

Histoire de la découverte du système solaire

*I - Géométrie et cinématique**

par Jean SIVARDIÈRE
CEA - Département de Recherche Fondamentale
sur la Matière Condensée - SPSMS
38054 Grenoble Cedex 9

1. INTRODUCTION

Dans un article récent, Baylin [1] a montré comment les propriétés géométriques, cinématiques et dynamiques des planètes pouvaient être exploitées pour concrétiser quelques notions élémentaires de mécanique et illustrer l'idée d'ordre de grandeur. A un stade ultérieur, il est intéressant d'exposer, au moins de manière schématique, selon quelles étapes historiques et quelles méthodes s'est effectuée la découverte du système solaire. Nous avons laissé de côté les aspects instrumentaux pour nous concentrer sur l'évolution des théories. Ce premier article traite de la géométrie et de la cinématique du système solaire.

2. AVANT LES GRECS

Plus que les Égyptiens ou les Chinois, ce sont surtout les Chaldéens qui, entre – 2800 et – 600, étudièrent le ciel avec précision, établirent des tables quantitatives d'observations et firent ainsi de l'astronomie, science utilitaire indispensable aux agriculteurs et aux marins, la première science exacte. Leurs principaux résultats furent les suivants [2] :

- la reconnaissance des points cardinaux ;
- la distinction entre les étoiles fixes formant les constellations et les planètes ou «astres vagabonds» (le mouvement propre des étoiles ne sera découvert qu'en 1715 par Halley) ;
- la détermination de la trajectoire annuelle du Soleil autour de la Terre, ou cercle écliptique, et l'introduction des coordonnées écliptiques ;
- l'identification des cinq planètes visibles à l'œil nu : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne (en particulier, les observations de Mercure - et celles de Vénus - le matin et le soir ont été reconnues comme celles

* N.D.L.R. : La deuxième partie de cet article (II - Dynamique) sera publiée dans le B.U.P. n° 776 - juillet-août-septembre 1995.

d'une planète unique), et la mise en évidence du caractère périodique de leur mouvement ;

– la prédiction empirique des éclipses de Lune et de Soleil.

3. L'ASTRONOMIE GRECQUE

Les Grecs furent les premiers, à partir de – 600 environ, à rechercher des explications aux phénomènes célestes qu'ils observaient.

3.1. La Terre isolée et sphérique

Thalès (640-562), philosophe fondateur de l'école ionienne, pensait que la Terre était un disque flottant sur les eaux et surmonté de la voûte céleste. On doit à son disciple Anaximandre (611-545) le premier grand progrès spéculatif de l'astronomie : la Terre est un corps céleste cylindrique *isolé dans l'espace*, au centre de l'univers, les astres tournant autour de la Terre sur des roues.

Le progrès suivant est dû à l'école pythagoricienne. Parménide (504-450) imagina que la Terre, ne pouvant avoir qu'une forme parfaite, était *sphérique*. Des preuves de cette sphéricité ne furent apportées qu'un siècle plus tard, elles ont été énumérées par Aristote (384-322) : le mâât d'un navire est visible avant sa quille quand il s'approche d'un port ; l'altitude des étoiles varie avec la latitude du point d'observation ; l'ombre de la Terre sur la Lune lors d'une éclipse est limitée par un arc de cercle.

3.2. La lumière des astres et les éclipses

Parménide observa que la partie visible de la Lune est toujours dirigée vers le Soleil, et nota que l'éclat des planètes varie au cours du temps. Il en déduisit que le Soleil est une étoile émettrice de lumière, et que cette lumière est réfléchiée par la Lune et les planètes.

Puis le philosophe ionien Anaxagore (499-428) considéra la Lune et les planètes comme des projectiles en mouvement dans l'espace, et donna le principe des éclipses de Lune et de Soleil. Le pythagoricien Philolaos (450-400) affirma que tous les astres étaient sphériques, et l'on put alors expliquer complètement les éclipses, ainsi que les phases de la Lune.

3.3. La modélisation du mouvement des astres

Philolaos envisagea un mouvement de rotation de la Terre et du Soleil, en un jour et en un an respectivement, autour d'un hypothétique

«feu central» : il expliquait ainsi le mouvement apparent des étoiles. Mais la plupart des Grecs admettaient, avec Platon (427-347), que la Terre était immobile, au centre de l'univers, et que le Soleil, la Lune, les planètes et les étoiles tournaient autour d'elle.

Eudoxe (408-355), élève de Platon, réussit à rendre compte approximativement du mouvement apparent des planètes en combinant des mouvements *circulaires et uniformes* autour d'axes passant par la Terre [3]. Son modèle fut perfectionné par Aristote mais abandonné par la suite, car les fortes variations d'éclat des planètes étaient incompréhensibles si leur distance à la Terre était constante.

L'athénien Héraclide (388-315) fut le premier à envisager que la Terre tourne sur elle-même en un jour afin d'expliquer le mouvement des étoiles. Considérant les oscillations de Vénus de part et d'autre du Soleil et ses grandes variations d'éclat, il suggéra que cette planète tournait autour du Soleil et non de la Terre. Puis, dix-huit siècles avant Copernic, Aristarque de Samos (310-230) affirma que c'était le cas de toutes les planètes, y compris la Terre qui décrivait donc le cercle écliptique. Mais son système, qui expliquait simplement la succession des saisons, fut rejeté par les successeurs d'Aristote.

A partir de – 250, c'est la théorie des *épicycles*, développée à Alexandrie par Apollonius, Hipparque (190-120) et Ptolémée (70-147), qui s'imposa. Dans ce modèle, chaque planète décrit un épicycle, cercle dont le centre décrit un autre cercle, le déférent, lui-même centré sur la Terre ou en son voisinage ; une des deux périodes de rotation est égale à une année sidérale. Une telle description d'un mouvement planétaire n'a rien de surprenant [4], [5] : elle correspond à l'utilisation d'un référentiel lié à la Terre. Pour une planète inférieure, le déférent n'est autre que l'orbite apparente du Soleil autour de la Terre et l'épicycle est l'orbite de la planète autour du Soleil ; c'est le contraire pour une planète supérieure. Copernic utilisera un référentiel lié au Soleil et simplifiera cette description en faisant disparaître l'effet de parallaxe planétaire [6].

3.4. Deux grandes découvertes

Hipparque, qui fut le plus grand astronome de l'antiquité et le créateur de la trigonométrie, découvrit une inégalité périodique du mouvement de la Lune, l'évection, et surtout la **précession des équinoxes** [7] : l'axe de la Terre n'est pas fixe par rapport aux étoiles mais précède autour d'une direction fixe faisant avec lui un angle de

$23^{\circ} 27'$, en une «année platonique», soit vingt-cinq mille huit cents ans environ. La nutation [7], oscillation de l'angle entre l'axe terrestre et cette direction fixe, d'amplitude $9''$ et de période dix-neuf ans, ne sera mise en évidence qu'en 1748, par l'astronome anglais Bradley dont nous reparlerons. Hipparque proposa aussi une méthode, perfectionnée au XVI^e siècle, de détermination des longitudes terrestres par l'observation simultanée d'un même signal, tel qu'une éclipse de Lune, visible en deux points éloignés : l'éclipse de 1634 fut ainsi observée au Caire et en Europe de l'Ouest, on en déduisit que la Méditerranée était plus courte de mille kilomètres qu'on ne le croyait auparavant.

Cléomède, astronome grec du premier siècle après J.-C., observa une éclipse de Lune juste après son lever alors que le Soleil était encore au-dessus de l'horizon. Il expliqua le phénomène par la **réfraction** des rayons lumineux sur l'atmosphère terrestre.

3.5. Les premières évaluations des distances astronomiques

A Alexandrie, Eratosthène (273-192) utilisa une méthode remarquablement simple pour évaluer le rayon de la Terre R_T et obtint la valeur exacte à quelques dizaines de kilomètres près [2], [4], [8]. Le jour du solstice d'été, à midi, le Soleil est au zénith à Syène, ville égyptienne située sur le tropique du Cancer ; le même jour à la même heure, les rayons du Soleil font un angle $\alpha = 7^{\circ} 12'$, soit un cinquantième de circonférence, avec la verticale d'Alexandrie, ville située sur le même méridien (figure 1) : la circonférence terrestre est donc égale à cinquante fois la distance entre les deux villes.

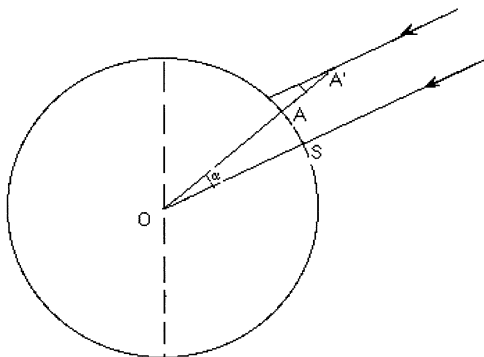


Figure 1 : Évaluation du rayon de la Terre par Eratosthène. L'angle α entre la direction du Soleil et la verticale d'Alexandrie est évalué en mesurant la longueur de l'ombre de l'obélisque AA'.

Mettant en œuvre une suggestion d'Aristarque, Hipparque mesura le temps que la Lune éclipsée met pour traverser le cône d'ombre de la Terre (figure 2) et en déduisit que le rayon de la Lune R_L est égal au tiers environ du rayon terrestre [2], [4]. La Lune étant vue depuis la Terre sous un angle d'un demi-degré, il en conclut que la distance Terre-Lune est égale à $60 R_T$ environ. Une variante de la méthode d'Aristarque consiste à comparer le rayon de courbure de l'ombre de la Terre sur la Lune au rayon de la Lune [9]. Ptolémée utilisa la mesure de la parallaxe mensuelle de la Lune pour trouver la distance TL.

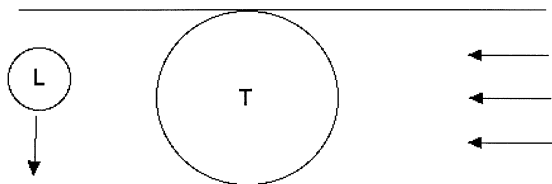


Figure 2 : Évaluation du rayon de la Lune par Hipparque. On mesure le temps mis par la Lune pour traverser le cône d'ombre de la Terre.

Aristarque [2], [10] proposa également une méthode pour trouver la distance Terre-Soleil. L'intervalle de temps s'écoulant entre la nouvelle lune et le premier quartier est plus court que celui qui sépare le premier quartier de la pleine lune (la différence est de trente-cinq minutes, et non de douze heures comme le croyait Aristarque). Connaissant la période synodique de la Lune, on en déduit l'angle β entre les directions Terre-Lune et Terre-Soleil lors du premier quartier, d'où le rapport des distances TL et TS (figure 3). Aristarque trouva $\beta = 87^\circ$ (au lieu de 89.8°), d'où $TS = 20 TL = 120 R_T$ (au lieu de $400 TL = 2\,400 R_T$), soit environ sept millions de kilomètres. Le Soleil étant vu depuis la Terre sous un angle d'un demi-degré, il en déduisit une valeur, également sous-estimée d'un facteur 20, du rayon du Soleil.

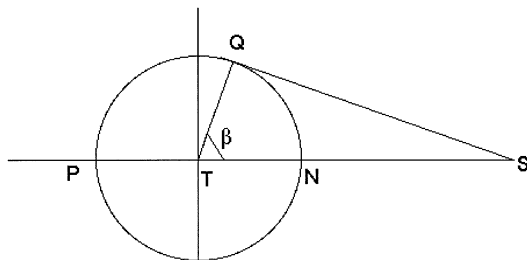


Figure 3 : Évaluation de la distance Terre-Soleil par Aristarque. N, Q et P désignent trois positions de la Lune : respectivement la nouvelle lune, la lune à son premier quartier et la pleine lune.

En résumé, les Grecs ont apporté une contribution essentielle à l'astronomie : ils ont compris que la Terre, la Lune et les planètes étaient des objets sphériques éclairés par le Soleil et mobiles dans l'espace. Mais si la théorie des épicycles, progressivement compliquée par l'introduction de cercles supplémentaires pour mieux reproduire les observations, réussit à prédire leurs mouvements de manière satisfaisante, elle n'en proposait aucune explication physique.

Les Grecs ont obtenu le bon ordre de grandeur des rayons R_T et R_L et de la distance TL . Cette distance est assez facile à mesurer avec précision par triangulation : la parallaxe de la Lune (angle sous lequel on voit un rayon terrestre depuis cet astre) est de $57' = 0.95^\circ$, elle a été obtenue en 1751 à partir des observations de Lalande à Berlin et de La Caille au Cap. La meilleure valeur de la distance TL a été obtenue en 1946 par la méthode d'écho radar. Les Grecs ont par contre largement sous-estimé la distance TS , qui ne sera appréciée correctement qu'à la fin du XVII^e siècle. Quant aux distances des planètes ou même à leurs rapports, aucune mesure physique (parallaxe, éclat, ...) ou interprétation théorique (modèle de Ptolémée) ne permettait alors de les atteindre. Anaxagore supposa de manière arbitraire qu'une planète est d'autant plus éloignée de la Terre que sa période est longue, d'où la séquence Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne. La distance des étoiles resta inconnue.

4. L'ASTRONOMIE MODERNE

4.1. Le système de Copernic

Au XV^e siècle, l'astronome allemand Regiomontanus (1436-1476) analysa de manière critique les résultats de Ptolémée relatifs au mouvement de la Lune et exerça une profonde influence sur le polonais Copernic (1473-1543). Celui-ci rejeta finalement le système de Ptolémée, inacceptable à ses yeux car il exigeait des mouvements circulaires non uniformes (Ptolémée avait introduit le point équant [11], par rapport auquel la rotation du centre de l'épicycle sur le déférent se fait à une vitesse angulaire uniforme : ce point est symétrique de la Terre par rapport au centre du déférent).

En reprenant, dès 1514, l'hypothèse de la rotation diurne de la Terre avancée par Héraclide et le système héliocentrique déjà entrevu par Aristarque, Copernic rendit compte très simplement de l'aspect général du mouvement apparent du Soleil, de la Lune (considérée comme un satellite de la Terre), des planètes et des étoiles, en particulier les

différences de comportement des planètes supérieures et inférieures, ainsi que de nombreux phénomènes inexpliqués par Ptolémée, tels que le maximum d'éclat des planètes supérieures lorsqu'elles sont en conjonction, et non en opposition, avec le Soleil. Mais il dut surcharger son modèle d'épicycles pour mieux l'accorder aux observations et ses prédictions n'étaient pas meilleures que celles de Ptolémée [12]. Copernic n'attribuait aucun rôle dynamique au Soleil : selon lui, les planètes ne tournent pas autour du Soleil fixe, mais autour du centre de l'orbite terrestre, qui en est distinct.

Les orbites planétaires étant supposées coplanaires, le modèle de Copernic fournit une détermination aisée des distances *relatives* Soleil-planètes [2] et justifia ainsi la séquence des planètes adoptée arbitrairement dans l'antiquité. Le cas des planètes inférieures, Mercure et Vénus, est le plus simple : on peut mesurer l'angle sous lequel est vue leur orbite depuis la Terre. Le cas des planètes supérieures est plus complexe : la distance au Soleil s'obtient en observant la direction de la planète lors de la quadrature qui suit une conjonction avec la Terre. Le schéma de Copernic fournit également très simplement les périodes sidérales des planètes en fonction de leurs périodes synodiques, durées séparant deux conjonctions successives avec la Terre.

4.2. Tycho-Brahé, Galilée et Képler

Grâce aux efforts instrumentaux du danois Tycho-Brahé (1546-1601), la précision des mesures de position passa de 10' à 1' (ce n'est qu'au XIX^e siècle qu'elle passa à 1" environ, elle est aujourd'hui de 0.01" pour les observations terrestres). Le modèle de Copernic fut cependant refusé par Tycho-Brahé qui, faute de pouvoir observer les parallaxes stellaires prédites par le modèle de Copernic, utilisa un modèle partiellement géocentrique (les planètes tournant autour du Soleil et celui-ci autour de la Terre), et même plus tardivement par le très conservateur Jean-Dominique Cassini (1625-1712) [13]. Mais il fut conforté dès 1610 par les observations de Galilée (1564-1642) qui, le premier, utilisa une lunette astronomique (le télescope ne sera inventé que vers 1670) et découvrit les phases de Vénus, preuve de sa rotation autour du Soleil, et le système solaire en réduction formé par Jupiter et ses satellites. Les phases de Mercure furent observées peu après par l'allemand Hévelius.

L'observation des éclipses des satellites de Jupiter fut parfois utilisée pour déterminer la longitude, selon une suggestion de Galilée [14]. Galilée observa aussi les taches du Soleil et en déduisit que le

Soleil tourne sur lui-même (la période de rotation propre, vingt-cinq jours à l'équateur et davantage au pôle, et l'orientation de l'axe seront déterminées par effet Doppler, en 1863 seulement, par Carrington). Il remarqua enfin que, même vues à la lunette, les étoiles restaient des objets ponctuels, et en déduisit qu'elles étaient nettement plus éloignées que les planètes.

Le modèle de Copernic fut clarifié et affiné par Képler (1571-1630) qui put disposer des observations remarquables de son maître Tycho-Brahé et découvrit ses deux premières lois en 1604 et la troisième en 1618. Képler introduisit l'astronomie dans le domaine de la physique. Le remplacement du cercle par l'ellipse permit d'éliminer définitivement les épicycles [15] et la troisième loi établit, pour la première fois, un lien entre les différents mouvements planétaires (le mouvement képlérien se fait à une vitesse angulaire presque uniforme vu du foyer non occupé par le Soleil, qui joue donc un rôle analogue au point équant de Ptolémée).

Les prédictions du modèle képlérien étaient bien meilleures que celles de Ptolémée ou Copernic, par exemple celle du *transit* (passage devant le disque solaire) de Mercure en 1631, prédit à quelques heures près quatre ans à l'avance, et celle du transit de Vénus en 1639 : ces transits furent observés par Gassendi (1592-1655). Vendelinus vérifia que les satellites de Jupiter satisfont la troisième loi de Képler. Contrairement à Copernic, Képler s'interrogea sur l'origine du mouvement des planètes et envisagea aussi bien une attraction des planètes par le Soleil que leur entraînement par un «tourbillon magnétique».

Au cours des XVII^e et XVIII^e siècles, les astronomes poursuivirent les travaux de Képler relatifs à la planète Mars, et aboutirent à la détermination précise de tous les mouvements planétaires : dimension et forme de l'orbite elliptique (grand axe et excentricité), période de révolution, longitude et date du passage au périhélie, plan de l'orbite (longitude écliptique de la ligne des nœuds et angle d'inclinaison sur le plan de l'écliptique). La Lune fut également très étudiée : Tycho-Brahé précisa sa variation, une inégalité de son mouvement découverte par les astronomes arabes vers 1000 ; Cassini étudia sa libration.

4.3. La distance Terre-Soleil

Dès lors que les distances relatives Soleil-planètes étaient connues, il suffisait de mesurer avec précision une distance absolue pour obtenir toutes les distances Soleil-planètes. La distance ST, ou unité astrono-

mique, est difficile à apprécier car la parallaxe moyenne du Soleil est seulement de 9" environ. D'où l'idée, introduite par Képler, de mesurer plutôt la parallaxe de Mars lors d'une conjonction avec la Terre. A partir d'observations de la direction de Mars effectuées à six heures d'intervalle par Tycho-Brahé, Képler obtint la valeur par excès 3', soit $1/1\,200$ radian, d'où la distance $TM > 1\,200 R_T$ et, sachant que $SM/ST = 1.5$, $ST > 2\,400 R_T$ ou 15 millions de km environ. L'astronome anglais Flamsteed (1646-1719) obtint la valeur par excès 25", d'où $ST > 120$ millions de km. En 1672, les observations simultanées de Mars par Cassini à Paris et par Richer à Cayenne fournirent une valeur supérieure, 140 millions de km soit $22\,000 R_T$.

Il a donc fallu attendre la fin du XVII^e siècle pour que la distance Terre-Soleil soit connue avec une précision de 10 %. En 1725, Halley [16] proposa de mesurer la parallaxe de Vénus, dont le mouvement est parfaitement connu, en observant sa position non par rapport aux étoiles, mais par rapport au Soleil lors d'un transit : la durée du transit dépend de la latitude du point d'observation, elle peut varier de trente minutes d'un hémisphère à l'autre. Un tel phénomène est rare, car les plans orbitaux de la Terre et de Vénus ne coïncident pas. Les observations de 1761 et 1769 (en Suède par Hell et à Tahiti par le capitaine Cook), puis celles de 1874 et 1882, donnèrent $TS = 145$ millions de km environ, soit une précision de 3 % (les prochains transits auront lieu en 2004 et 2012).

La mesure de la parallaxe de certains astéroïdes, Iris en 1889 puis Eros en 1901 par Hinks, a fourni ultérieurement une précision encore meilleure, suivant la suggestion de l'anglais Gill, car ces astéroïdes, contrairement à Vénus, donnent des images ponctuelles. L'orbite d'Eros (découvert en 1898 par l'allemand Witt) est très aplatie et passe très près de la Terre (22 millions de km) tous les trente ans environ. En 1930, Spencer Jones obtint ainsi à 0.1 % près la valeur de l'unité astronomique fournie finalement par écho radar sur Vénus, soit 149.6 millions de km.

4.4. La loi de Titius-Bode, Uranus et les astéroïdes

En 1766, l'astronome allemand Titius (1729-1796) observa une régularité dans les distances Soleil-planètes (une «quatrième loi de Képler») : le rapport des distances de deux planètes successives au Soleil est approximativement constant. L'observation fut développée

par l'allemand Bode (1747-1826), et exprimée mathématiquement par Wurm en 1787 par l'expression [4], [17] :

$$r_n = a + b 2^n$$

$a = 0.4$ et $b = 0.3$ en unités astronomiques, $n = -\infty$ pour Mercure et 0 pour Vénus, en supposant - idée déjà émise par Képler - l'existence d'une planète, encore inconnue, située entre Mars ($n = 2$) et Jupiter ($n = 4$). Cette loi fut confortée par la découverte par William Herschel (1738-1822), en 1781, d'Uranus ($n = 6$) puis par celle de l'astéroïde Cérés ($n = 3$) le 1^{er} janvier 1801 par l'astronome sicilien Piazzi. Mais elle fut contestée après celle, par l'allemand Olbers (1758-1840), en 1802, de Pallas, qui semblait correspondre à la même valeur $n = 3$.

On découvrit peu après deux autres astéroïdes - Vesta (Harding, 1804) et Junon (Olbers, 1807) - puis Astrée (Hencke, 1845) et bien d'autres par la suite, ayant des orbites presque circulaires et formant une ceinture comprise entre les orbites de Mars et Jupiter (cent astéroïdes étaient catalogués en 1868, deux cents en 1879, trois cents en 1890 et plus de trois mille aujourd'hui). Olbers imagina que cette ceinture était due à la fragmentation d'une planète $n = 3$ en une multitude de débris. Plus récemment, on a découvert, surtout à partir de 1930, des astéroïdes analogues à Eros, la famille Apollon-Amor (Hermès, Adonis, Icare, ...) dont les orbites sont très excentriques et peuvent atteindre celles de la Terre et même de Mercure, en 1920 Hidalgo dont l'orbite est comprise entre celles de Mars et de Saturne, et en 1977 Chiron (sans doute un ancien satellite de Saturne) qui circule entre Saturne et Uranus, ainsi que Herculina, une «petite planète double».

La loi empirique de Bode perdit tout crédit après la découverte de Neptune ($n = 7$) en 1846, qu'elle avait pourtant contribué à faciliter et celle de Pluton en 1930 (voir II*). Cependant on s'est aperçu récemment que les satellites «réguliers» de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune satisfont des lois analogues avec des orbites inoccupées [18] (ces satellites ont des orbites quasiment circulaires dans le plan équatorial de la planète mère) : nous y reviendrons en II.

4.5. La rotation propre des planètes

Les rotations propres de Mars, Jupiter et Saturne, dont les surfaces sont tachetées, furent facilement détectées. En 1659, Huygens observa

* Voir N.D.L.R. page 645.

les taches de Mars et évalua la période propre à un jour : Cassini confirma son résultat. En 1665, Cassini fut le premier à observer la tache rouge de Jupiter (il évalua l'aplatissement de la planète à 1/15 en 1691, et étudia également avec précision la rotation de la Lune). La période de Saturne et son aplatissement furent obtenus par Herschel en 1794.

Vers 1800, Schröeter affirma que la période de Mercure était voisine de 24 heures, mais des observations plus précises de Schiaparelli (1835-1910) en 1891 ont suggéré une valeur égale à sa période de révolution autour du Soleil, soit environ 88 jours : elle est en fait de 59 jours comme l'ont montré Dyce et Pettengill par une méthode radar en 1965. De même Cassini pensait que la période propre de Vénus était de 23 heures et 15 minutes, une valeur voisine fut donnée par son fils Jacques et par Bianchini puis par Schröeter. Mais Schiaparelli, en 1878, affirma qu'elle était égale à la période de révolution, soit environ 225 jours : la valeur obtenue par spectrographie par Slipher, et confirmée en 1962, est de 243 jours, la rotation se faisant - le cas est unique - dans le sens rétrograde.

Par spectrographie, Deslandres montra en 1902 que l'axe de rotation d'Uranus - cas unique également - est voisin de son plan orbital. Les périodes propres d'Uranus, Neptune et Pluton ont été mesurées seulement en 1912 par Lowell et Slipher, en 1928 par Moore et Menzel, et en 1955 par Walker et Hardie, respectivement : mal connues jusqu'à la mission Voyager, les périodes des planètes géantes sont toutes de l'ordre de la dizaine d'heures (la période de Pluton est de 6 jours et 9 heures). La mesure des périodes propres des planètes et satellites a mis en évidence le phénomène de «résonance spin-orbite», c'est-à-dire l'existence d'un rapport simple entre les périodes orbitales et les périodes propres, par exemple 2/3 pour Mercure et Vénus ou 1/1 pour la Lune et les satellites galiléens de Jupiter. Cette résonance est une conséquence des phénomènes de marées.

5. L'ASTRONOMIE ET LA LUMIÈRE

5.1. Romer et les satellites de Jupiter

D'Aristote à Descartes (1596-1650) [19], la plupart des physiciens pensaient que la lumière se propageait instantanément. Galilée avait cherché en vain à mesurer la vitesse c de la lumière à partir du temps mis par la lumière pour parcourir une distance de quelques kilomètres : ce temps n'ayant pu être détecté et la précision des mesures étant de

l'ordre de $1/10^6$ de seconde, $c > 100$ km/s. Pour que l'expérience réussisse, il aurait fallu utiliser la distance Terre-Lune ! Descartes puis Huygens (1629-1695) considérèrent les éclipses de Lune : si la lumière met le temps t pour aller de la Terre à la Lune, une éclipse doit être observée à l'instant $2t$ après un alignement Soleil-Terre-Lune ; des observations astronomiques, on peut estimer $t < 10$ s et par suite $c > 30\,000$ km/s.

La vitesse de la lumière fut finalement obtenue de manière inattendue à partir d'observations astronomiques [20], [21], [22]. L'astronome danois Romer (1644-1710) remarqua une irrégularité, d'amplitude 15 secondes et de période un an, de la périodicité (égale en moyenne à 42.5 heures) des éclipses de Io, le satellite intérieur de Jupiter. Il comprit que ces irrégularités étaient liées au déplacement de la Terre sur son orbite et calcula que, par rapport aux dates observées lorsque la Terre et Jupiter étaient en opposition, les éclipses étaient en retard de 22 minutes lorsque les deux planètes étaient en conjonction.

En 1676, Romer interpréta ce résultat en supposant que la vitesse c de la lumière était *finie*, le retard représentant le temps mis par la lumière pour traverser l'orbite terrestre (les orbites de la Terre, de Jupiter et de Io sont pratiquement coplanaires). Combattue par Hooke et Cassini, cette interprétation fut admise par Huygens et Newton. De la valeur de la distance TS donnée par Cassini et Richer, Huygens déduisit que c est de l'ordre de 215 000 km par seconde (600 000 fois la vitesse du son, mesurée par Mersenne en 1636). Puis Halley montra que le retard n'était que de 17 minutes, soit 1 000 secondes, d'où une valeur de c proche de la valeur actuellement admise : 300 000 km/s.

Sommerfeld a remarqué que l'effet Doppler, découvert en 1845 par le physicien autrichien Doppler (1803-1853), fournit une interprétation simple de la méthode de Romer [23], [24] : la période apparente de Io augmente quand la Terre s'éloigne de Jupiter et diminue quand elle s'en rapproche, elle n'est égale à la période vraie que si les deux planètes sont en conjonction ou en opposition.

5.2. Bradley et l'aberration des étoiles

La parallaxe d'une étoile, même proche de la Terre, est inappréciable si on utilise comme base de triangulation le diamètre de la Terre, mais elle peut le devenir si on utilise le diamètre de l'orbite terrestre en observant à six mois d'intervalle sa direction par rapport aux étoiles lointaines fixes. Ptolémée, puis Copernic et Tycho-Brahé, avaient

cherché en vain à mettre en évidence cette parallaxe annuelle des étoiles, phénomène (prévu par Aristarque) lié à la *position* variable de la Terre sur son orbite. Au début du XVIII^e siècle, la précision des mesures de position étant de l'ordre de 1', la distance minimale des étoiles était estimée à quelques jours-lumière. Cependant Huygens puis Cassini, Newton et Euler avaient donné des estimations plus réalistes de la distance des étoiles en admettant que Sirius et le Soleil étaient des étoiles semblables et en comparant leurs brillances.

C'est en cherchant à mettre en évidence le mouvement parallactique des étoiles que l'anglais Molyneux découvrit l'aberration annuelle, phénomène qui masque la parallaxe annuelle [25]. Molyneux pensait que la position apparente d'une étoile devait décrire, dans un plan parallèle à celui de l'écliptique, une orbite elliptique reflétant l'*orbite* terrestre : il constata avec surprise que l'orbite observée était une ellipse disposée à angle droit de l'orbite attendue, et ne dépendait pas de la distance supposée de l'étoile observée, mais seulement de sa position par rapport au plan écliptique.

Son compatriote Bradley (1693-1762) interpréta correctement cette observation en 1728 : la direction apparente d'une étoile varie au cours d'une année non par un effet de perspective mais parce que la *vitesse* v_T de la Terre sur son orbite, de direction variable, se compose avec la *vitesse*, finie, de la lumière émise par l'étoile ; l'orbite elliptique décrite par la position apparente de l'étoile reflète l'*hodographe* du mouvement terrestre. L'angle d'aberration, sous lequel on voit le grand axe de l'hodographe, est égal à v_T/c . De sa mesure, $20'' = 10^{-4}$ rd, Bradley déduisit une valeur de c en bon accord avec celle de Huygens, puisque $v_T = 30$ km/s (il ne put apprécier l'aberration diurne, 60 fois plus faible : $0.3''$ à l'équateur). Il vérifia du même coup que c ne dépend pas de la source lumineuse.

5.3. La distance des étoiles

Après sa découverte de l'aberration, Bradley prouva que la parallaxe d'une étoile est au plus de $1''$: la distance d'une étoile à la Terre est donc au minimum d'une année-lumière et le système solaire est très isolé du reste de l'univers, ce dont on se doutait puisque les étoiles n'influencent pas le mouvement des planètes. Mais la distance des étoiles ne fut déterminée avec précision qu'à partir de 1824, par l'astronome russe Struve [26] (1793-1864), puis en 1838 par l'allemand Bessel (1784-1846) et en 1839 par l'écossais Henderson (1798-1844). Ils obtinrent pour les étoiles les plus proches une parallaxe de $0.1''$, soit

une distance de l'ordre de 10 années-lumière ou 500 000 unités astronomiques. La mesure de la parallaxe permet d'apprécier les distances stellaires jusqu'à environ 300 années-lumière : au-delà, il faut utiliser la photométrie.

Signalons que c'est en recherchant la parallaxe des étoiles, suivant une méthode préconisée par Galilée, que Herschel découvrit, en 1782, l'existence des étoiles doubles (il décela aussi, en 1783, le mouvement propre du Soleil). Il utilisait deux étoiles voisines d'intensités très différentes, la plus faible étant supposée très éloignée, et cherchait un déplacement de la plus brillante : il constata avec surprise que souvent le mouvement relatif des deux étoiles était elliptique.

5.4. Les preuves des mouvements de la Terre

La découverte de l'aberration des étoiles par Bradley fut capitale : elle constitua la première preuve de la réalité de la révolution de la Terre autour du Soleil, et en même temps confirma la validité de la théorie de Romer et l'estimation de la vitesse de la lumière faite par Huygens. La mise en évidence de la parallaxe des étoiles est une autre preuve de la réalité du mouvement orbital de la Terre.

Rappelons que c ne fut mesurée par des expériences terrestres qu'en 1849 par Fizeau (1819-1896) (méthode de la roue dentée) et en 1850 par Foucault (1819-1868) (méthode du miroir tournant). Les mesures plus précises qui ont suivi (Michelson, 1926) ont permis une meilleure connaissance de la distance Terre-Soleil à partir de la constante d'aberration.

Galilée avait cherché sans succès à démontrer la rotation de la Terre à partir de l'existence des marées [27]. En 1679, Newton avait proposé de tester la réalité de la rotation diurne de la Terre en recherchant une déviation vers l'est de la chute d'un corps. Après divers essais peu concluants (Hooke, 1679 ; Guglielmini à Bologne, 1791 ; Benzenberg à Hambourg, 1802-04), Reich observa en 1831 une déviation de la chute des corps vers l'est, soit quelques centimètres pour une chute de 158 mètres, en bon accord avec les calculs théoriques de Gauss et Laplace (1803) : des expériences plus rigoureuses ont été effectuées en 1902 par Hall à Harvard et en 1903 par Flammarion au Panthéon. Hagen en 1912, puis Gianfranceschi en 1913, ont observé la déviation vers l'est à l'aide d'une machine d'Atwood. La rotation diurne de la Terre a été prouvée de manière plus spectaculaire en 1850 par l'expérience du pendule de Foucault - suivie en 1852 de l'expérience du gyroscope - et, en 1925,

par son analogue optique, l'expérience de Michelson-Gale [23] : la rotation du plan d'oscillation du pendule avait déjà été observée en Italie vers 1650, mais non interprétée, par Viviani (1622-1703), un élève de Galilée.

5.5. L'astronomie et l'éther

L'étude de l'aberration des étoiles a contribué à l'émergence des théories relativistes [28]. Selon la théorie ondulatoire développée par Huygens et Fresnel, la lumière se propage à la vitesse c dans l'éther, milieu imbibant la matière et possédant des propriétés difficiles à concilier : une très grande rigidité, et une résistance non détectable au mouvement des planètes. Il était nécessaire de prouver l'existence de l'éther et de préciser le mouvement de la Terre par rapport à lui. Si l'éther est entraîné par la Terre, la lumière émise par une étoile s'y propage sans être influencée par le mouvement de l'étoile : l'aberration stellaire n'est donc compréhensible que si l'éther est *fixe par rapport aux étoiles*.

En 1810, Arago avait observé que la déviation des rayons lumineux issus d'une étoile par un prisme était la même que celle des rayons issus d'une source terrestre, quelle que soit l'orientation du prisme par rapport à la vitesse de la Terre [29] : tout se passait ici comme si l'éther était *entraîné par la Terre*. Fresnel interpréta ce résultat par une théorie de l'entraînement partiel de l'éther par les corps transparents, vérifiée expérimentalement en 1851 par Fizeau [30]. Cette théorie expliqua également l'expérience d'Airy (suggérée auparavant par Fresnel) qui, en 1871, obtint la même valeur que Bradley pour l'angle d'aberration en utilisant un télescope rempli d'eau, et les résultats négatifs de celles de Høek (1868) et de Maxwell (1868), visant à mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à l'éther.

En 1879, Maxwell proposa de mesurer la vitesse du système solaire par rapport à l'éther en étudiant les éclipses de Io à 6 ans d'intervalle (la période de Jupiter est de 12 ans). Mais seule une vitesse supérieure à 150 km/s pouvait être détectée à partir des données, peu précises, disponibles à l'époque. Finalement l'expérience très précise de Michelson et Morley (1881) obligea à renoncer au concept d'éther stationnaire par rapport aux étoiles et contribua à l'émergence de la théorie de la relativité restreinte. Notons que l'aberration des étoiles découle simplement de la cinématique relativiste et n'est donc pas contradictoire avec le principe de relativité : ce n'est pas la vitesse absolue de la Terre à un instant donné qui est mise en évidence dans le phénomène, ce sont les variations de direction de sa vitesse quand elle parcourt son orbite.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. P. BAYLIN : «*Le système solaire : activités supports en classe de troisième*», B.U.P. n° 766, 1215 (juillet 1994).
- [2] P. COUDERC : *Histoire de l'astronomie classique*, Que Sais-je n°165, PUF (1955).
- [3] H.-N. SWENSON : «*The homocentric spheres of Eudoxe*», Am. J. Phys. 31, 456 (1963).
- [4] A.-P. FRENCH : *Newtonian Mechanics*, Norton, New-York (1971).
- [5] R.-W. BREHME : «*New look at the Ptolemaic system*», Am. J. Phys. 44, 506 (1976).
- [6] J.-C. PECKER : «*Retour sur Copernic, Képler, Bessel et les parallaxes*», L'Astronomie (mars 1974).
- [7] L. BOTTINELLI et M. GERBALDI : «*Les mouvements dans l'univers*», B.U.P. n° 614, 1057 (mai 1979).
- [8] A. RICCI : «*Problème d'astronomie pour Robinson Crusæ*», B.U.P. n° 577, 41 (octobre 1975).
- [9] D.-H. BRUNING : «*Determining the Earth-Moon distance*», Am. J. Phys. 59, 850 (1991).
- [10] A. ACKER et C. JASCHEK : *Astronomie : méthodes et calculs*, Masson, Paris (1981).
- [11] J. EVANS : «*The probable origin of Ptolemy's equant*», Am. J. Phys. 52, 1080 (1984) et D. RAWLINS : «*Ancient heliocentrists, Ptolemy and the equant*», Am. J. Phys. 55, 235 (1987). Voir aussi C. FLAMMARION : *Astronomie Populaire*, livre IV, Flammarion, Paris (1955).
- [12] D.-R. MARTIN : «*Status of the Copernician theory before Kepler, Galileo and Newton*», Am. J. Phys. 52, 982 (1984).
- [13] J. SIVARDIERE : «*Kepler ellipse or Cassini oval ?*», Eur. J. Phys. 15, 62 (1994).
- [14] C.-W. PETRESON : «*On Romer and navigation by the moons of Jupiter*», Am. J. Phys. 55, 103 (1987). Voir aussi Am. J. Phys. 54, 9 et 583 (1986).
- [15] C. WILSON : «*How did Kepler discovered his laws*», Scientific American 236, 92 (mars 1972) et K. MIZAR : «*Johannes Kepler*», B.U.P. n° 640, 421 (janvier 1982).
- [16] A. VAN HELDEN : *Measuring the universe : cosmic dimensions from Aristarchus to Halley*, University of Chicago Press (1985).

- [17] S.-L. JAKI : «*The early history of the Titius-Bode law*», Am. J. Phys. 40, 1014 (1972). Voir aussi M. NEITO : Am. J. Phys. 53, 22 (1985).
- [18] L.-J. TOMLEY : «*Bode's law and the missing moons of Saturn*», Am. J. Phys. 47, 396 (1979) et J. FEITZINGER et R. NEUHAUSER : «*A la recherche de satellites inconnus*», La Recherche 20, 945 (juillet 1989).
- [19] J.-G. BURKE : «*Descartes on the refraction and the velocity of light*», Am. J. Phys. 34, 390 (1966).
- [20] S.-G. BRUSH : «*The role of history in the teaching of physics*», The Physics Teacher 7, 271 (mai 1979).
- [21] C. KITTEL, W.-D. KNIGHT et M.-A. RUDERMAN : *Mechanics, Berkeley Physics Course*, McGraw Hill, New-York (1962). Voir le chapitre 10.
- [22] A. WROBLEWSKI : «*De Mora Luminis*», Am. J. Phys. 53, 620 (1985).
- [23] A. SOMMERFELD : *Lectures on theoretical physics*, vol. IV Optics, Academic Press, New-York (1954).
- [24] V.-M. BABOVIC et coll. : «*The Doppler interpretation of Romer's method*», Am. J. Phys. 59, 515 (1991).
- [25] A.-B. STEWART : «*The discovery of stellar aberration*», Scientific American 210, 100 (mars 1964).
- [26] J.-C. PECKER : «*A propos des parallaxes stellaires*», L'Astronomie (mai 1975).
- [27] G. HOLTON : *Introduction to concepts and theories in physical science*, deuxième édition p. 154, Addison-Wesley, Reading (1973).
- [28] A.-P. FRENCH : *Special Relativity*, Norton, New-York (1968).
- [29] R.-S. SHANKLAND : «*The Michelson-Morley experiment*», Am. J. Phys. 32, 16 (1964).
- [30] J. ROSMORDUC, «*L'expérience de Fizeau*», B.U.P. n° 632, 841 (mars 1981).