

L'EVOLUTION DE NOS CONCEPTIONS DU COSMOS¹⁾

G. Fischer, Rue de Rugin 1A,
CH-2034 Peseux, *gfischer@vtx.ch*

1. Les premiers pas

En Mésopotamie et dans l'Égypte ancienne, autour du milieu du troisième millénaire avant Jésus-Christ (av. J.-C.), toutes les notions du monde étaient toujours couplées à des concepts de créations divines. Les plus anciens documents babyloniens représentent la Terre comme un disque plat flottant sur la mer, avec Babylone en son centre. Pour le ciel on imaginait une sorte d'éther transparent mais cristallisé, où les astres se trouvaient aux sommets de cristaux imperceptibles.

Les idées commencent à évoluer un peu avant le milieu du dernier millénaire et l'on note en particulier le fait remarquable que Thalès (640-548 av. J.-C.) réussit pour la première fois à prédire une éclipse de Soleil (585 av. J.-C.) et son affirmation que la Lune est éclairée par le Soleil. Au cours de ce même sixième siècle avant J.-C., les Pythagoréens avançaient l'idée que les planètes sont d'essence divine et éternelle, avec pour conséquence que leurs mouvements ne pouvaient être que circulaires et uniformes. Un siècle plus tard Platon (428-348 av. J.-C.) inversa cet argument : on observe que le mouvement des planètes est circulaire et uniforme, cela signifie que ces astres sont gouvernés par une puissance divine.

2. Les philosophes grecs

Nous ne pouvons pas commencer ce chapitre sans mentionner les théories atomistiques de Leucippe (≈460-≈370 av. J.-C.), reprises et amplifiées par Démocrite (≈460-≈370 av. J.-C.) et surtout par Epicure (341-270 av. J.-C.). En simplifiant un peu, les arguments d'Epicure sont les suivants : "Nous observons qu'il y a des corps simples et des corps manifestement composés. On ne peut pas diviser indéfiniment ces corps au-delà d'une certaine dimension ultime, certes très petite, mais tout de même finie, sinon à la fin on n'aurait plus rien, et la réalité, telle que nous la percevons, ne pourrait pas être reconstruite. Dans le cas des corps simples cette limite est **l'atome**. D'autre part, on ne peut imaginer de limites à l'espace, qui s'étend à l'infini dans toutes les directions, sinon il faudrait imaginer des parois arbitraires. Ainsi l'Univers s'étend à l'infini et il y a donc une infinité d'atomes, **mais aussi une infinité de mondes semblables au notre !**" Comme on le voit, Epicure n'envisageait qu'un espace euclidien; il n'imaginait pas la possibilité d'un espace tri-dimensionnel courbe et limité, semblable à l'espace "bi-dimensionnel" de la surface d'une sphère, d'extension finie, bien que sans frontières. Puisque son Univers s'étendait à l'infini dans toutes les directions, ses conclusions qu'il y a une infinité d'atomes et donc probablement aussi une infinité d'autres mondes, sont tout à fait logiques. Bien que basées uniquement sur un raisonnement philosophique, de telles affirmations, prononcées quelque trois cents ans déjà avant notre ère, auraient pu constituer le fondement de rapides développements ultérieurs. Ce ne fut malheureusement pas le cas.

1) Cet article fait suite à une série de conférences données à l'Université du Troisième Âge à Neuchâtel, La Chaux-de-Fonds et Fleurier, pour lesquelles l'auteur s'est largement inspiré d'un superbe texte de Sir Bernard Lovell, : "Emerging Cosmology" [1].

Malgré ces amorces de progrès, on peut dire que jusqu'à la révolution copernicienne les conceptions de l'Univers, pour le moins celles acceptées et permises par l'Église, étaient celles d'Aristote (384-322 av. J.-C.) : la Terre est une sphère, à la surface de laquelle tout objet pesant tombe verticalement sur le sol. Le centre de la Terre est donc aussi le centre de l'Univers. En ce qui concerne les éléments, l'argument d'Aristote est que le matériau de la Terre est froid et par conséquent cherche à descendre. Ce mouvement est compensé par le feu qui est chaud et cherche à monter. Terre et eau se dirigent donc vers le bas, le feu et l'air vers le haut. Pour décrire ce qui se passe dans le ciel, Aristote a besoin de ce qu'on pourrait considérer comme un cinquième élément et il propose "l'éther". Cet élément parfait et éternel trace dans le ciel un mouvement rotatoire avec la perfection du cercle, qui reste la figure géométrique idéale, sans commencement ni fin, et qui est d'essence divine. Son Univers embrasse la totalité de ce qui existe; il s'étend jusqu'à la voûte céleste, au-delà de laquelle se trouve le domaine de Dieu, selon la conception qu'Aristote en avait. C'est Dieu qui met la voûte céleste en rotation et cette rotation se transmet alors aux orbites plus internes des planètes, du Soleil et de la Lune. Son Univers accessible s'étend donc jusqu'à la voûte céleste; au-delà il n'y a plus rien que nous puissions atteindre, que nous puissions concevoir, *même pas de l'espace vide* ! Cette façon d'envisager l'Univers est, d'un point de vue philosophique, assez moderne; en effet, lorsqu'on imagine quelque chose de fini, délimité par une frontière, on admet aussi l'existence d'un "au-delà" de cette limite. Dans une certaine mesure les conceptions cosmologiques contemporaines reprendront cette idée de frontières *sans* "au-delà".

Grâce à cette Terre sphérique Aristote peut expliquer pourquoi l'aspect du ciel étoilé ainsi que le climat dépendent de la latitude géographique. Pour le pourtour de la sphère il cite une valeur de 400 000 stadias grecs (environ 72 800 km; cette valeur est incertaine, car le stadia grec variait selon les régions) calculée par "les mathématiciens" (il ne les nomme pas, mais on admet aujourd'hui qu'il s'agit d'Eudoxos, ≈406-≈355 av. J.-C.).

Aristote divisait l'Univers en deux parties : ce qui est à l'intérieur de l'orbe de la Lune est transitoire, imparfait; à l'extérieur, où se trouvaient les planètes et les étoiles, on était dans le domaine parfait et immuable de son "éther". Bien évidemment, les comètes allaient devenir un problème, lorsqu'on reconnut qu'elles étaient manifestement au-delà de l'orbe de la Lune.

Dans l'ensemble ces conceptions constituaient pourtant une grave rétrogression du point de vue atteint par ses prédécesseurs, en particulier Epicure, qui admettaient que le Ciel et la Terre sont composés des mêmes éléments, susceptibles d'évolution et de dégradation.

Quelques contemporains d'Aristote, à peine plus jeunes que lui, avancèrent aussi des concepts plus modernes, mais leurs idées ne réussirent pas à s'imposer. Ainsi Héraclide du Pont (≈ 388-≈310/315 av. J.-C.) suggéra que les mouvements apparents de Mercure et Vénus pouvaient être décrits avec grande précision si on admettait que ces planètes sont en révolution autour du Soleil et non pas de la Terre. Il formula aussi l'idée que le mouvement des étoiles pouvait se comprendre très simplement si on acceptait que la Terre tourne autour d'un axe. Personne avant lui n'avait proposé une telle rotation de notre planète pour expliquer le mouvement journalier apparent des étoiles, et cela constituait un progrès énorme en astronomie.

S'il est vrai que depuis l'antiquité grecque les milieux érudits acceptaient en général que la Terre est ronde et que la Lune, le Soleil et les planètes sont des corps en orbite, soit autour de la Terre, soit autour du Soleil, on sait que jusqu'à la fin du Moyen-Âge la vision populaire était encore celle d'une Terre plate, qui aurait quelque part au loin un bord abrupt, d'où l'on plongerait dans un abîme insondable. Cette idée était d'ailleurs déjà répandue bien avant notre ère (voir p. ex. la Fig. 1).

Pour bien comprendre les difficultés à concevoir un Univers plus réaliste, c.-à-d. plus conforme à nos vues d'aujourd'hui, il faut se rendre compte que sans outils nos notions d'espace et de temps sont dominées par ce qui nous est directement accessible, par ce que nous pouvons percevoir avec nos sens, sans l'aide d'un instrument. Un jour de marche peut déjà représenter une grande distance et la durée d'une vie une longue période de temps. Ainsi, même en sachant que la Terre est ronde, on a de la peine à voir sa courbure avec les yeux lorsqu'on contemple un de nos lacs, ou lorsqu'on regarde un bateau s'éloigner d'une côte de mer.

Quelquefois pourtant, lorsqu'on admire la Lune, on a l'impression qu'il s'agit d'un astre en forme de boule, plutôt que d'un trou dans une voûte céleste et qui change de forme tous les jours. Par exemple, si l'on regarde une Nouvelle Lune peu après le coucher du Soleil, on voit très bien la totalité de l'astre, car sa partie sombre est alors éclairée par la lumière solaire réfléchiée par la Terre; c'est le phénomène du "clair de Terre", illustré par la Fig. 2.

Revenons aux philosophes de la Grèce antique, à ceux qui étaient acquis à l'idée que la Terre est un astre comme la Lune et le Soleil. Nous avons vu qu'ils ne s'accordaient pas sur ce qui constitue le centre de l'Univers. Cela est bien compréhensible, car si la Terre était en rotation autour d'un Soleil central fixe, on aurait dû voir les étoiles se déplacer au cours de l'année, phénomène qu'on appelle "parallaxe des étoiles". En effet, on pensait que les étoiles étaient des trous dans une voûte céleste qu'on n'imaginait pas très éloignée. Même aujourd'hui avec de bons télescopes on ne voit un effet de parallaxe que pour les étoiles les plus proches du Soleil.

Après Aristote la prééminence intellectuelle d'Athènes s'estompe et une fois encore des notions cosmologiques plus avancées font leur apparition. Cette époque voit Eratosthène (276-196 av. J.-C.) fonder l'Observatoire et l'École d'Astronomie d'Alexandrie. Il est convaincu que la Terre est sphérique. Il calcule ses dimensions à 1 ou 2% près, en déterminant la variation de l'angle sous lequel on voit le Soleil depuis Assouan et Alexandrie et en utilisant la distance entre ces deux villes, mesurée depuis longtemps par les arpenteurs de l'Égypte.

Par une méthode remarquablement astucieuse, selon la Fig. 3, Aristarque de Samos (≈310-≈230 av. J.-C.) détermine les dimensions et distances relatives de Terre, Soleil et Lune, et avec le rayon terrestre d'Eratosthène, leurs valeurs absolues. Son Soleil étant 6,75 fois plus grand que la Terre il se voit obligé de proposer un système héliocentrique général.

Hipparque (190-120 av. J.-C.) construit un observatoire à Rhodes. C'est un excellent observateur qui améliore les résultats d'Aristarque. En utilisant ceux d'Eratosthène d'Alexandrie il découvre la précession des équinoxes, même si à cette époque on ne pouvait en expliquer la* cause; il détermine la longueur du mois lunaire et la valeur qu'il en donne est correcte à la seconde près; finalement il établit un catalogue de 850 étoiles, le premier Almageste. Son renom d'astronome est immense. En se fondant sur l'absence de parallaxe des étoiles il répudie le système héliocentrique

d'Aristarque. Son autorité est telle que ses idées s'imposent et c'est en définitive à cause de lui que le système héliocentrique devra attendre Copernic (1473-1543) pour ressusciter.

3. Le système de Ptolémée

Ptolémée (II^{ème} siècle après J.-C.), savant grec né en Egypte, est un théoricien de l'astronomie qui surpassa tous ses prédécesseurs par le raffinement du système géocentrique qu'il imagina pour expliquer les observations. Son système fonctionnait mieux que tous ceux proposés auparavant, tout en respectant l'idée admise que le cercle est sacro-saint, la figure géométrique divine et parfaite. Les orbites de tous les astres, en particulier celles des planètes, devaient donc pouvoir s'expliquer au moyen de cercles et uniquement de cercles, selon des schémas comme celui de la Fig. 4. Aujourd'hui on le soupçonne même d'avoir falsifié certaines données d'observation afin d'obtenir un meilleur accord avec ses constructions géométriques. Sa plus grande oeuvre, le catalogue de l'*Almageste* (arabe pour *la grande oeuvre* ou *la grande syntaxe*), sera l'ouvrage astronomique de référence jusqu'à l'arrivée de Tycho Brahé.

On peut dire que rien de nouveau n'apparut pendant plus de 13 siècles, si ce n'est que Thomas d'Aquin (1225-1274), en reformulant de façon cohérente et convaincante les fondements des dogmes de la religion et de la science, fortifia un édifice de croyances qui commençait à vaciller sous les critiques, surtout celles de l'École de Paris aux XII^{ème} et XIII^{ème} siècles.

4. La révolution copernicienne, Tycho Brahé, Johannes Képler

Copernic (1473-1543) réanime enfin l'héliocentrisme, mais il publie ses idées avec beaucoup de retenue, aidé encore en cela par un éditeur craintif, le théologien luthérien Osiander (il est bon de rappeler ici qu'aux débuts de la Réforme les luthériens sont beaucoup plus intolérants que les catholiques, puisqu'ils tiennent à retourner à la Bible comme seule source de toutes connaissances). L'ouvrage principal de Copernic, "*De Revolutionibus Orbium Coelestium*", ne paraîtra que juste avant sa mort, avec une préface d'Osiander : "..... Il est du devoir de l'astronome de suivre le parcours des astres par des observations aussi soignées que possible. Quant aux causes de ces mouvements, bien qu'en aucun cas il ne puisse en connaître l'origine véritable, il doit imaginer et proposer des hypothèses, basées sur les principes de la géométrie, afin de pouvoir calculer les mouvements passés et prédire ceux du futur. En cela le présent auteur a fait un travail remarquable, mais ses hypothèses n'ont aucunement besoin d'être "ni vraies ni même probables"; si elles fournissent une base de calcul cohérente avec les observations, cela est entièrement suffisant."²⁾. Il appartiendra à Képler de prouver que cette préface est entièrement due à Osiander.

Grâce à Copernic on peut enfin expliquer de façon simple les mouvements rétrogrades de Mars lorsque cette planète est en opposition, comme nous le montrons à la Fig. 5.

Tycho Brahé (1546-1601) est le plus grand astronome observateur avant l'avènement des télescopes optiques, mais ce n'était pas un astronome théoricien. Il n'épousa pas la théorie héliocentrique de Copernic, mais finit par proposer son propre système peu convaincant, où le

²⁾ Cette traduction un peu libre veut avant tout conserver le sens d'un texte où, bien sûr, rien n'est souligné.

Soleil tourne autour d'une Terre fixe et centrale, alors que les planètes sont en orbite autour du Soleil. Mais personne avant lui n'avait fait autant d'observations et, selon les appareils, sa précision surpassait d'un facteur de 3 à 60 tout ce qui avait été fait jusque là. Il améliora tous les types d'instruments et surtout les systèmes de visée. Sa plus grande précision de mesure était d'environ un sixième de minutes d'arc (ou 10 secondes d'arc), ce qui est absolument inouï lorsqu'on imagine cela sans l'aide d'aucune optique !

Tycho faisait partie de la noblesse danoise, sans être fortuné pour autant. Mais avec lui on voit pour la première fois un chercheur réussir à faire financer ses travaux par un mécène, ici la couronne danoise, qui mit à sa disposition des sommes considérables. De fait, il faudrait associer le Roi du Danemark et de Norvège, Frederick II, à l'oeuvre de Tycho. Avec l'aide du Roi, Tycho put construire le plus prestigieux **château-observatoire**, Uraniborg, représenté à la Fig. 6, sur la petite île de Hven. Il put même y aménager une imprimerie et plus tard une papeterie; cela lui permettait non seulement de publier plus rapidement et à moindres frais tous les résultats de ses recherches, mais aussi de s'affranchir du bon vouloir des imprimeurs de Copenhague. Tycho était aussi l'astrologue de la couronne, à laquelle, chaque année, il fournissait un horoscope. Uraniborg était devenu l'École d'astronomie de son temps et tous les astronomes de l'époque s'y sont rendus. On y était reçu, logé et nourri, comme dans un centre de recherche moderne construit à cet effet. Avec le temps et un prestige grandissant, Tycho, de caractère plutôt impatient et sans beaucoup d'égards, commit quelques erreurs d'appréciation qui lui créèrent de nombreux ennemis dans la noblesse et la population en général, surtout parmi les habitants de Hven. A la mort de Frederick II tout s'écroula très soudainement pour Tycho, qui se réfugia à Prague. On lui promettait des conditions semblables à celle de Hven, mais il ne put les réaliser avant sa mort. De fait, à Prague il ne fit aucune observation valable. Mais cette période restera marquée par l'arrivée de son élève Johannes Képler (1571-1630).

Le premier mérite de Képler fut d'obtenir, à Prague, tous les résultats des observations de planètes faites par Tycho à Uraniborg. Son deuxième fut l'énoncé de ses trois fameuses lois, auxquelles il arriva par l'étude des mesures de Tycho se rapportant à Mars. De fait, Képler trouva les deux premières lois en 1609 et la troisième seulement en 1619. Il vaut la peine d'insister sur le fait que Képler n'était pas un esprit libéré comme l'était Galilée. C'était un mystique qui cherchait à expliquer ses observations un peu comme l'avaient fait les philosophes de Mésopotamie voici quelque quatre mille ans, c.-à-d. par des figures géométriques de haute symétrie. Ainsi, il cherchait à emboîter les cinq corps solides dont les faces sont toutes identiques, soit le cube, le tétraèdre, le dodécaèdre, l'icosaèdre et l'octaèdre, de façon à les mettre en correspondance avec les cinq planètes connues. Selon lui le dessein de Dieu ne pouvait être que de construire un système d'une parfaite harmonie géométrique. Ainsi, la sphère de l'orbite de Saturne devait circonscrire parfaitement un cube, qui à son tour circonscrirait parfaitement la sphère de Jupiter; alors, le tétraèdre inscrit devrait exactement circonscrire la sphère de Mars, etc. Avec de telles règles Képler cherchait à reconstruire la suite des rapports des rayons orbitaux de Copernic. Même si Képler put croire qu'il avait atteint son but, celui d'avoir résolu les mystères de l'Univers, il était sur une piste sans avenir pour ce qu'il cherchait. Mais ses efforts furent récompensés par des résultats qu'il ne recherchait pas, les trois lois qui portent son nom.

Tout en proposant son système héliocentrique, Copernic fit l'erreur d'admettre que les orbites des planètes se recoupent toutes au centre de l'orbite terrestre, plutôt qu'au Soleil. C'était une

inconsistance dans la théorie copernicienne que Képler corrigea : puisque les planètes sont en orbite autour du Soleil, il lui paraissait évident que le plan de ces orbites devait contenir le Soleil, et non pas la Terre ou le centre de son orbite. Cette correction simplifia énormément la théorie de Copernic, qui malgré un bien meilleur accord avec les observations avait tout de même besoin de petits cercles auxiliaires pour chaque planète. Par une suite de petits pas de ce type et surtout par l'étude très minutieuse de Mars, planète proche pour laquelle Tycho avait obtenu les meilleures données, Képler en vint à faire le grand pas, consistant à rejeter les orbites circulaires pour les remplacer par des orbites elliptiques. Mais cela n'eut lieu que 13 ans après la publication du système des solides emboîtés. Le succès des deux premières lois pour expliquer les orbites des cinq planètes connues fut tel qu'il n'y avait plus aucun argument mathématique ou scientifique pour conserver le système géocentrique. Quant à la troisième loi, il fallut encore 10 ans à Képler pour qu'il y parvienne.

Un autre grand pas allait bientôt être franchi, même si c'est apparemment sans grand bruit que la nouvelle idée révolutionnaire allait s'installer dans les esprits des scientifiques de l'époque. Jusque là, l'Univers était limité par cette coupole percée de trous, la voûte céleste. En 1576 Thomas Digges, un astronome anglais, affirma que les étoiles n'étaient que d'autres soleils, dispersées jusqu'à l'infini dans toutes les directions de l'espace. Pour la première fois l'Univers devenait illimité, ce qui permit à Giordano Bruno de dire, en 1584, que le système du Soleil, de la Terre et des planètes n'était pas unique; mais on l'accusa d'hérésie et il fût brûlé au bûcher en 1600 !

Les thèses de Digges furent bientôt renforcées par les observations pratiques de Galilée (1564-1642) : avec ses lunettes il dénombrait un nombre infiniment plus grand d'étoiles.

Mais à quelles distances se trouvaient-elles ces étoiles ? Toutes les estimations de cette époque se sont avérées bien en deçà de la réalité. Avec les moyens d'alors il était impossible de déduire la distance aux étoiles par une comparaison de leurs luminosités avec celle du Soleil. C'est un Vaudois, Jean-Philippe Loys de Cheseaux (1718-1757), qui vers 1740, soit un siècle après Galilée, eut l'idée géniale suivante. A certains endroits de son orbite la luminosité de Mars est la même que celle d'une étoile de première magnitude (voir la Fig. 7). Mais Mars n'est pas lumineux lui-même, il ne fait que réfléchir la lumière du Soleil. Admettant que Mars est un miroir idéal, de Cheseaux calcula la distance à l'étoile au moyen des distances Soleil-Mars et Mars-Terre. Il obtint la valeur remarquable d'environ 5 années-lumière, alors que l'étoile la plus proche du Soleil, Proxima du Centaure, est effectivement à 4,3 années-lumière. Si de Cheseaux fit des suppositions un peu trop simplificatrices, il disposait déjà d'une bonne connaissance de la distance Soleil-Terre et donc aussi de celles entre le Soleil et les autres planètes. En 1784 William Herschel, qui ignorait les travaux de de Cheseaux, utilisa exactement la même technique, comparant cette fois les luminosités de Saturne et de l'étoile Véga.

5. Galilée ouvre l'ère des idées modernes

Avec Galilée apparaît un scientifique extraverti, remuant, flamboyant. Son plus grand mérite est probablement d'avoir été le premier chercheur à aborder la science sans aucunes idées préconçues. Après lui Descartes (1596-1650) adopte la même attitude et le clame de façon péremptoire. Cette façon nouvelle d'aborder la science est alors généralement acceptée. Galilée veut

faire partager ses découvertes par tout le monde, pas seulement ses collègues. Pour ce faire, il publie en italien, et non pas en latin, et choisit souvent à dessein un style de vulgarisation. Il construit les premiers télescopes, découvre le mini-système solaire formé de Jupiter et de ses 4 grands satellites, ainsi que les taches solaires changeantes. "*Ce qui est au-delà de l'orbe de la Lune n'est donc pas immuable*", crie-t-il, et il démolit complètement les conceptions d'Aristote. L'Inquisition dont il fut l'objet est la conséquence inévitable de son indépendance d'esprit dans tout ce qui touchait à la perception du monde qu'on avait à son époque !

Newton (1642-1727) est le premier à comprendre correctement les lois de la mécanique et de la gravité. Il en déduit théoriquement les lois de Képler. Les progrès qu'il fait accomplir aux mathématiques révolutionnent les méthodes de travail scientifiques. Il énonce l'ensemble des lois qui domineront nos notions de mécanique et de gravité jusqu'à l'avènement d'Einstein et de la relativité, au début du XXI^{ème} siècle.

Avec Galilée et Newton nous accomplissons des progrès, tant à l'échelle du quotidien qu'à celle du Cosmos, qu'il faut considérer comme la plus radicale des révolutions scientifiques. Nous comprenons enfin les lois de la mécanique et celles de la gravité. L'Univers s'étend tout à coup à d'énormes distances et on est presque disposé à accepter l'idée qu'il pourrait être infini. La grande révolution suivante, celle de la relativité d'Einstein, ne modifiera que notre perception des phénomènes à très grandes distances ou très grandes vitesses. Si la physique s'épanouit, il n'en va pas de même de la chimie, qui devra encore attendre longtemps avant de nous procurer une véritable connaissance de la matière. Les savants de l'époque étaient bien conscients de cette lacune. Ainsi Tycho avait fait installer un laboratoire d'alchimie dans les caves d'Uraniborg et Newton avait le sien à Cambridge (on rappellera qu'en ce temps-là on ne distinguait pas encore alchimie et chimie).

6. Einstein et la relativité³⁾

Einstein (1879-1955) révolutionne toutes nos idées sur l'espace, le temps et la gravité. L'espace et le temps ne sont plus des entités données d'avance, qui existent indépendamment de la matière (ou de l'énergie) et dans lesquelles l'Univers que nous connaissons pourrait s'être construit. Espace, temps et matière sont nés ensemble dans le "Big Bang" ! Il n'y a plus de différence essentielle entre espace et temps, qui ensemble forment un "quatre-espace" (qu'on appelle d'ailleurs souvent *espace-temps*), c.-à-d. un espace à quatre dimensions. Tout en admettant que cet Univers est fini, il n'a pas de frontières, on ne peut pas en sortir. De fait, dans l'Univers nous nous trouvons dans un trou noir, dont nous ne pouvons pas sortir, et dans ce trou noir il existe un très grand nombre d'autres trous noirs plus petits. La vitesse de la lumière est une vitesse limite, qu'on ne peut dépasser : il serait illusoire de concevoir la possibilité de vitesses infinies, car on pourrait alors être partout en même temps !

Dans l'espace euclidien à trois dimensions, celui qui nous est familier, les masses sont des entités indépendantes de l'espace. Dans ce trois-espace, tout objet animé d'une vitesse suit une trajectoire qui est déformée par la présence des autres masses. Cela est vrai même pour la trajectoire d'un rayon lumineux. Dans le quatre-espace d'Einstein, au contraire, les masses font partie

³⁾ Voir aussi **ORION** no. 258, d'octobre 1993, pp.208-217.

intégrante de l'espace, dont la métrique tient compte naturellement de toutes les masses de l'Univers. Dans ce quatre-espace un corps en mouvement, et qui n'est pas soumis à d'autres forces que celles de la gravité, parcourt une trajectoire rectiligne de l'espace, dénommée "géodésique" de cet espace. Ainsi, l'orbite de la Terre autour du Soleil, qui dans le trois-espace euclidien est approximativement une ellipse, est simplement une géodésique du quatre-espace d'Einstein. Un rayon lumineux qui frôle le Soleil, et se trouve ainsi dévié d'une trajectoire rectiligne dans le trois-espace, parcourt lui aussi une simple rectiligne géodésique dans le quatre-espace relativiste.

Un important postulat de la théorie d'Einstein est que les lois de la physique, valables dans un système de référence qui n'est pas accéléré, le sont aussi dans les systèmes qui sont en translations uniformes par rapport au premier; on parle alors de l'ensemble des systèmes inertiels. Puisque tous les systèmes inertiels sont équivalents du point de vue des lois de la physique, on a longtemps cru que l'on ne pouvait en distinguer aucun, jusqu'au jour où l'on a découvert la radiation micro-onde fossile à $2,7^{\circ}\text{K}$, prédite par Gamow. On sait aujourd'hui qu'il y a bien un système inertiel plus absolu que tous les autres, c'est celui par rapport auquel la radiation fossile paraît avoir une distribution isotrope. Ainsi le système solaire, qui bien sûr a de multiples composantes de vitesse (p. ex. autour du centre de la Voie Lactée à ≈ 250 km/s et qui correspond à une période de rotation d'environ 240 millions d'années, le mouvement vers le centre de gravité du groupe local d'étoiles à ≈ 20 km/s, le mouvement en direction du groupe local de galaxies à ≈ 100 km/s) se déplace-t-il présentement à la vitesse d'environ 370 km/s par rapport à ce référentiel absolu particulier.

7. Nos conceptions actuelles de l'Univers⁴⁾

Aujourd'hui notre perception du Cosmos est déterminée avant tout par les observations astronomiques, obtenues par des instruments toujours plus perfectionnés et plus performants. Mais les progrès de l'instrumentation sont si rapides que nos idées doivent, elles aussi, être continuellement mises à jour.

Dans les premières phases de son travail titanesque de recensement des étoiles, à la fin du XVIII^{ème} siècle, Herschel pensait que leur distribution, bien que chaotique sur de petites distances, était pratiquement uniforme à grande échelle. Mais plus son catalogue s'agrandissait, plus il devenait évident que les étoiles semblaient réparties dans une tranche d'épaisseur finie, qu'on avait déjà reconnue et nommé Voie Lactée. Herschel avait acquis le pressentiment que les limites de l'Univers devaient se trouver au-delà de cet énorme amoncellement d'étoiles nous entourant. D'autre part, à l'échelle de ce qu'il pouvait percevoir avec le télescope au miroir de 20 pouces (50,8 cm) qu'il avait construit lui-même, le plus puissant de l'époque, l'Univers ne semblait pas être uniforme, puisque les étoiles paraissaient confinées dans ce qu'il voyait comme une grande boîte rectangulaire, environ cinq fois plus longue qu'elle n'était profonde.

Herschel⁵⁾ (1738-1822) avait aussi établi le premier grand catalogue de 466 nébuleuses, suivant de peu celui de Messier qui n'en citait que 103. Au terme de ses travaux Herschel avait

⁴⁾ Les questions relatives à la place de l'homme dans l'Univers, en particulier celles relatives aux conditions nécessaires pour que cet Univers puisse être perçu par des êtres conscients, ont été abordées de façon exemplaire par Pierre North dans un récent article d'ORION no. 257, d'août 1993, pp. 166-171.

finalement identifié 2500 objets nébuleux. Il se vit obligé de distinguer entre plusieurs types de nébuleuses, en particulier celles que l'on pouvait résoudre en étoiles individuelles et pour lesquelles il avançait, avec quelques hésitations, l'idée qu'il s'agissait de collections d'étoiles situées au-delà, mais semblables à la Voie Lactée. Dans une deuxième catégorie se trouvaient des nébuleuses comme celle d'Orion, dont il pensait qu'il n'arrivait pas à les résoudre parce que trop éloignées; il devait donc s'agir d'ensembles d'étoiles beaucoup plus importants que la Voie Lactée afin d'expliquer leur grande luminosité.

Une troisième catégorie contenait les nébuleuses planétaires, soit des nébuleuses qui paraissent être en orbite autour d'une étoile centrale. Ce n'est qu'en 1926, quelque 140 ans plus tard et grâce au télescope de 100 pouces (2,54 m) du Mont Wilson, que Hubble les identifia comme des étoiles ayant explosé en supernova. Hubble reconnut aussi, dans la deuxième catégorie de Herschel, un groupe à part, celui des amas globulaires, des collections très denses d'étoiles à l'intérieur de la Voie Lactée.

Même si Herschel avait déjà postulé l'existence d'objets extra-galactiques, c'est à Hubble que revient le mérite d'avoir classé correctement les nébuleuses en trois catégories intra-galactiques et une catégorie extra-galactique, qu'on dénomma d'ailleurs galaxies. Il estima que son télescope de 100 pouces devait lui permettre de pénétrer l'espace jusqu'à des distances de 140 millions d'années-lumière et que dans ce volume devaient se trouver quelque deux millions de galaxies.

Malgré les énormes progrès que les travaux de Newton avaient permis de faire pour sa compréhension, on restait persuadé que l'Univers était statique. Einstein lui-même était convaincu qu'il en était ainsi. Tout en permettant des mouvements localisés, engendrés par les interactions gravitationnelles de proches voisins, il pensait qu'il n'y avait pas de mouvement d'ensemble à grande échelle. Pour réaliser cet équilibre, il avait besoin, comme déjà Newton avec sa théorie classique de la gravitation, d'une force répulsive s'opposant à l'effondrement gravitationnel que prédisaient ses équations de la relativité générale.

Nous avons vu qu'au début du vingtième siècle on débattait encore l'idée de savoir si les nébuleuses observées dans le ciel étaient toutes des nuages à l'intérieur de notre Voie Lactée, ou s'il s'agissait, dans certains cas au moins, de galaxies externes à la nôtre. En 1915 Slipher avait pourtant fait la remarque que pour les nébuleuses qui semblaient véritablement être des galaxies externes à la nôtre, le décalage vers le rouge, soit le "redshift", était beaucoup plus fréquent que le décalage vers le bleu. Mais ce sont les travaux remarquables de Hubble et Humason et leur recherche d'une corrélation entre les distances de ces galaxies avec leur "redshift", qui apportèrent, sans doute aucun, la preuve que l'Univers est effectivement en expansion : les décalages vers le rouge suggéraient une vitesse de récession v proportionnelle à l'éloignement d des galaxies, $v = H \cdot d$.

La constante de proportionnalité H est essentiellement la même pour toutes les galaxies et son inverse est un temps que Hubble évalua à 1.8 milliards d'années. A ce nombre on peut

5) Tout comme pour Ptolémée et Tycho Brahé, on peut dire de William Herschel qu'il fût le plus grand astronome observateur de son temps. Mais il ne vint à l'astronomie qu'à 35 ans, après une belle carrière de musicien. Cinq ans plus tard, en 1778, il construisit son magnifique télescope, avec lequel, en mars 1781, il découvrait la planète Uranus (et 16 ans plus tard deux de ses satellites). Le 6 décembre 1781 il fût nommé astronome privé du Roi et son salaire lui permit alors d'abandonner la musique comme profession.

naturellement associer une distance correspondante de 1.8 milliards d'années lumière. Par cette relation on introduit dans l'Univers une échelle des temps et une échelle des distances. Si on observe des galaxies qui ont une grande vitesse de récession, on les voit dans un état correspondant à un passé fort lointain. Assez rapidement on comprit que l'inverse de la constante de Hubble représentait une première estimation de l'âge de l'Univers, puisque le point singulier $t = 0$ correspondait à ce qu'on a très vite appelé le "Big Bang", une sorte de cataclysme initial. Mais l'âge suggéré par Hubble était bien trop courte pour pouvoir s'accommoder avec de nombreuses autres observations, p. ex. les âges géologiques. La petitesse de cet âge provenait des difficultés rencontrées dans l'estimation des distances et la révision, suggérée en 1952 par Baade et Minkowski vers des âges environ dix fois plus grands, fût saluée avec soulagement.

Alors que le catalogue des galaxies commençait à s'enrichir, on pensa d'abord qu'en dépit d'une distribution chaotique à très courtes distances, celle des espaces entre galaxies voisines, l'Univers est isotrope à plus grande échelle. Mais cette "limite de grande échelle" devait progressivement être repoussée vers des distances toujours plus grandes, car on découvrit successivement des groupes, des amas, puis des super-amas de galaxies, qui restent groupés par leurs interactions gravitationnelles. Aujourd'hui, la meilleure image que nous avons de la distribution des galaxies dans l'Univers est du genre de celle représentée à la Fig. 8; elle suggère une mousse de bulles de savon : les galaxies se trouvent presque toutes sur ce qui serait les pellicules de la mousse, alors que l'intérieur des bulles est pratiquement vide. Et chacune des bulles de cette mousse est bien en expansion, selon la fameuse loi de Hubble, où la vitesse v avec laquelle une bulle s'agrandit est proportionnelle au diamètre d de la bulle : $v = Hd$.

Concernant l'avenir de l'Univers, on sait depuis quelques années que l'expansion ne se ralentit pas, mais est au contraire accélérée. Cela signifie que la constante cosmologique est encore plus grande que celle proposée par Einstein pour assurer un Univers statique à grande échelle. La densité moyenne de matière, par contre, ne vaut que 25 à 30 % de la densité critique. Le sujet de l'expansion accélérée de l'Univers et des observations qui ont forcé cette conclusion est présentée en plus de détails dans un article de l'auteur qui a paru dans la revue **ORION** [8].

8. Le quatre-espace einsteinien

Nous allons maintenant essayer de comprendre ce qui différencie la géométrie du quatre-espace relativiste de l'espace euclidien à trois dimensions dont nous avons l'habitude. Dans ce but nous considérons l'orbite de la Terre autour du Soleil. Pour simplifier les choses nous admettons une orbite parfaitement circulaire, de rayon R ; nous ignorons donc aussi toutes les perturbations par d'autres corps célestes, en particulier nous admettons qu'il n'y a pas de Lune. S'il en est ainsi, nous pouvons placer le Soleil au centre du système de coordonnées et représenter cette orbite dans le plan (x,y) de l'espace euclidien par un cercle de rayon $R \cong 150$ millions de km autour de l'origine **O**. On note, dans ce cas, que la coordonnée z n'intervient pas.

Pour décrire l'évolution du système il faut donner les variations de x et y avec le temps t , soit les fonctions $x(t)$ et $y(t)$. Mathématiquement cela peut être fait en introduisant une quatrième coordonnée t , perpendiculaire aux trois premières du système (x,y,z) . Bien que nous ne soyons pas en mesure de concevoir un espace à quatre dimensions, ni de le représenter géométriquement, du point de vue mathématique il n'y a aucune difficulté à cela. Mais puisque la coordonnée z

n'intervient pas dans notre description du mouvement de notre Terre idéalisée autour du Soleil, nous allons l'ignorer et mettre à sa place la coordonnée du temps t .

Si on choisit pour condition initiale au temps $t = 0$ que La Terre est sur l'axe des x , on a $y(t=0) = 0$ et $x(t=0) = R$. La rotation de la Terre autour du Soleil s'effectue alors cependant que le temps t s'écoule de façon régulière le long de l'axe du temps. Dans notre espace (x,y,t) la trajectoire décrite est simplement une hélice. Le pas de cette hélice va dépendre des unités choisies pour le temps et pour les longueurs. Une première chose que nous dit la relativité est que l'échelle des temps n'est pas arbitraire, mais qu'elle est reliée à celle des longueurs par une constante de proportionnalité, c , la vitesse de la lumière dans le vide, et que c doit être exprimée par les unités de longueur et de temps choisies pour x , y et t . Si donc on choisit pour x et y des kilomètres et pour t la seconde, l'axe des temps sera effectivement un axe ct , où $c = 300\,000$ km/s. Pour notre hélice cela a des conséquences énormes, puisqu'en une seconde la Terre, à 150 millions de kilomètres du centre O , n'aura avancé que de 30 km dans la direction des y croissants, alors qu'elle se sera déplacée de 300 000 km le long de l'axe des temps ct ! Notre hélice est donc extrêmement étirée et sur ce premier petit tronçon on aura de la peine à voir qu'il ne s'agit pas vraiment d'un segment de droite (dans la direction y la composante est très courte, dans celle de ct elle est comparativement très longue). Mais malgré tout ce n'est pas une trajectoire rectiligne et pour l'instant notre espace est encore parfaitement euclidien. Il vaut probablement la peine, ici, de dire que la forme hélicoïdale serait plus marquée avec un Soleil beaucoup plus massif, ou si la Terre était nettement plus proche du Soleil.

Le passage à la relativité est subtil. La relativité nous dit qu'il n'y a pas d'espace sans matière; la matière fait partie intégrante de l'espace et du temps et elle modifie le quatre-espace relativiste de telle façon que la présence de matière y est déjà intégrée. Là où il y a de fortes concentrations de matière, les modifications par rapport à l'espace euclidien, même étendu à quatre dimensions comme nous l'avons fait avec un exemple spécial, sont importantes. Toutes les interactions purement gravitationnelles y sont comprises. Dans cet espace-là notre hélice devient donc vraiment une droite. Pour des masses petites ou peu denses, comme celle du Soleil, la différence entre ce que l'on nomme "la métrique" de l'espace relativiste et celle de l'espace euclidien est très petite, mais au voisinage d'un trou noir, p. ex., la différence est très grande.

Nous sommes tellement habitués à notre façon "euclidienne" de voir les choses que, de prime abord, on pense que l'espace relativiste est déformé. Le contraire est plus proche de la réalité, même si, en fait, c'est une question de convention. Nos sens se sont développés dans un environnement de petites vitesses et de petites masses et nous ont mené vers la métrique la plus simple possible, l'euclidienne.

Références

[1] B. Lovell, *Emerging Cosmology*, Praeger, New York, 1985 ISBN 0-30-001009-8.

- [2] A. Müller, *Geschichte der alpinen Forschung*, in: *Die Alpen - ein sicherer Lebensraum ?*, Erg. 171. Jahressv. Schweiz. Akad. Nat. Wiss., 1991 in Chur, ISBN 3-85637-211-3, p. 10.
- [3] G. Taubes, *Physicists Watch Global Change Mirrored on the Moon*, Science, 10 June 1994, pp. 1529-1530.
- [4] R.H. Baker und L.W. Fredrick, *Astronomy*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1971, Library of Congress No. 74-127649, p. 178.
- [5] V.E. Thoren, *The Lord of Uraniborg*, Cambridge University Press, 1990, ISBN 0-521-35158-8, p. 110.
- [6] F. Hoyle, *Astronomy and Cosmology*, W.H. Freeman & Co, San Francisco, 1975, ISBN 0-7167-0351-3, p. 50.
- [7] M. Geller und J. Huchra, *Mapping the Universe*, Science, 17 November 1989, pp. 897-903.
- [8] G. Fischer, *L'expansion de l'espace en cosmologie relativiste*, Orion, no. 301, décembre 2000, pp. 4-8. On trouvera aussi une version en allemand, *Die Expansion des Raumes in der relativistischen Kosmologie*, Orion, no 30, April 2001, pp. 11-16.

	\varnothing Lune	\varnothing Soleil	d	D
Aristarque	0,36	6,75	9,5	180
Amélioration par Hipparque	-	12,3	-	1245
valeur effective	0,27	108,9	30,2	11 726

Encadré 1 : Les dimensions de la Terre

La grandeur de la Terre a été discutée par Aristote et nous avons vu qu'il cite une valeur bien trop grande. Un de ses élèves, Dicéarque de Messine (350-290 av. J.-C.), géographe grec bien connu, arrive quant à lui à une dimension bien en dessous de la réalité. Aucun véritable essai de mesure n'est connu jusqu'à l'arrivée d'Eratosthène de Cyrène (276-196 av. J.-C.). Eratosthène fût appelé d'Athènes à Alexandrie par Ptolémée III Evergète, roi d'Égypte de 246 à 221 av. J.-C. afin d'éduquer Ptolémée IV Philopator, le futur roi, et prendre la responsabilité de la grande bibliothèque. C'était un homme d'une vaste culture, mais peu de ses écrits ont survécu et c'est à Cléomède, vulgarisateur scientifique gréco-romain, que l'on doit la description de la méthode utilisée pour déterminer le pourtour de la Terre.

Eratosthène estima la longueur de l'arc de cercle passant par Syène, l'Assouan d'aujourd'hui, et par Alexandrie. La distance entre ces deux villes avait été mesurée et l'on savait qu'à midi, lors du solstice d'été, le Soleil se trouve juste au zénith de Syène, car il n'y a alors pas d'ombre portée. Eratosthène érigea donc un gnomon vertical à Alexandrie, cela lui permit de mesurer l'angle que les rayons du Soleil y font avec la verticale lorsqu'il est au Zénith à Syène. L'angle trouvé était de $7,2^\circ$, c.-à-d. exactement le cinquantième d'un grand cercle. La distance Syène-Alexandrie était donc juste un cinquantième du pourtour de la Terre.

Les arpenteurs avaient obtenu 5000 stadias égyptiens pour cette distance; le pourtour du globe était donc de 250 000 stadias. Avec 157,50 m pour le stadia égyptien cela donne un pourtour de 39 375 km, à moins de 1,6 % de la valeur correcte de 40 000 km ! Il faut cependant reconnaître que cette grande précision est un peu chanceuse, deux erreurs venant se compenser : d'abord la distance entre Syène et Alexandrie est effectivement de 5346 stadias et les deux villes ne sont pas, comme Eratosthène l'avait admis implicitement, sur le même méridien.

Dans le dernier siècle avant notre ère Posidonios d'Apamée pensait avoir amélioré l'estimation d'Eratosthène. Il prit la distance de Rhodes à Alexandrie, estimée une fois encore à 5000 stadias sur la base du temps de voyage des bateaux. Ce chiffre est trop grand de 25 %, mais est compensé par des erreurs sur la mesure des angles. Pour la différence entre l'angle des rayons solaires à Rhodes et Alexandrie Posidonios donne $7,5^\circ$, alors qu'il n'y a que $5,25^\circ$. Son résultat de 240 000 stadias pour le pourtour terrestre est trop petit de 6 % et donc moins bon que celui d'Eratosthène.

Au neuvième siècle le Calife al-Ma'muon (786-833) fonde l'Académie des Sciences de Bagdad et encourage de nombreuses entreprises scientifiques, en particulier la détermination des dimensions du globe au moyen d'une ligne de base piquetée sur le Plateau du Zinjar aux environs de Bagdad. Les angles des rayons du Soleil sont aussi mesurés avec une plus grande précision. Le résultat est cette fois trop grand de 3.6 %, mais c'est la première mesure dont la précision n'est pas le résultat d'une compensation fortuite de deux erreurs.

Au Moyen-Âge il vaut la peine de citer la solution théologique du problème par le Cardinal Pierre d'Ailly (1350-1420). Sur la base d'une information contenue dans les Apocryphes, selon laquelle les eaux ne représentent qu'un septième de la surface de la Terre, il estima que la côte est de l'Asie ne pouvait pas être très éloignée de la côte ouest de l'Europe. Il professa cette croyance dans

son livre *Imago Mundi*, dont une copie parvint entre les mains de Christophe Colomb au moment où ce dernier préparait sa première traversée de l'Atlantique. Colomb obtint le soutien d'Isabelle de Castille sur la foi du livre de d'Ailly. Il est amusant de noter que si Colomb s'était basé sur les estimations beaucoup plus justes des philosophes grecs, il n'aurait sûrement pas obtenu le soutien royal et n'aurait probablement pas entrepris un voyage qui finalement détruisit tous les concepts géographiques fondés sur les écritures. Colomb se rendit d'ailleurs compte de sa chance : à la bibliothèque de Séville on trouve une copie de *Imago Mundi* annotée de sa main et dans celle de Madrid une lettre dans laquelle il exprime sa gratitude à l'erreur de d'Ailly.

Depuis le XVII^{ème} siècle on détermine les dimensions de la Terre par des méthodes tout à fait semblables à celle d'Eratosthène. Par triangulation au moyen de théodolites on obtient des valeurs précises pour la longueur des lignes de base et au moyen de télescopes on mesure avec grande précision les angles sous lesquels les étoiles traversent le méridien. Avec ces nouvelles méthodes on s'est d'ailleurs rendu compte que la Terre est loin d'être une sphère parfaite. Par suite de sa rotation journalière, et des forces centrifuges qui en résultent, son diamètre équatorial dépasse d'environ 43 km le diamètre polaire. Des écarts de sphéricité nettement plus petits proviennent de la distribution inhomogène des masses au voisinage de la surface du globe.

Encadré 2 : Newton

*La nature et ses lois,
Dans les ténèbres étaient cachés.
Dieu décréta : que Newton soit !
Et tout fut éclairé.*

Traduction par l'auteur de la fameuse épigramme du poète et philosophe anglais Alexander Pope :

*Nature, and Nature's Laws lay hid in Night.
God said, Let Newton be ! and All was Ligt.*

Newton est né en 1642, quelques mois seulement après la mort de Galilée, celui qui prépara pour lui le terrain, autant en mécanique qu'en astronomie. Au même moment René Descartes, dans la quarantaine et en exil en Hollande, travaillait à ses *Principes de la philosophie* qui allaient influencer profondément les *Principia* de Newton, publiés quarante-cinq ans plus tard. En Hollande encore, Rembrandt avait alors 36 ans.

En 1661, à l'âge de 18 ans, Newton est reçu au Trinity College de Cambridge, une communauté d'environ 400 professeurs et étudiants. À l'exception d'une période de deux années (1665-1667), lors d'une épidémie de peste, ce collège sera sa demeure pendant 35 ans. Ses carnets de lectures révèlent qu'après le curriculum obligatoire et classique il dévora tous les traités philosophiques et scientifiques contemporains, en particulier ceux de Képler, Galilée, Gassendi, Hooke, avec lequel il se brouilla, et surtout Descartes. Lorsqu'il se rendit compte que son manque de connaissances en mathématiques freinait ses progrès, il se mit avec vigueur à combler cette lacune et arriva rapidement à la limite des connaissances de l'époque. Une chose est sûre, il travaillait presque toujours seul, en parfait autodidacte.

Sa brouille avec Hooke est bien connue et se rapporte à la primauté de l'idée que l'attraction gravitationnelle est inversement proportionnelle au carré de la distance séparant deux masses en interaction. Comme c'est souvent le cas lorsqu'une idée est mûre, il est presque certain que les deux savants y sont arrivés indépendamment. Mais Newton exploita immédiatement l'idée pour montrer que les lois de Képler en découlent. Sa démonstration de ces lois est remarquable pour une autre raison. Aujourd'hui on dérive ces lois par calcul différentiel et intégral, dont Newton a été l'un des deux initiateurs, l'autre étant Leibniz, avec lequel il se brouilla aussi. C'est pourtant par une méthode géométrique que Newton démontra les lois de Képler et lorsqu'on suit ses raisonnements on ne peut qu'être frappé d'admiration par sa maîtrise des propriétés des triangles.

Il n'est pas question ici d'énumérer tous les domaines auxquels Newton s'intéressa et qu'il fit progresser. Mais à part la mécanique, la gravité, la cosmologie et les mathématiques, il faut aussi mentionner l'optique.

En 1693, à 50 ans, il fut victime d'une dépression mentale, provoquée peut-être par les vapeurs de mercure de son laboratoire, et on peut dire que son activité scientifique cessa. Il accepta la position de "Directeur de la Frappe (ou de la Monnaie)" à Londres. À la Frappe il s'avéra un administrateur remarquable; il réorganisa la monnaie et réussit ainsi à enrayer une crise économique qui menaçait le royaume. En 1705 il fût ennobli par la Reine Anne et mourut à l'âge de 80 ans.

Encadré 3 : Le principe anthropique

Comme nous le décrivons dans l'article principal, l'Univers a pris son essor dans le "Big Bang", voici 10 à 15 milliards d'années. Cet événement a créé *temps, espace, énergie* et *matière*, dont l'évolution subséquente a conduit à l'architecture cosmique, illustrée par la Fig. 8, à la formation de galaxies, d'étoiles et de planètes avec leurs satellites. Finalement, il a permis l'éclosion de la vie. Même si nous sommes capables d'esquisser, et en grande partie de la comprendre cette évolution, nous ne pourrions jamais prendre à son égard le recul d'un spectateur de théâtre, car nous sommes à la fois sur le plateau et sur les gradins. Et surtout, nous n'avons pas le choix du moment de notre entrée en scène. Si, en tant qu'êtres humains, nous posons la question de l'âge de l'Univers, la réponse est quasiment connue d'avance : d'un côté, il a bien fallu une dizaine de milliards d'années pour que des conditions favorables à l'éclosion d'une vie évoluée puissent être réalisées et, de l'autre, dans un Univers en expansion et plus vieux que 20 milliards d'années, la densité moyenne d'énergie serait devenue trop faible pour assurer de réelles chances à une telle éclosion de la vie.

Ce que nous venons de dire est une formulation de ce qu'on appelle aujourd'hui "le principe anthropique". On distingue même deux niveaux de ce principe. Dans une forme dite "**faible**", on se borne à constater que l'Univers a, en ce moment, des propriétés compatibles avec notre présence en tant qu'observateurs. Dans sa forme "**forte**", le principe affirme, au contraire, que **l'Univers a été ajusté avec finalité, dès le début, de façon à permettre l'existence de l'homme.**

Dans sa version "faible", l'apparition de l'humanité n'est donc qu'accidentelle; notre destinée n'a pas été ordonnée ou programmée. Dans la version "forte", par contre, le principe anthropique présente l'Univers comme une création ordonnée à dessein, en vue de favoriser l'épanouissement de

l'homme. **A bien des égards, on en revient ainsi à la question de savoir si nous sommes, ou non, au centre de l'Univers.** Mais nous prenons aussi de plus en plus conscience que l'existence de l'homme sur Terre est beaucoup plus fragile que nous ne le pensions il y a quelques décennies encore. Nous sommes non seulement de plus en plus nombreux, mais nous disposons aussi de moyens toujours plus puissants en regard de ceux de la nature. Ces énormes capacités sont précisément celles qui mettent en péril des conditions qui ont d'abord favorisé notre apparition, puis notre épanouissement sur la planète Terre. Si nous tenons à survivre en tant qu'espèce évoluée, il est aujourd'hui impératif, **quelque soient nos conceptions anthropiques**, que nous acceptions une position de grande humilité vis à vis de cet environnement si favorable, mais dont nous savons maintenant qu'il est très fragile.



Figure 1. Exemple de carte du monde, selon le géographe grec Hécatee de Milet (VI^{ème} siècle av. J.-C.), où la nomenclature originale en grec ancien a été latinisée ou germanisée (ainsi : Hyperboräer = Celtes, Eridanos = Po, a été confondu avec Rhin, Istros = Danube). On y reconnaît bien la alors par la lumière solaire réfléchiée par la Terre, comme le montre bien la photographie (b). C'est le phénomène de la "Lune cendrée", ou du "clair de Terre". [3]

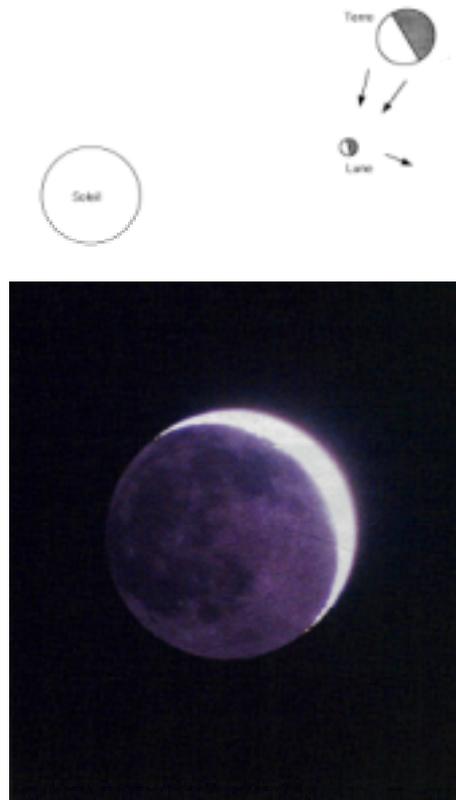


Figure 2. (a) En phase de Nouvelle Lune on ne voit, depuis la Terre, qu'un petit arc éclairé directement par le Soleil; mais le reste du disque lunaire est tout de même visible, illuminé qu'il est

alors par la lumière solaire réfléchiée par la Terre, comme le montre bien la photographie (b). C'est le phénomène de la "Lune cendrée", ou du "clair de Terre". [3]

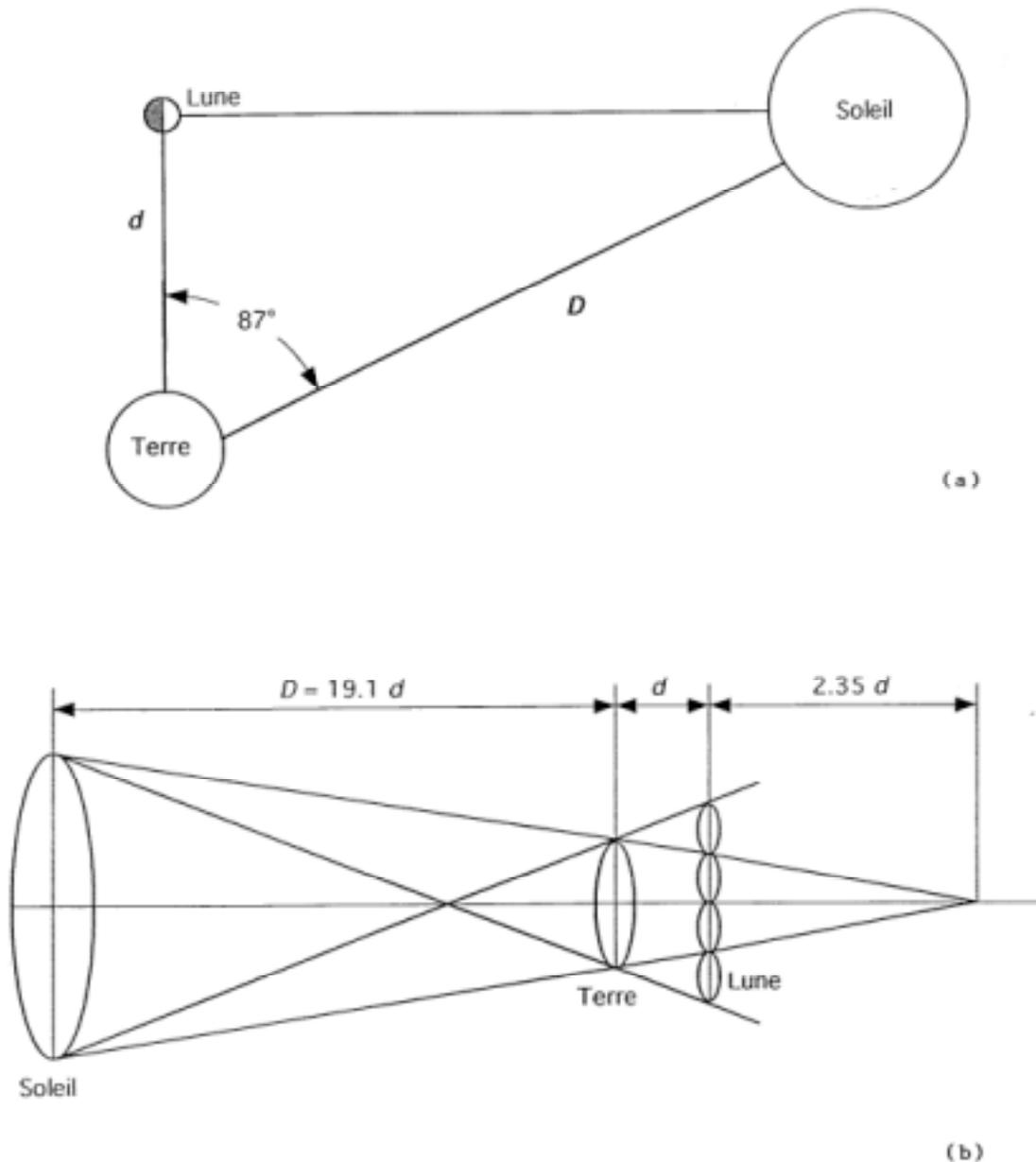


Figure 3. (a) Lorsque, vue depuis la Terre, exactement une demi-Lune est éclairée, Soleil, Lune et Terre sous-tendent un angle droit. La mesure, à cet instant précis, de l'angle sous lequel on voit le Soleil par rapport à la Lune permet, en principe, de déterminer le rapport des distances Terre-Lune et Terre-Soleil. Cette méthode a été utilisée par Aristarque, mais l'angle qu'il a trouvé, 87° au lieu de $89^\circ 51'$, est trop petit et le rapport des distances qu'il en a tiré n'est donc pas correct. (b) En mesurant, lors d'une éclipse de Lune maximale (éclipse lors de laquelle les centres du Soleil, de la Terre et de la Lune sont un instant parfaitement alignés), les durées des phases de pénombre et d'obscurcissement total, Aristarque en déduisit que l'ombre portée par la Terre à l'endroit de la Lune avait un diamètre double de celui de la Lune. Connaissant les dimensions de la Terre, grâce à Eratosthène, il put calculer les dimensions de la Lune. Et comme le Soleil, vu depuis la Terre, sous-tend le même angle solide que la Lune, il put aussi donner un diamètre pour cet astre. Mais l'erreur

de sa mesure initiale d'angle fait que son Soleil est 16 fois trop petit et 65 fois trop près. Ses résultats pour la Lune, par contre, sont assez proches de la réalité.

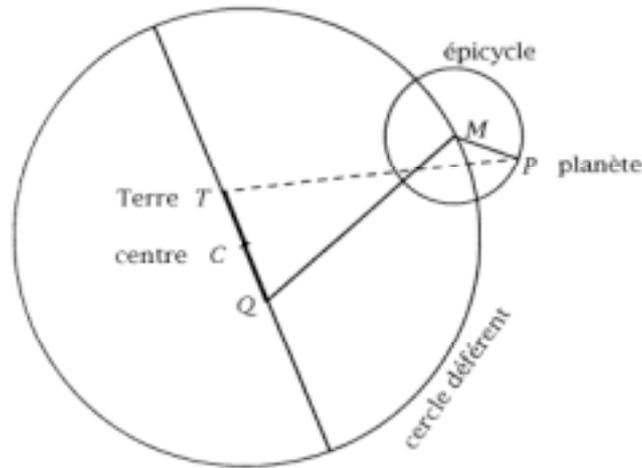
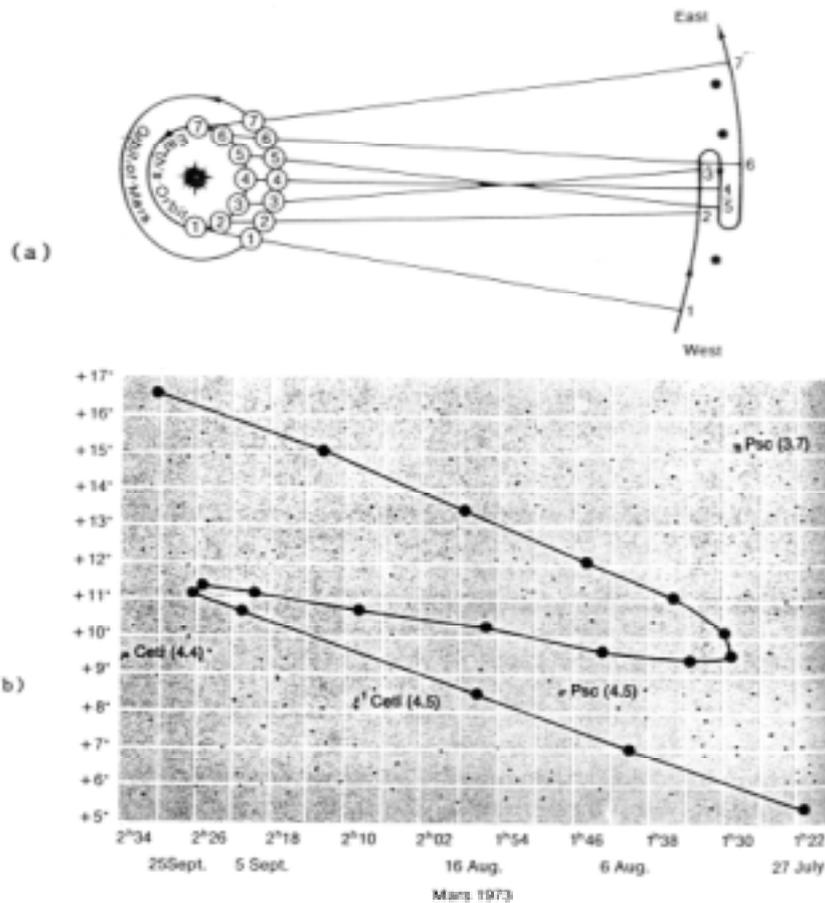


Figure 4. Construction de Ptolémée, entièrement basée sur des cercles, pour les orbites des planètes supérieures. La planète tourne à vitesse angulaire constante sur le cercle de l'épicycle, dont le centre M est en orbite sur le cercle déferent. La vitesse angulaire de M, par contre, n'est pas uniforme par rapport au centre C du cercle déferent, mais par rapport au point décentré Q, et la Terre ne se trouve pas au centre, mais au point T dans le prolongement de QC, tel que les segments



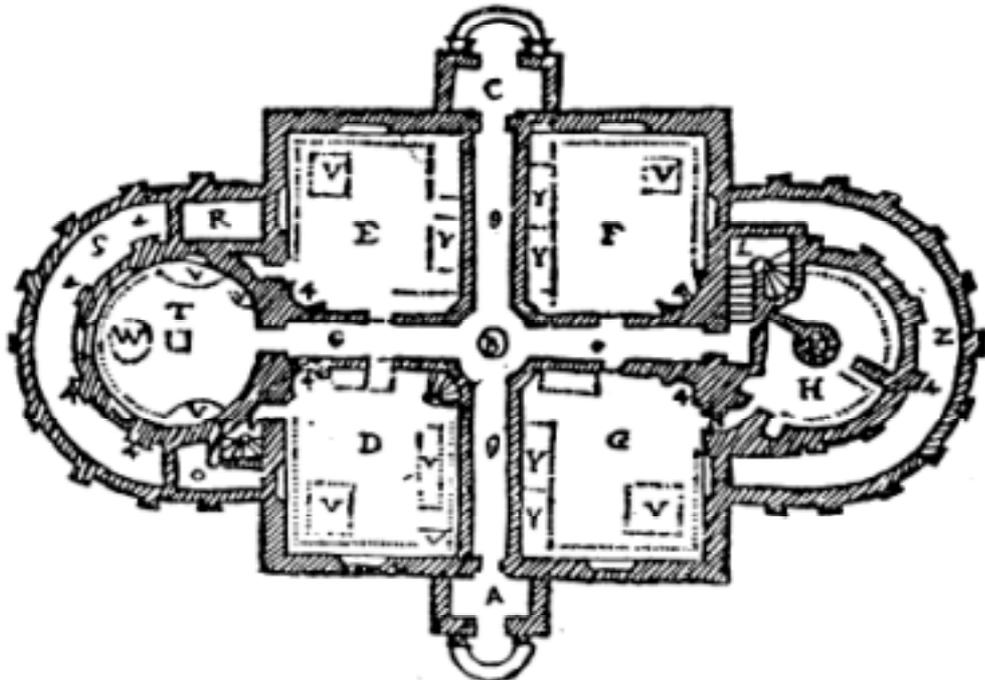
QC et CT soient de même longueur.

Figure 5. (a) Mouvement apparent rétrograde d'une planète supérieure, telle que Mars, au voisinage d'une situation d'opposition. Les chiffres de 1 à 7 donnent les positions respectives de la Terre et de Mars à des instants identiques. (b) Positions apparentes dans le ciel de la planète Mars au moment de l'opposition du mois de mars 1973. [4]

ORTHOGRAPHIA PRÆCIPVÆ DOMVS
ARCIS VRANIBVRGI IN INSV-
SIA VULGO HVENNA,
RANDÆ GRATIA CIRCA AN-
EXÆDI-
LA PORTHMI DANICI VENV-
ASTRONOMIÆ INSTAV-
NVM 1580 A TYCHONEBRAHE
FICATÆ.



a



b

Figure 6. Plan et élévation d'Uraniborg. [5]

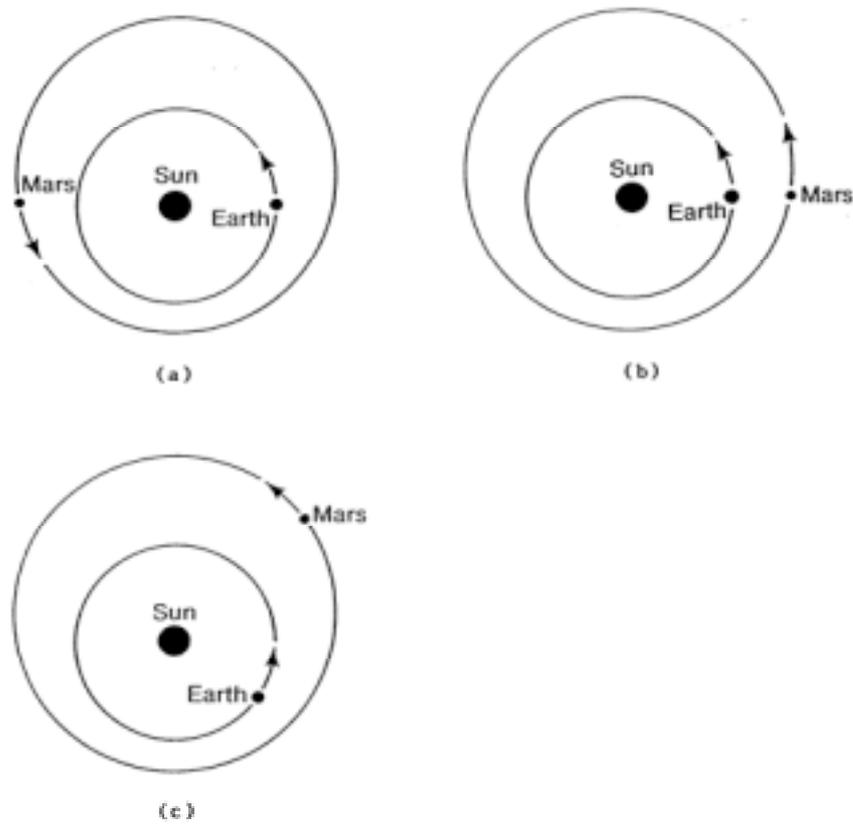


Figure 7. Configurations du système Soleil, Terre, Mars, (a) en conjonction, (b) en opposition et (c) dans des conditions où Mars apparaît comme une étoile de première magnitude. Le rayon de l'orbite de Mars est d'environ 1,524 fois celui de la Terre. [6]

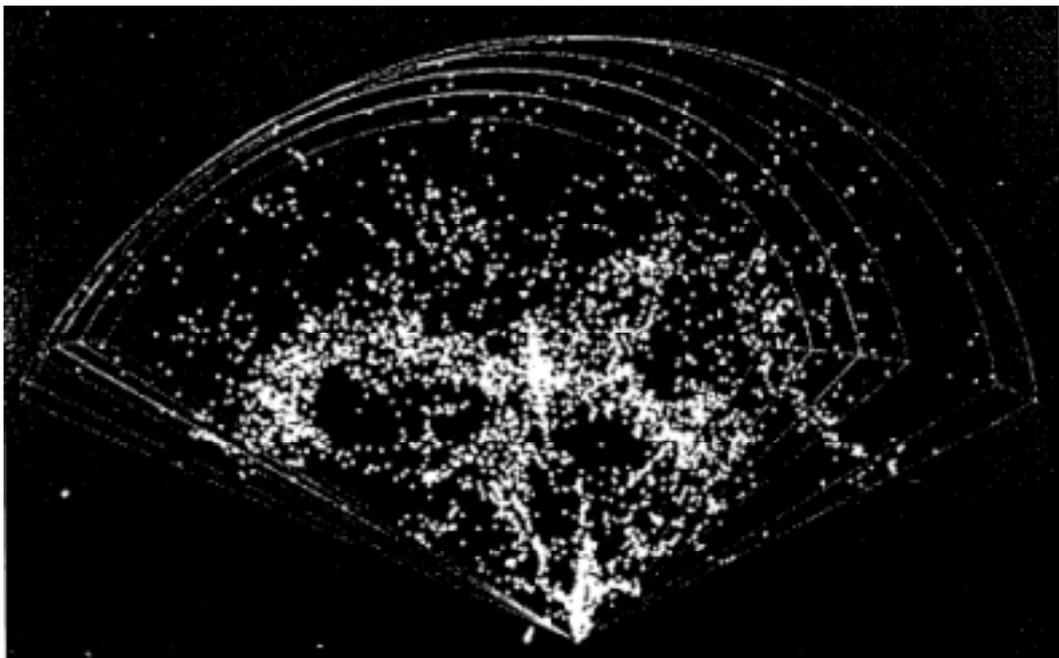


Figure 8. Représentation dans une portion de l'espace inter-galactique de toutes les galaxies connues. La répartition fait penser à une mousse de savon : les galaxies sont de préférence sur les films de savon, alors que l'intérieur des bulles est le plus souvent vide. [7]