le plus au sud-ouest.

Le jour du solstice d'été, la demi-sphère définie par le terminateur recouvre une petite partie de la surface de l'hémisphère Nord. C'est le jour de l'année où la durée de la nuit est minimale et celle de la journée maximale pour l'hémisphère Nord. C'est également le jour où le Soleil se lève le plus au nord-est, culmine au méridien avec une hauteur maximale et se couche le plus au nord-ouest.

Sous nos latitudes, les variations de la durée de la journée et de la culmination du Soleil se conjuguent pour modifier sensiblement les conditions climatiques qui marquent le rythme des saisons.

La durée des saisons

Les saisons ont chacune une durée voisine de trois mois, mais il suffit de consulter un calendrier pour vérifier que les périodes ne sont pas d'égales longueurs. Par exemple, durant l'année 1998, l'hiver a duré 89 jours, le printemps 92 jours et 18 heures, l'été 93 jours et 15 heures et l'automne 89 jours et 21 heures. Ces différences de longueurs des saisons résultent du fait que la vitesse de la Terre autour du Soleil n'est pas uniforme, parce que son orbite n'est pas parfaitement circulaire. Notons bien que

ce ne sont pas les variations de distance Terre-Soleil qui expliquent les saisons puisque c'est en hiver que la Terre est la plus proche du Soleil!

Pour clore cette partie, intéressons-nous à une curiosité qui n'aura pas échappé aux observateurs les plus attentifs. Sur un calendrier indiquant les heures de lever et de coucher du Soleil, on constate que le Soleil se couche plus tard à partir de mi-décembre et ne se lève un peu plus tôt qu'à partir de début janvier. Plus précisément, on remarque que le coucher le plus précoce a lieu vers le 13 décembre, tandis que le lever le plus tardif a lieu vers le 2 janvier. Un phénomène analogue, mais moins marqué, s'observe aussi au solstice d'été, le 21 juin. Ainsi, le solstice d'hiver, qui tombe autour du 21 décembre, est bien le jour durant lequel la journée est la plus courte de l'année, mais ce n'est pas à cette date que le Soleil se lève le plus tard et se couche le plus tôt!

Cette « anomalie » des heures de lever et de coucher du Soleil est due à l'adoption, depuis le ^{XIX}^e siècle, du temps solaire moyen. Si nous vivions à l'heure solaire vraie, telle qu'elle est donnée par les cadrans solaires, le jour du solstice d'hiver serait bien le jour où le Soleil se lève le plus tard et se couche le plus tôt. Mais l'échelle de temps définie par le mouvement du Soleil vrai, celui que l'on observe dans le ciel, n'est pas uniforme. Nous avons déjà vu que le jour solaire diffère du jour sidéral d'environ 4 minutes. C'est le temps qu'il faut à la rotation de la Terre pour rattraper le mouvement apparent du Soleil d'un jour sur l'autre. Ce supplément n'est pas rigoureusement constant au cours de l'année.

Pour éviter d'avoir une échelle de temps de 24 heures dont la durée des heures dépend de la période de l'année, les astronomes fondent la définition de l'heure sur le mouvement d'un Soleil fictif, le « Soleil moyen », qui parcourt l'équateur uniformément. Ils nomment « équation du temps » la correction à apporter entre midi solaire vrai (instant de la culmination du Soleil vrai) et midi solaire moyen (instant de la culmination du Soleil moyen, qui fixe l'heure officielle). Cette équation du temps est responsable de l'anomalie constatée car le midi de nos montres, fondé sur le Soleil moyen, ne coïncide pas avec le midi solaire vrai.

La Lune

La Lune est l'unique satellite naturel de la Terre. Sa formation serait due à la collision entre la Terre primordiale et un astéroïde de très grande taille (environ huit fois plus massif que la Lune actuelle). Une partie des couches externes de la Terre et de l'astéroïde a été éjectée et les débris se sont rassemblés pour former la Lune, le reste formant la Terre définitive.

La Lune ne possédant ni eau ni atmosphère, l'érosion y est quasiment inexistante et les écarts de température sont considérables: 127 °C le jour et -173 °C la nuit.

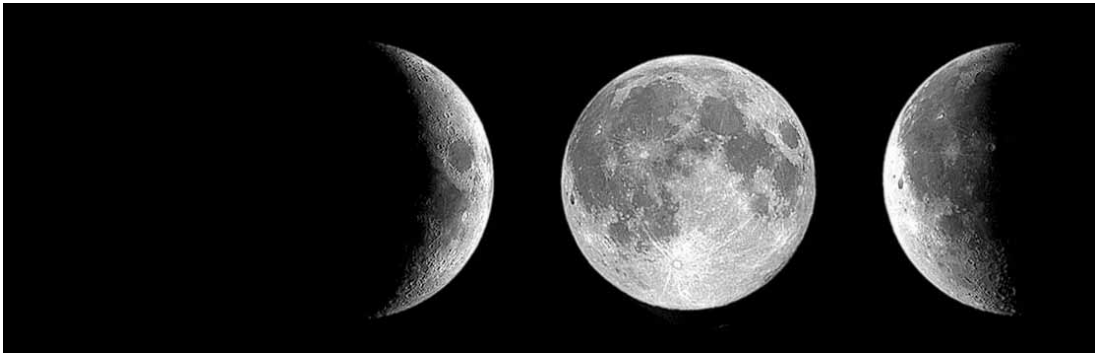
Elle possède de vastes plaines – que Galilée nomma « mers » car il pensait, à tort, qu'elles étaient recouvertes d'eau – et des cratères, ou cirques, de tailles variables et résultant d'impacts météoritiques.

Avec un diamètre de 3476 km, la Lune est 81 fois moins massive que la Terre et sa gravité de surface est six fois moins importante. Autrement dit, un humain de 60 kg aurait l'impression d'avoir une masse de 10 kg à la surface de la Lune.

La Lune tourne autour de la Terre en 27,3 jours dans un mouvement d'ouest en est, à une distance moyenne de 380 000 km. Comme elle tourne sur elle-même en 27,2 jours, période très proche de sa période de révolution, elle nous montre toujours la même face. Cette coïncidence résulte de l'action des forces de marées de la Terre sur la Lune.

Les phases de la Lune

La Lune est lumineuse parce qu'elle est éclairée par le Soleil dont elle renvoie une partie de la lumière. On peut ainsi la voir de nuit, mais aussi en plein jour, car sa brillance de surface est généralement supérieure à celle du ciel diurne. En revanche, les étoiles et les planètes ne sont pas assez brillantes pour être vues en plein jour.



Nouvelle Lune

Premier quartier

Pleine Lune

Dernier quartier

Au cours de sa révolution, on ne voit pas, depuis la Terre, la partie éclairée de la Lune sous un même angle, ce qui explique les phases de la Lune. On distingue quatre positions particulières :

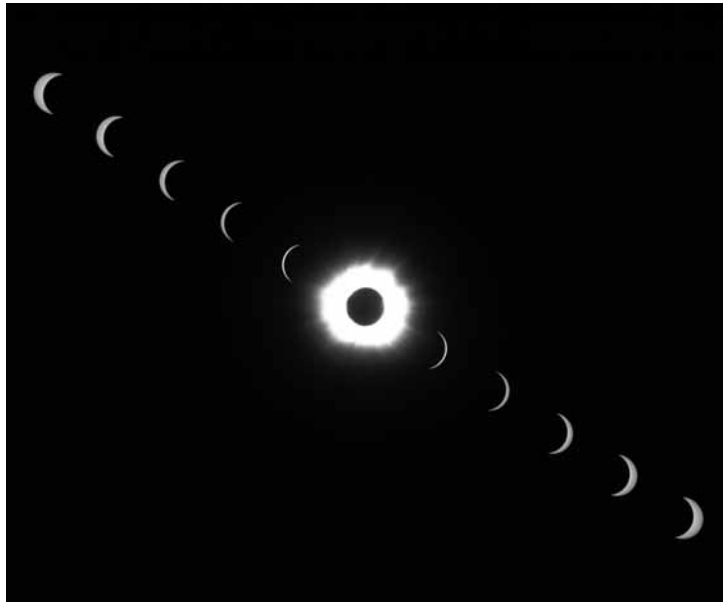
- lorsque la Lune est dans la même direction que le Soleil, la face qu'elle nous présente est dans l'obscurité : c'est la nouvelle Lune (on ne la voit pas) ; elle se lève et se couche presque en même temps que le Soleil ; la nouvelle Lune n'est donc levée que le jour ;
- quand la direction de la Lune est diamétralement opposée à celle du Soleil, la face qu'elle nous présente est éclairée : c'est la pleine Lune ; elle se trouve à l'opposé du Soleil, donc se lève lorsqu'il se couche et se couche lorsqu'il se lève ; la pleine Lune n'est donc levée que la nuit ;
- les phases comprises entre la nouvelle Lune et la pleine Lune s'appellent phases croissantes ; lorsque la Lune est à 90° à l'est du Soleil, seule une moitié de la face lunaire éclairée est visible depuis la Terre : c'est le premier quartier de Lune ; entre la nouvelle Lune et le quartier de Lune, la phase lunaire a l'aspect d'un croissant ; entre le quartier et la pleine Lune, la Lune a une forme bossue qualifiée de « gibbeuse » ;
- les phases comprises entre la pleine Lune et la nouvelle Lune sont dites décroissantes ; lorsque la Lune est à 90° à l'ouest du Soleil, on aperçoit l'autre moitié du disque lunaire éclairé, c'est le dernier quartier de Lune.

Les aspects du premier et du dernier quartier de Lune sont inversés selon que l'on se trouve dans l'hémisphère Nord ou dans l'hémisphère Sud.

La lunaison moyenne est l'intervalle de temps qui s'écoule en moyenne entre deux mêmes phases. Cette durée résulte de la combinaison de deux mouvements : celui de la Lune autour de la Terre et celui de la Terre autour du Soleil. Le mois lunaire dure donc 29 jours 12 h 44 min 3 s.

Les éclipses

Il y a éclipse de Soleil lorsque la Lune passe devant le Soleil et éclipse de Lune lorsque la Lune passe dans l'ombre de la Terre. Les éclipses de Soleil ont donc toujours lieu au voisinage de la nouvelle Lune et les éclipses de Lune ont toujours lieu au voisinage de la pleine Lune (puisque



c'est à ce moment que la Lune se trouve du côté opposé du Soleil). Si l'orbite de la Lune était dans le plan de l'écliptique, il y aurait des éclipses de Soleil à chaque nouvelle Lune et des éclipses de Lune à chaque pleine Lune; ce n'est pas le cas car l'orbite de la Lune est inclinée par rapport à l'écliptique.

Les éclipses de Soleil nous offrent un spectacle grandiose durant lequel la Lune vient cacher le disque solaire, révélant ainsi la couronne solaire qui, en toute autre circonstance, nous est invisible car beaucoup moins brillante que le Soleil lui-même. Ce spectacle résulte d'une coïncidence: le diamètre de la Lune est environ 400 fois plus petit que celui du Soleil... mais la Lune est également 400 fois plus proche de la Terre. Vus de la Terre, la Lune et le Soleil semblent donc avoir la même taille.

Pourquoi la Lune ne tombe-t-elle pas sur la Terre ?

Excellente question que se posent très souvent les enfants. Newton fut le premier à présenter une théorie utilisable des mouvements planétaires en expliquant qu'il devait exister une force agissant à distance entre n'importe quels corps matériels. Tous les corps de l'Univers sont soumis à cette attraction de la matière pour la matière: c'est cette force qui « colle » nos pieds à la surface de la Terre. Dans la fameuse parabole de la pomme, Newton comprit que, comme une pomme détachée d'un pommier, la Lune tombe sur la Terre (et réciproquement d'ailleurs)! Si elle ne l'atteint jamais, c'est parce qu'elle est animée d'une vitesse suffisamment grande pour perpétuellement « rater » la Terre malgré sa chute.

Le Soleil

Pour les Grecs de l'Antiquité, Hélios, le Soleil, parcourait le ciel dans son char de feu, prodiguant lumière et énergie aux mortels. Au XIX^e siècle, les physiciens pensaient que le Soleil était une sphère de matière chaude qui se refroidissait. Ils en déduisaient que le Soleil n'était pas âgé de plus de quelques dizaines de millions d'années, durée largement suffisante, pensaient-ils, pour que la vie puisse se développer. Mais devant les premières datations de fossiles montrant la très grande ancienneté de la Terre, estimée à deux milliards d'années au début du XX^e siècle, il fallut se résoudre à reconsidérer le problème. Cette « crise de l'âge » n'a été résolue qu'avec les outils de la physique nucléaire alors naissante. Après s'être longtemps demandé ce qu'était le Soleil et pourquoi il brillait si intensément, les scientifiques ont pu répondre à la question plus délicate de savoir pourquoi il brillait depuis si longtemps. Et les conséquences ont été étonnantes.

Entre l'envol et la chute

Qu'est-ce qu'une étoile? La réponse semble aisée: une étoile est une énorme boule de gaz chaud. Notre Soleil, avec ses 696 000 km de rayon (109 fois le rayon de la Terre!), sa masse 330 000 fois plus importante que celle de la Terre et sa température de surface égale à 6 000 °C, semble satisfaire cette définition. Et le Soleil n'est pas une étoile vraiment grosse: le rayon de Bételgeuse, dans la constellation d'Orion, est 1 100 fois supérieur à celui du Soleil...

La cohésion d'une étoile résulte de la force de gravitation qui rapproche le plus possible les particules qui la constituent et lui donne sa forme sphérique. Mais si la gravitation tend à rapprocher les particules, pourquoi l'étoile ne s'effondre-t-elle pas sur elle-même? C'est à cause de la pression du gaz stellaire, qui équilibre l'action de la gravité en tout point de l'étoile.

Un équilibre miné par le rayonnement

Nous savons tous qu'un gaz comprimé s'échauffe: il suffit de le constater à l'extrémité d'une pompe à vélo après avoir gonflé énergiquement une chambre à air. Le gaz stellaire, comprimé par la gravitation, s'échauffe donc et laisse échapper ce flux d'énergie sous forme de rayonnement: l'étoile brille.

Cependant, l'énergie rayonnée doit bien être prélevée quelque part... La première possibilité raisonnable, qui fut proposée par lord Kelvin au XIX^e siècle, consiste à imputer cette énergie au capital d'énergie potentielle gravitationnelle. L'étoile se contracte juste ce qu'il faut pour produire l'énergie qui va compenser l'hémorragie lumineuse. Évidemment, ce petit jeu ne peut durer indéfiniment puisque le « compte en banque » gravitationnel ne contient qu'une quantité finie d'énergie. Ce modèle accorde au Soleil une durée de vie d'environ trente millions d'années, insuffisante pour les géologues, qui nous apprennent aujourd'hui que l'âge de la Terre, donc du Soleil, est de 4,6 milliards d'années. Du coup, la question n'est plus de savoir pourquoi le Soleil brille, mais comment il a pu briller si longtemps.

De quelle loi je me chauffe

La réponse à cette question fut apportée en 1921 par le physicien français Jean Perrin, qui proposa une source alternative de production d'énergie : les réactions nucléaires. Cette idée fut développée et quantifiée quelques années plus tard par le physicien allemand Hans Bethe, qui décrit explicitement les réactions nucléaires qui devaient se produire au cœur du Soleil. Il démontra que, pendant la majeure partie de sa vie, l'étoile s'accommode de sa constante déperdition d'énergie en puisant dans ses réserves d'énergie nucléaire. Dans les régions centrales de l'étoile, les plus denses et les plus chaudes, des réactions de fusion libèrent de l'énergie qui compense celle qui s'échappe par la surface sous forme de rayonnement. Ces réactions ne se déclenchent que si la température et la densité sont suffisamment élevées, ce qui limite leur champ d'action aux régions les plus centrales de l'étoile. Il faut aussi que l'étoile soit suffisamment massive (plus grosse qu'un dixième de masse solaire) pour comprimer suffisamment le cœur et amorcer les réactions nucléaires. Au centre du Soleil, à chaque seconde, 620 millions de tonnes d'hydrogène sont, par fusion nucléaire, transformées en 615,7 millions de tonnes d'hélium, la différence de masse étant convertie en énergie ($E = mc^2$) rayonnée vers l'extérieur. La réserve d'énergie nucléaire étant nettement plus grande que celle liée à la gravitation, le Soleil a une durée de vie estimée à dix milliards d'années.

Quand l'hydrogène vient à manquer au centre de l'étoile, d'autres réactions prennent le relais, qui brûlent les produits des précédentes : l'hélium devient alors carbone et oxygène, qui se transformeront à leur tour en néon, et ainsi de suite. Le nombre de cycles nucléaires et la répartition des noyaux formés dépendent essentiellement de la masse de l'étoile. Les plus légères, comme notre Soleil, s'arrêteront à la formation du carbone. Les plus massives pourront atteindre la formation du fer avant que leur cœur n'implose. Pour nos yeux, ce phénomène prend la forme d'une supernova, titanesque explosion au cours de laquelle les noyaux formés tout au long de la vie de l'étoile ensemencent le milieu interstellaire. Les noyaux rencontrés sur Terre sont quasiment tous issus de la nucléosynthèse stellaire, et plus particulièrement celle des étoiles massives. Ce fait stupéfiant a fait dire, à juste titre, que nous sommes tous constitués de poussières d'étoiles.

L'avenir du Soleil et de la Terre

Grâce aux simulations numériques sur ordinateur, il est possible de décrire avec quelques détails les prochains milliards d'années de notre étoile. Cela nous permet de nous livrer à un petit exercice de fiction scientifique. D'abord, rassurons-nous, le Soleil est trop peu massif pour exploser en supernova. Le futur de la Terre n'en sera pas rose pour autant...

Dans trois milliards d'années, la luminosité du Soleil augmentera d'environ 30 % et la Terre recevra de sa part autant d'énergie que Vénus en reçoit aujourd'hui. Il est à craindre que l'échauffement qui en résultera ne cause les mêmes effets que sur Vénus : un effet de serre divergent. L'eau des océans s'évaporerait sous l'effet de la chaleur, chargeant l'atmosphère de vapeur d'eau, opaque à la lumière infrarouge. Le rayonnement émis par le sol aura donc plus de difficulté à s'échapper dans l'espace, ce qui augmentera d'autant la température atmosphérique et accélérera l'évaporation. Petit à petit, les nuages de vapeur se dissiperont sous l'impact des rayons solaires qui briseront les molécules d'eau, et les autres. Les éléments les plus légers, comme l'hydrogène, s'échapperont dans l'espace pendant que les plus lourds, comme l'oxygène, seront absorbés par les roches. Au bout de quelques millions

d'années, la Terre montrera son nouveau visage: celui d'un monde désertique dans le ciel duquel brillera un implacable Soleil orangé dont la taille apparente aura presque triplé.

Pourquoi tout tourne-t-il dans l'Univers ?

Tout tourne dans l'Univers ! Les planètes tournent sur elles-mêmes et autour du Soleil. On sait, depuis Galilée, que le Soleil tourne aussi ! Ses observations des taches présentes à la surface du Soleil lui ont permis de mettre en évidence la rotation du Soleil : elles disparaissaient à un bord pour réapparaître quasiment identiques sur le bord opposé quelques jours plus tard. Comme le Soleil est une sphère de gaz chaud, sa rotation ne se fait pas « en masse », comme celle d'une planète. Son équateur tourne en 25 jours, un peu plus rapidement que les pôles qui effectuent un tour complet en un peu plus de 30 jours.

Le système solaire dans son ensemble tourne autour du centre de la Galaxie à la vitesse moyenne de 250 km par seconde (soit 900 000 km/h !). Il nous faut près de 250 millions d'années pour effectuer un tour complet de la Galaxie. Comme pour le Soleil, la rotation ne se fait pas d'un seul bloc : la période de rotation dépend de la distance par rapport au centre galactique. Notre système solaire est situé à la périphérie d'un des bras spiraux, à 28 000 années-lumière du centre.

L'origine de la rotation dans l'Univers est une question délicate pour laquelle on ne peut pas donner de réponse simple. Dans un modèle (simplifié) d'univers homogène et isotrope, il n'y a aucune raison pour que la matière se mette « spontanément » en rotation, seuls les mouvements d'expansion ou de contraction étant possibles. Mais de faibles perturbations initiales font apparaître la rotation qui, ensuite, tend à se conserver. Ainsi, le nuage de gaz qui se contracte pour former des étoiles tourne sur lui-même. Cela impose une rotation aux étoiles formées ainsi qu'aux planètes dont elles sont entourées, qui tournent sur elles-mêmes et autour de leurs étoiles.

Auteurs

David WILGENBUS, Gilles CAPPE, Nathan DESDOUITS, Hélène GAILLARD, Roland LEHOUCQ

Cette ressource a été produite avec le soutien des éditions Le Pommier

Date de publication

2009

Licence

Ce document a été publié par la Fondation *La main à la pâte* sous la licence Creative Commons suivante : Attribution + Pas d'Utilisation Commerciale + Partage dans les mêmes conditions.



Le titulaire des droits autorise l'exploitation de l'œuvre originale à des fins non commerciales, ainsi que la création d'œuvres dérivées, à condition qu'elles soient distribuées sous une licence identique à celle qui régit l'œuvre originale.

Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes

75 006 Paris

01 85 08 71 79

contact@fondation-lamap.org

Site : www.fondation-lamap.org

