

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 55 (1997)
Heft: 281

Artikel: L'évolution de nos conceptions du cosmos
Autor: Fischer, Gaston
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-898677>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 21.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

L'évolution de nos conceptions du cosmos ¹⁾

GASTON FISCHER

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 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, 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 limite à l'espace, qui s'étend à l'infini dans toutes les directions, sinon il faudrait imaginer des parois arbitraires! 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. 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! Bien que basée uniquement sur un raisonnement philosophique, une telle affirmation, prononcée quelques trois cents ans déjà avant notre ère, aurait pu constituer le fondement de rapides développements ultérieurs.

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,

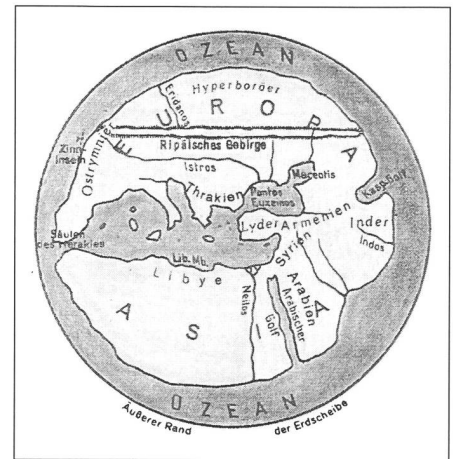


Figure 1. Exemple de carte du monde, selon le géographe grec Hécateé de Milet (VI^e siècle av. J.-C.), où la nomenclature originale en grec ancien a été latinisée ou germanisée (ainsi: Hyperboræi = Celtes, Eridanos = Po, a été confondu avec Rhin, Istros = Danube). On y reconnaît bien la Méditerranée (la mer au milieu des terres). [2]

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 grecques (environ 72 800 km; cette valeur est incertaine, car la stadia grecque 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 régression 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.

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].

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 abrupte, 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'une 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,

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 réfléchie par la Terre, comme le montre bien la photographie (b). C'est le phénomène de la «Lune cendrée», ou du «clair de Terre». [3]

on voit très bien la totalité de l'astre, car sa partie sombre est alors éclairée par la lumière solaire réfléchie 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.

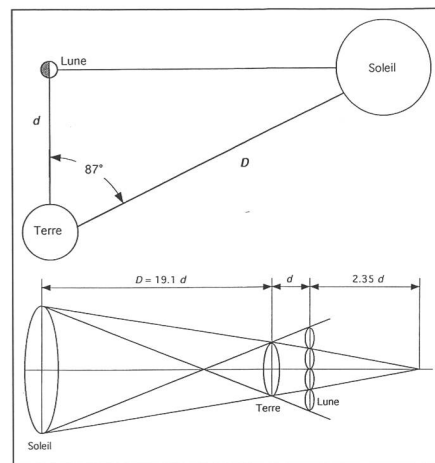
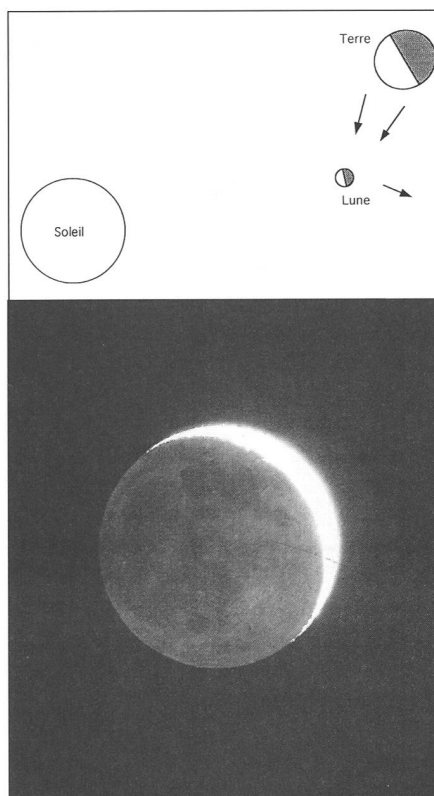


Figure 3. (a) Lorsque, vue depuis la Terre, exactement une demi Lune est éclairée, Soleil, Lune et Terre sous-tendent un angle droit. La mesure, à cet instant précis, de l'angle sous lequel on voit le Soleil par rapport à la Lune permet, en principe, de déterminer le rapport des distances Terre-Lune 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.

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

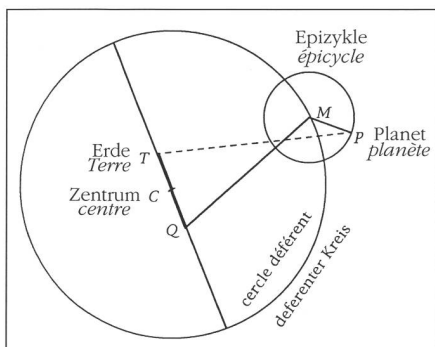
	Lune	Soleil	d	D
Aristarque	0,36	6,75	9,5	180
Amélioration par Hipparque		12,3	-	1245
Valeur effective	0,27	108,9	30,2	11726

est correcte à la seconde près; finalement il établit un catalogue de 850 étoiles, le premier Almagest. 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^e 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 sacré 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 ac-

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 déférent. La vitesse angulaire de M, par contre, n'est pas uniforme par rapport au centre C du cercle déférent, 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.



cord avec ses constructions géométriques. Sa plus grande oeuvre, le catalogue de l'Almagest (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^e et XIII^e 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 Soleil tourne autour d'une Terre fixe et centrale, alors que les pla-

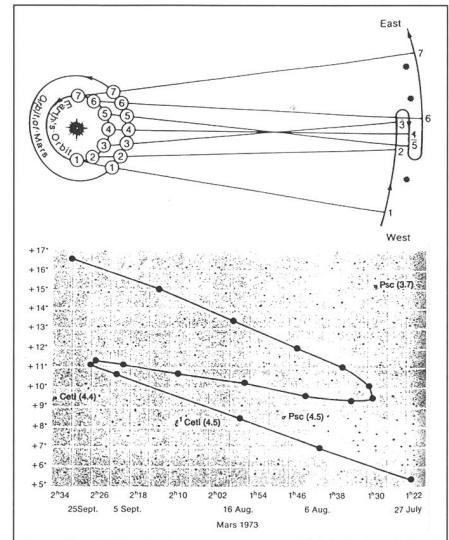


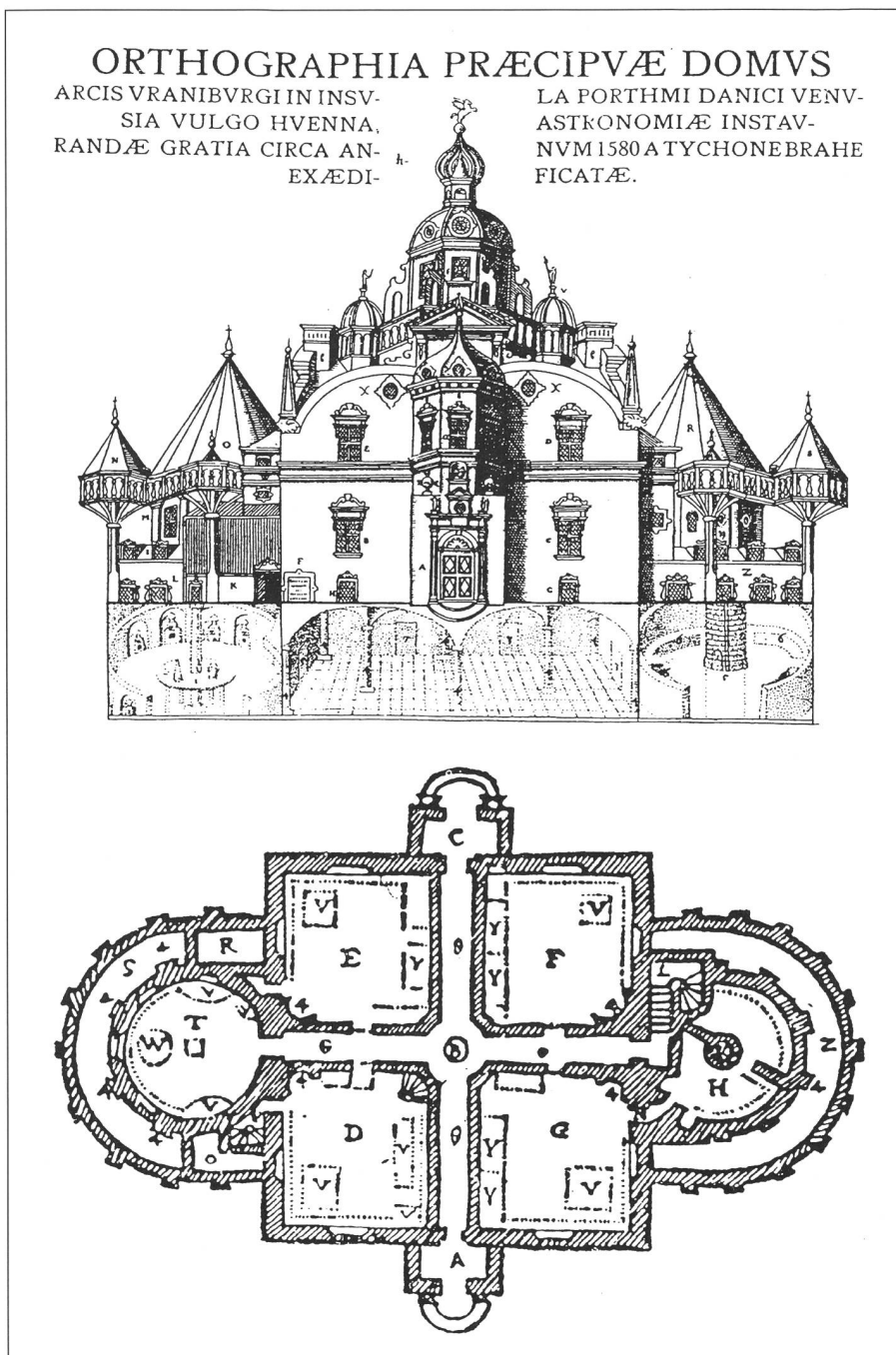
Figure 5. (a) Mouvement apparent rétrograde d'une planète supérieure, telle que Mars, au voisinage d'une situation d'opposition. Les chiffres de 1 à 7 donnent les positions respectives de la Terre et de Mars à des instants identiques. (b) Positions apparentes dans le ciel de la planète Mars au moment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

nètes 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'œuvre 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 laquel-

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

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



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

le, 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 Johann 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 quelques quatre mille ans, c.-à-d. par des figures

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.

5. Galilée ouvre l'ère des idées modernes

Avec Galilée apparaît un scientifique extroverti, remuant, flamboyant. Son plus grand mérite est probablement d'avoir été le premier chercheur à aborder la science sans aucune idée 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, ain-

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 égyptiennes pour cette distance; le pourtour du globe était donc de 250 000 stadias. Avec 157,50 m pour la stadia égyptienne 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 Science 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^e 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.

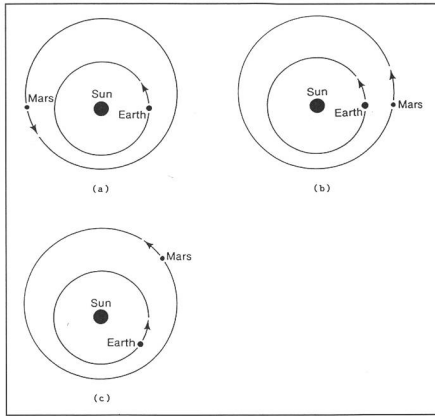


Figure 7. Configurations du système Soleil, Terre, Mars, (a) en opposition, (b) en conjonction et (c) dans des conditions où Mars apparaît comme une étoile de première magnitude. Le rayon de l'orbite de Mars est d'environ 1,524 fois celui de la Terre. [6]

si 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 XX^e 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

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

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
Light.*

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 1861, 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, Gasendi, 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 fut ennobli par la Reine Anne et mourut à l'âge de 80 ans

la trajectoire d'un rayon lumineux. Dans le quatre-espace d'Einstein, au contraire, les masses font partie 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°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'Univers ⁴⁾

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^e siècle, Herschel pensait que leur distribution, bien que chaotique sur de petites distances, était pratiquement uniforme à grande échel-

le. 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 nommée 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.

Herschel ⁵⁾ (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 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 quelque hésitation, 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.

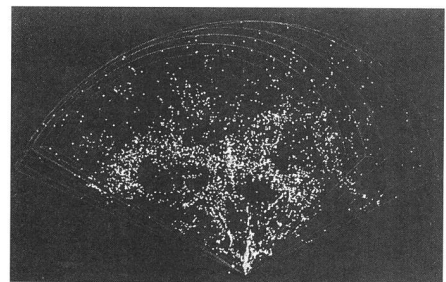
Une troisième catégorie contenait les nébuleuses planétaires, soit des nébuleuses qui paraissent être en orbite autour d'une étoile centrale. Ce n'est qu'en 1926, quelques 140 ans plus tard et grâce au télescope de 100 pouces (2,54 m) du Mont Wilson, que Hubble les identifia comme des étoiles ayant explosé 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 quelques deux millions de galaxies.

Avec Herschel, Hubble (1889-1953) est probablement le plus grand astronome des temps modernes. En 1925 il prouve avec assurance, ce que Herschel ne faisait que soupçonner, que les nébuleuses extra-galactiques sont bien des galaxies indépendantes, comme la Voie Lactée, dans lesquelles on distingue des étoiles individuelles. En 1929 il découvre le «redshift», ce déplacement vers le rouge, par effet Doppler, de toutes les lignes spectrales des galaxies éloignées et il explique cette observation par l'expansion générale de l'Univers. Le «Big Bang», comme origine de l'Univers, en est une conséquence logique.

Une fois encore, 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» doit progressivement être repoussée vers des distances toujours plus grandes, car on découvre 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

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]



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.

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.

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: $v = Hd$.

La constante de proportionnalité H est la constante de Hubble. Son inverse, $1/H$, est un temps et ce temps représente à peu près l'âge de l'Univers, puisque le «Big Bang» correspond au point singulier initial où $t = 0$. En vérité, la loi très simple $v = Hd$ n'est qu'une approximation linéaire d'une loi d'expansion plus générale, valable pour l'âge actuel de l'Univers et pour notre proche environnement galactique. En effet, d'une part, la vitesse d'expansion n'a certainement pas toujours été la même et, d'autre part, à cause de la vitesse finie de la lumière nous savons que *regarder loin* est synonyme de *regarder dans le passé*. Il faut donc admettre que le rapport v/d n'est pas constant, mais varie avec la distance d . Ainsi, si l'expansion a eu tendance à ralentir, ce rapport devrait être plus grand pour les galaxies lointaines que pour les proches. Mais il n'a pas encore été possible de confirmer cette conjecture par des observations qui auraient permis d'en tirer la forme mathématique de la relation entre v et d . Du point de vue de la théorie, cette relation dépend de la densité de masse moyenne de l'Univers. Quant aux difficultés pratiques, elles sont de deux ordres. Pour les galaxies rapprochées on obtient en général des distances assez précises, mais les vitesses sont faibles et le plus souvent dominées par les interactions gravitationnelles avec l'entourage local. Les galaxies lointaines, par contre, ont de grandes vitesses d'expansion, mesurables avec précision par effet Doppler, mais on connaît très mal leurs distances. Ainsi, aujourd'hui encore même la valeur de H est incertaine et les âges que l'on cite pour l'Univers vont de 10 à 20 milliard d'années.

Quant à l'avenir de l'Univers, le paramètre critique est une fois encore sa densité de masse moyenne ρ . En effet, à cause de l'attraction gravitationnelle, l'expansion de l'Univers ne peut que se ralentir progressivement et il y a une densité critique ρ_c pour laquelle l'expansion disparaît au bout d'un temps infiniement long. Si $\rho < \rho_c$ l'Univers poursuivra indéfiniment son expansion, alors que si $\rho > \rho_c$, l'expansion s'arrêtera au bout d'un temps critique τ_c , pour aboutir au

temps $2\tau_c$ à un effondrement final, l'antithèse du «Big Bang». Une des grandes questions cosmologiques non résolues actuellement est la valeur de cette densité moyenne ρ . Bien des arguments théoriques, et certaines observations, suggèrent que ρ est très exactement égal à ρ_c . Par contre, si on recense toutes les masses visibles (c.-à-d. lumineuses) du Cosmos, en utilisant tout ce que nous connaissons des étoiles pour en tirer la totalité de leur masse, on n'arrive qu'à un ou deux pour-cent de ρ_c . Mais si on mesure, une fois encore par effet Doppler, la vitesse à laquelle les parties externes des galaxies tournent autour de leurs centres de gravité, on trouve une masse qui dépasse d'un facteur de cinq à dix la masse visible. On vient même de découvrir, après la réparation du télescope spatial Hubble, que dans la galaxie M87 la vitesse de rotation des parties les plus voisines du centre est tellement grande qu'il faut invoquer la présence, au coeur de la galaxie, d'un trou noir extrêmement massif, de 2 à 3 milliards de fois la masse de notre Soleil. A lui tout seul ce trou noir correspond à 2 ou 3

pour-cent de la masse visible de toute la galaxie; et on suspecte la présence de nombreux autres galaxies. Il faut donc admettre que dans les galaxies la masse visible ne représente qu'un dixième de la masse totale, dont la majeure partie se retrouve probablement sous forme de gaz non lumineux et de trous noirs.

Il reste pourtant un écart d'un facteur 5, voire même davantage, entre cette masse identifiable par les vitesses de rotation dans les galaxies et la densité critique ρ_c . Mais les arguments théoriques suggérant pour l'Univers une densité critique sont si convaincants qu'un effort considérable est présentement dévolu à la recherche de cette masse manquante.

8. Le quatre-espace einsteinien

Nous allons 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.

Le principe anthropique

■ Comme nous le décrivons dans l'article principal, l'Univers a pris son essor dans le «Big Bang» voici 10 à 20 milliard d'années. Cet événement a créé *temps, espace, énergie* et *matière*, dont l'évolution subséquente a conduit à l'architecture galactique illustrée par la Fig. 8, à la formation de galaxies, d'étoiles, de planètes. Finalement il a permis l'éclosion de la vie. Même si nous sommes capables d'esquisser, et en grande partie de 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 nettement 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 nomme 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.

Sous sa forme «forte», le principe anthropique présente donc l'Univers comme une création ordonnée en vue de permettre l'épanouissement de l'homme, alors que dans la forme «faible» l'apparition de l'humanité n'est qu'accidentelle; notre destinée n'a pas été ordonnée ou programmée. A bien des égards, on en revient à la question de savoir si nous sommes, ou non, le centre du monde. 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 à peine quelques décennies. 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, quelques soient nos conceptions anthropiques, que nous acceptions une position de grande humilité vis à vis de cet environnement si favorable, mais aussi si fragile.

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 $R \approx 150$ 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 , alors $y(t=0) = 0$ 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 arbi-

traire, 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 $c \approx 300\,000$ 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 menés vers la métrique la plus simple possible, l'euclidienne.

GASTON FISCHER

Rue de Rugin 1A, CH-2034 Peseux

Références / Literaturverzeichnis

- [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, 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, p. 110.
- [6] F. HOYLE, *Astronomy and Cosmology*, W.H. Freeman & Co, San Francisco, 1975, p. 50.
- [7] M. GELLER UND J. HUCHRA, *Mapping the Universe*, Science 17 November 1989, pp. 897-903.

Materialzentrale SAG

SAG-Rabatt-Katalog «SATURN», mit Marken-Teleskopen, Zubehör und dem gesamten Selbstbau-Programm gegen Fr. 3.80 in Briefmarken:

Astro-Programm SATURN

1997 neu im Angebot: Zubehör (auch Software) für alte und neue SBIG-CCD-Kameras. Refraktoren, Montierungen und Optiken von Astro-Physics, Vixen, Celestron und Spectros; exklusives Angebot an Videos u. Dia-Serien für Sternwarten, Schulen und Private usw.

Selbstbau-Programm

Parabolspiegel (\varnothing 6" bis 14"), Helioskop (exklusiv!), Okularschlitten, Fangspiegel- u. -zellen, Hauptspiegelzellen, Deklinations- u. Stundenkreise usw. Spiegelschleifgarnituren für \varnothing von 10 bis 30cm (auch für Anfänger!)

Profitieren Sie vom SAG-Barzahlungs-Rabatt (7%).

(MWST, Zoll und Transportkosten aus dem Ausland inbegriffen!)

Schweizerische Astronomische Materialzentrale SAM
Postfach 715, CH-8212 Neuhausen a/Rhf, Tel 052/672 38 69

METEORITE

Urmaterie aus dem interplanetaren Raum

direkt vom spezialisierten Museum

Neufunde sowie klassische Fund- und Fall-Lokalitäten

Kleinstufen - Museumsstücke

**Verlangen Sie unsere kostenlose
Angebotsliste!**

Swiss Meteorite Laboratory

Postfach 126 CH-8750 Glarus

Tél. 077/57 26 01 – Fax: 058/61 86 38