

II. SCIENCES PHILOSOPHIQUES ET SOCIOLOGIQUES

Philosophie de la connaissance

M. Jules VUILLEMIN, professeur

Le cours du *lundi* a porté sur les futurs contingents et plus précisément sur les réponses données à l'argument dominateur.

Une correction importante a été apportée à l'analyse de l'argument dominateur qui avait été faite l'an dernier (voyez l'*Annuaire* pour 1977-1978, p. 403-419). La reconstruction qu'on a donnée de cet argument en se fondant sur un paradigme du *de Caelo* d'Aristote n'est satisfaisante que lorsqu'on admet avec la plupart des Anciens le principe de nécessité conditionnelle : « tant qu'une chose existe, il est impossible qu'elle n'existe pas ».

On a examiné les solutions de Diodore et de Cléanthe. L'exposé de la solution de Cléanthe a permis d'exposer le système de Duns Scot, qui paraît avoir été le premier philosophe à nier explicitement le principe de nécessité conditionnelle.

Faute de temps, on n'a pas pu faire état des solutions de Chrysippe, d'Epicure et de Carnéade. Celle d'Aristote avait été étudiée durant l'année 1976-1977.

L'ensemble de ces études sera rassemblé dans un livre : *Analyse des futurs contingents*.

Le cours du *mardi* a porté sur « Astronomie et métaphysique d'Eudoxe à Kepler ». On n'a traité, cette année, que de la période qui va jusqu'à Ptolémée.

I. « *Sauver les apparences* »

Dans une science où tout est en mouvement, la première difficulté est de passer de l'observation à l'observé. Cette difficulté admet trois degrés principaux, selon le genre de « réalité » qu'on oppose aux apparences.

1) On oppose l'apparence à ce qui est caché. Une hypothèse de premier degré est requise pour passer de celle-là à celui-ci.

a) L'identification d'une étoile circumpolaire se fait grâce à trois constatations (ces étoiles se déplacent en bloc pendant la nuit, en conservant leurs positions relatives ou figures ; l'étoile polaire est fixe ; les déplacements circumpolaires sont des cercles concentriques parcourus à une vitesse apparente (angulaire) uniforme de 15° à l'heure) et à une hypothèse, en vertu de laquelle on prolonge pendant le jour le mouvement observé la nuit.

b) L'identification d'une étoile qui se lève et se couche est moins aisée. Plus les étoiles sont éloignées du pôle, plus grande est la partie de leur trajectoire cachée à l'observateur et moins le cercle discerné est haut sur l'horizon, en sorte qu'il est moins facile de reconnaître la partie visible de la trajectoire comme arc de cercle. L'hypothèse consiste ici à supposer qu'une trajectoire presque droite est l'apparence d'un arc de cercle, quand la trajectoire visible est petite, le rayon du cercle étant imaginé comme grand. Cette hypothèse est toutefois soutenue par la régularité dans la réapparition des étoiles et par un principe régulateur regardant l'usage des hypothèses et en vertu duquel on fait bien de conserver et de généraliser l'hypothèse acceptée pour les étoiles circumpolaires.

Le principe de conservation permet de donner à la seconde hypothèse la forme suivante : les étoiles qui se lèvent et se couchent se meuvent comme font les étoiles circumpolaires d'un mouvement circulaire uniforme.

En conséquence des deux premières hypothèses, on affirmera qu'il y a un seul mouvement des étoiles fixes. L'hypothèse redresse donc l'apparence. On assimile des morceaux de trajectoires d'apparence rectiligne à des arcs de cercle pour satisfaire à l'exigence d'unité systématique imposée aux apparences.

2) On oppose l'apparence au propre ou au principe.

Si l'identification d'une planète est chose simple pour le Soleil et la Lune, encore qu'il soit difficile d'identifier leur trajectoire, elle ne l'est plus pour les autres planètes. La difficulté tient ici au caractère composé de l'apparence. L'hypothèse intervient pour décomposer l'apparence en principes, en mouvements propres, simples. En vertu du principe régulateur de conservation, on posera que ces mouvements propres élémentaires, dont la superposition

doit donner les apparences planétaires sont encore des mouvements circulaires uniformes.

Pythagore énonce ainsi les hypothèses suivantes : la Terre est sphérique, les étoiles se meuvent en bloc d'un mouvement diurne circulaire et uniforme, le mouvement solaire résulte de la superposition de deux mouvements circulaires uniformes : le premier, dirigé d'Orient en Occident, autour des mêmes pôles et dans le même temps que la rotation diurne des étoiles (cerce parallèle à l'équateur), le second, dirigé d'Occident en Orient autour de pôles différents (suivant le cercle de l'écliptique dont le plan est incliné sur celui de l'équateur). Il est probable, enfin, que Pythagore généralise aux autres planètes l'hypothèse faite pour expliquer le mouvement solaire.

3) On oppose l'apparence comme illusion à une apparence vraie ou phénomène. Cette dernière opposition n'a de sens que pour qui distingue les apparences observées d'une station mobile relativement au système et ce qui serait observé d'une station immobile relativement au système. Cette distinction a dû être faite par Aristarque. Elle domine l'astronomie de Copernic. L'astronomie l'a communiquée à la philosophie critique et a inspiré au XVIII^e siècle et ensuite les théories phénoménologiques (Leibniz, Lambert, Kant), qui définissent un phénomène comme la figure ou la trajectoire vraie qui correspond à une suite d'apparences observées d'une station dont la situation ou le mouvement obéit à telle loi donnée.

II. *Le problème astronomique et l'astronomie métaphysique*

Platon a exprimé avec exactitude le problème astronomique tel que les hypothèses de Pythagore l'avaient imposé au génie grec. Simplicius nous en rapporte la formulation : « Platon admet en principe que les corps célestes se meuvent d'un mouvement circulaire, uniforme et constamment régulier [c'est-à-dire constamment de même sens] ; il pose alors aux mathématiciens ce problème : Quels sont les mouvements circulaires et parfaitement réguliers qu'il convient de prendre pour hypothèses, afin que l'on puisse sauver les apparences présentées par les astres errants ? » Platon détermine cette question par deux conditions particulières : 1) le centre de tous les mouvements astronomiques est la Terre, immobile ; 2) il faut exposer le système des mouvements en l'illustrant « par des images qui parlent aux yeux » (Pierre Duhem, *Le système du monde*, Paris, Hermann, 1954, t. I, p. 103-106).

Cette dernière condition est remplie dans les nombreux planétaires de l'Antiquité. Sur une remarquable construction imitant la machinerie du monde à la Tour des vents d'Athènes : Joseph V. Noble et Derek de Solla Price, *The Water Clock in the Tower of Winds* (Amer. Journal of Archaeology, 72 (1968), 345-55).

Le problème platonicien spécifie la nature de l'astronomie antique, qui est métaphysique et se distingue à la fois de l'astronomie arithmo-empirique des Babyloniens et de l'astronomie positive de Kepler. L'astronomie babylonienne, fondée sur de longues suites d'observations, est capable de prédictions et de calcul (découverte du Saros, prédiction des éclipses) ; elle ignore tout mécanisme susceptible d'expliquer les régularités observées. L'astronomie grecque dispose d'une théorie géométrique, de laquelle sont déduites des prédictions qu'on peut confronter aux observations (A. Comte, *Cours de philosophie positive*, t. I, 5^e éd., Paris, Au siège de la société positiviste, 1893, p. 17). Mais l'astronomie reste métaphysique tant qu'elle soustrait son hypothèse principale : le caractère uniforme et circulaire des mouvements composants des apparences à toute révision. Le passage à l'ère positive ou keplerienne exigera précisément la mise en question de cette hypothèse (Comte, p. 140). En revanche, la même conception métaphysique admet aussi bien l'hypothèse géocentrique qu'héliocentrique ou que semi-héliocentrique.

III. *Les systèmes des sphères homocentriques*

Les astronomes reconnaissent immédiatement que la formulation pythagoricienne du problème astronomique est trop étroite et incompatible avec les apparences. 1) Il y a anomalie apparente du mouvement du Soleil ; le *Papyrus d'Eudoxe* assigne pour 432 avant J.-C. les durées suivantes aux saisons : printemps : 93 jours, été : 90 jours, automne : 90 jours, hiver : 92 jours. 2) L'anomalie apparente du mouvement des planètes produit des effets plus curieux encore : stations et rétrogradations. Les hypothèses pythagoriciennes et platoniciennes tirent leur force de la précision des contraintes qu'elles imposent (une quatrième observation suffit, en effet, pour infirmer l'hypothèse d'une trajectoire circulaire). L'irrégularité observée des saisons montre qu'« il s'en faut de beaucoup que la marche [du Soleil dans sa circulation annuelle] se fasse avec une vitesse invariable » (Duhem, I, p. 107).

1) Le mécanisme eudoxéen

Pour expliquer les changements de vitesse apparents dans les mouvements planétaires, Eudoxe introduit deux hypothèses : a) Chaque astre errant est fixé à un point sur le grand cercle d'une sphère qui tourne avec une vitesse uniforme autour de l'axe de rotation perpendiculaire à ce cercle. Une telle sphère, unique, suffit pour rendre compte du mouvement des étoiles fixes. b) Le mouvement de cette première sphère se combine avec le mouvement, toujours uniforme, d'autant d'autres sphères qu'il faudra, disposées de la façon suivante. Les pôles de la sphère à laquelle est fixée la planète ne sont pas fixes, mais se meuvent eux-mêmes d'un mouvement uniforme qui

décrit le grand cercle d'une sphère plus grande et concentrique, à son tour uniformément mobile autour de deux pôles différents. Le même mécanisme est reproduit avec une troisième sphère pour le Soleil (supposé ne pas suivre exactement l'écliptique) et la Lune, et même avec une quatrième sphère pour les planètes. Tous ces mouvements sont indépendants. Par exemple, pour la Lune, la sphère extérieure, qui tourne d'est en ouest en 24 heures, explique le mouvement diurne. La sphère intermédiaire, qui tourne d'est en ouest en 18 ans 11 jours autour d'un axe qui fait un angle de $23^{\circ} 1/2$ avec l'axe polaire explique la régression des nœuds de l'orbite lunaire sur l'écliptique. La sphère intérieure qui porte la Lune et tourne d'ouest en est en 27 jours $1/5$ sur un axe faisant un angle de 5° avec celui de la sphère intermédiaire explique la durée du mois draconique et la déviation jusqu'à 5 degrés de l'orbite lunaire par rapport à l'écliptique. Dans le cas des planètes, la combinaison des mouvements de la troisième et de la quatrième sphères détermine une hippopède ou lemniscate sphérique (sorte de huit); le mouvement de la seconde sphère déplace la lemniscate le long de l'écliptique, une boucle se trouve étirée et figure la phase longue du mouvement direct, l'autre est comprimée pour figurer la rétrogradation.

L'attribution malencontreuse d'une troisième sphère au Soleil s'explique probablement, comme Paul Tannery l'a supposé (*Mém. de la Soc. des Sc. phys. et nat. de Bordeaux*, V₂, *Seconde note*, p. 142-146; *Recherches sur l'histoire de l'astronomie ancienne*, Gauthier-Villars, 1893, p. 173) par la connaissance encore vague du phénomène de la précession des équinoxes.

2) Les corrections de Callippe et le système d'Aristote

Le système d'Eudoxe entrainait en conflit avec les observations en ce qui regarde les mouvements de Mars et de Vénus et les anomalies du Soleil et de la Lune. Callippe reprit les observations et ajouta les sphères nouvelles propres à sauver les apparences. La seule innovation introduite par Aristote est l'introduction des sphères « ramenantes »; les sphères étant pour lui des corps physiques, le problème était de lier tous les groupes de sphères en empêchant le mouvement des sphères extérieures de se transmettre aux sphères intérieures (voyez J. L. E. Dreyer, *A History of Astronomy from Thales to Kepler*, 2^e éd., Dover, N. York, 1953, p. 112-113). Cette addition n'a cependant pas de signification physique au sens où elle impliquerait une interprétation proprement dynamique des mouvements célestes (voyez le Commentaire de St Thomas, *In Metaphysicorum Aristotelis*, 258 C, p. 602).

3) Evolution comparée de la métaphysique et de l'astronomie
des sphères homocentriques

La théorie idéaliste de Platon ne parvient pas à expliquer, quand le Démonstrateur combine et imite les deux idées du même (sphère des fixes) et de l'autre (sphère du mouvement sur l'écliptique), la détermination, pour les corps célestes, du nombre de leurs mouvements. D'où la critique de Platon par Eudoxe (Aristote, *Métaphysique*, Λ , 8, 1073^a 13-22) : l'idée n'explique pas l'être sensible, car celui-ci peut se multiplier indéfiniment, l'idée restant une. Elle est en dehors de ce divers. Il faut donc rendre sensible l'idée.

C'est ce programme qu'Eudoxe réalise en éthique, en fixant dans le plaisir le souverain bien (Aristote, *Ethique à Nicomaque*, χ , 2, 1172^b 9-26), en mathématique où il définit implicitement la proportion dans le seul contexte des grandeurs sensibles et non par des axiomes explicites au sens de Pythagore et de Platon (Euclide, *Eléments*, L.V), enfin en astronomie où l'observation nous dit le nombre, la direction, l'inclinaison, la vitesse des mouvements.

Aristote (*Métaphysique*, Λ , 9, 991^a 16-19, M, 5, 1079^b 13-23) objecte à Eudoxe que si l'idée reste une substance en étant immanente au sensible, alors une substance réside dans une autre substance. Mais, de l'immanence de idées, peut-on conclure que le sensible est une substance qui abrite l'idée, autre substance ? Le logos reste une idée, définissable de façon seulement implicite, par les contraintes qu'il fait peser sur les grandeurs. Le plaisir est le bien « parce qu'on voit que tout être (sensible), doué ou non de raison, se dirige par lui ; mais le désiré est bon et ce qui est le plus désiré est le meilleur ». Or Bien et Désirable sont réciproques selon Aristote (1072^a 35-36). Le plaisir, signe du Désirable, l'est aussi du Bien. L'idée du Bien n'est déterminante que par le plaisir qu'elle suscite. L'idée du mouvement circulaire uniforme n'est déterminante que par les trajectoires observées.

L'idée sensible eudoxéenne est un mode, qualifié par *l'inessence* ; il faut, en effet, qu'étant abstrait le mode « soit dans » et « soit conçu dans » une substance. Platon laissait ouverte la question de la réalité des orbites (Duhem, I, p. 106). Il est probable qu'Aristote décide ontologiquement la question et qu'il pense ainsi déterminer le nombre des corps célestes, tandis que la doctrine d'Eudoxe ne déterminait que le nombre de leurs modes (Aristote, *Métaphysique*, Λ , 8, 1073^a 23-1073^b 17 ; W. D. Ross, *Aristotle's Metaphysics*, Oxford, Clarendon Press, 1948, I, p. CXXXV-CXXXVIII).

IV. *Elimination des sphères homocentriques et passage aux systèmes héliocentriques antiques*

1) Elimination des sphères homocentriques

En dépit de son hostilité à l'idée d'une infirmité des théories par les observations, Duhem écrit : « l'Astronomie des sphères homocentriques ne résolvait pas, ne pouvait pas résoudre le problème posé par Platon ; elle ne savait pas, elle était condamnée à ne jamais sauver la totalité des apparences célestes » (I, p. 399). L'historien du *Système du monde* est en contradiction avec l'auteur de la *Théorie physique*.

Un texte de Sosigène, rapporté par Simplicius (Duhem, I, p. 400-402), énumère les raisons de l'élimination :

a) Les variations de distance des astres errants sont manifestes : Vénus et Mars changent d'éclat, le diamètre apparent de la Lune varie de 11 à 12 fois une certaine grandeur, les éclipses centrales du Soleil sont tantôt totales et tantôt annulaires.

b) La vitesse variable des astres errants s'explique si, la Terre n'étant pas au centre, les distances sont variables. A la différence du précédent, cet argument dépend de l'hypothèse fautive par laquelle on suppose l'uniformité réelle du mouvement circulaire.

2) Les hypothèses d'Héraclide du Pont

Il suppose :

a) Que la Terre tourne sur elle-même ; ce mouvement réel explique l'illusion qui nous fait croire au mouvement diurne de la sphère des fixes.

b) Vénus et Mars tantôt dépassent le Soleil et tantôt sont dépassés par lui, mais ont même vitesse moyenne que lui. Héraclide les fait circuler sur un épicycle solaire dans un temps égal à la durée de leur révolution synodique. Par construction, jamais Vénus et Mars ne s'écartent du Soleil d'un angle supérieur à l'angle qui a son sommet au centre de la Terre et dont les côtés sont tangents à l'épicycle solaire. Cette hypothèse sauve les apparences concernant les changements qualitatifs dans la vitesse et l'éclat de ces deux planètes.

Schiaparelli, Tannery, Duhem (I, p. 410) croient qu'Héraclide aurait étendu aux planètes supérieures l'hypothèse héliocentrique. Doutes de Dreyer (p. 133 sq., p. 145).

3) Le système d'Aristarque

Archimède (*Opera*, Heiberg, II, p. 218-221) a rapporté les hypothèses d'Aristarque : fixité absolue de la sphère des fixes, fixité absolue du

Soleil qui est au centre de cette sphère, mouvement annuel circulaire de la Terre autour du Soleil.

Ces hypothèses sont liées à un changement dans la représentation des dimensions de l'Univers. Aristarque oppose à l'univers le monde, limité par l'orbite du Soleil (Dreyer, p. 137). Pour que les étoiles fixes n'aient pas de parallaxe, il faut que le rayon de la sphère des fixes ait au rayon de l'orbite terrestre un rapport immensément grand. Pour tous les systèmes héliocentriques ou tendant à l'héliocentrisme l'univers est infini ; c'est ce que pose Héraclide (Dreyer, p. 123), et c'est ce que pose Seleucus (Duhem, I, p. 423 ; Dreyer, p. 141). La distinction entre monde et univers sera l'un des effets principaux de la révolution copernicienne (A. Comte, p. 132, qui va jusqu'à mettre en doute le caractère universel de la gravitation, hors de notre système solaire, p. 194-197).

On ne s'étonnera donc pas de voir Aristarque estimer le rapport des distances de la Lune et du Soleil à la Terre (Comte, p. 74-75) par une méthode ingénieuse mais erronée du fait de la difficulté qu'on rencontre à fixer à quel moment la Lune est à moitié pleine.

Trois raisons expliquent le peu de succès des systèmes héliocentriques dans l'Antiquité : 1) la sous-estimation grossière de la distance des étoiles comparée à celle des planètes fait de l'absence de parallaxe une objection irrésistible ; 2) les mouvements des corps terrestres, dont on ne voit pas qu'ils sont entraînés par le mouvement de la Terre, n'indiquent pas un tel mouvement (Ptolémée, *Almageste*, I, 7) ; 3) les planètes ne se distinguaient plus par leur nature de la Terre qui se trouverait mobile comme elles.

Ce dernier argument mérite examen. Il est avancé par le Stoïcien Cléanthe, encore que ce philosophe n'admette par la coupure établie par Aristote entre les substances éternelles des astres et les substances corruptibles du monde sublunaire. C'est que, même pour les adversaires du Stagirite, la perfection du mouvement circulaire uniforme, le seul à être immatériel, c'est-à-dire dépourvu de contradiction, éternel et continu, se communique aux substances dont il est le mode. Nulle représentation n'a plus fait pour gêner la naissance de l'idée de gravitation universelle.

V. Les systèmes d'Hipparque et de Ptolémée

Hipparque a conçu un catalogue d'étoiles. Il a mis en rapport les anomalies de vitesse du Soleil et de la Lune avec les variations supposées des distances à la Terre que manifestent leur changement d'éclat. Il découvrit la précession des équinoxes.

Il retint le mécanisme de l'épicycle. Il introduisit le mécanisme de l'excentrique pour expliquer les anomalies de vitesse du Soleil.

Ptolémée perfectionna le système d'Hipparque et étendit ses explications aux mouvements planétaires. Il introduisit l'équant, situé par rapport au centre de l'excentrique à une distance égale à celle de la Terre par rapport à ce centre ; vue de l'équant, la vitesse de rotation de l'excentrique est uniforme, ce qui permet de rendre compte des variations de vitesse en trichant avec les termes du problème platonicien.

1) Le problème de l'équivalence des hypothèses

Héraclide avait introduit le mécanisme de l'épicycle pour sauver les apparences du mouvement des planètes inférieures. Hipparque utilisait le mécanisme de l'excentrique pour expliquer l'anomalie dans la marche annuelle du Soleil. Entre ces deux hypothèses, les géomètres grecs n'avaient pas tardé à démontrer qu'il y a équivalence. Ptolémée attribue (*Almageste*, XII, 1) à Appollonius cette découverte.

Duhem la restitue de la façon suivante (I, p. 437-441) :

a) Théorème général. Dans le système déférent-épicycle, R sera le rayon du cercle déférent, D, \rightarrow , le sens de sa rotation (par exemple d'ouest en est, la flèche de sens inverse \leftarrow indiquant que la rotation a lieu d'est en ouest) et ξ le temps pour une rotation complète ; ρ sera le rayon du cercle épicycle, e, \rightarrow le sens de sa rotation, et σ le temps pour une rotation complète. On a donc supposé que le sens de la rotation est identique pour le déférent et l'épicycle. On montre alors qu'à ce système est équivalent le système de l'excentrique tel que ρ est le rayon du cercle δ qui tourne sur lui-même dans la même direction, soit \rightarrow , que les directions précédentes et dans le temps τ , tandis que R est le rayon de l'excentrique E, de centre mobile sur δ , et qui tourne dans la direction contraire, soit \leftarrow , dans le temps σ , les temps ξ , σ et τ étant liés par l'équation :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\xi} + \frac{1}{\sigma}$$

Ecrivons cette conversion du système épicycle S_1 et du système excentrique S_2 :

$$S_1 = \langle \langle D(R), \rightarrow, \xi \rangle, \langle e(\rho), \rightarrow, \sigma \rangle \rangle$$

$$S_2 = \langle \langle \delta(\rho), \rightarrow, \tau \rangle, \langle E(R), \leftarrow, \sigma \rangle \rangle$$

Lorsque, dans le système S_1 , déférent et épicycle tournent en sens contraire, la conversion s'écrit :

$$S_1 = \langle \langle D(R), \rightarrow, \xi \rangle, \langle e(\rho), \leftarrow, \sigma \rangle \rangle$$

$$S_2 = \langle \langle \delta(\rho), \leftarrow, \tau \rangle, \langle E(R), \rightarrow, \sigma \rangle \rangle$$

avec l'équation :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\xi} - \frac{1}{\sigma} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\sigma} - \frac{1}{\xi}$$

selon que la durée de révolution zodiacale ξ est plus grande ou plus petite que la durée de révolution synodique σ .

b) Théorème spécial. Quand ces deux durées sont égales, on a la conversion :

$$\begin{aligned} S_1 &= \langle \langle D(R), \rightarrow, \xi \rangle, \langle \varepsilon(\varrho), \leftarrow, \xi \rangle \rangle \\ S_2 &= \langle \langle \text{excentricité} = \varrho, \text{centre de l'excentrique fixe} \rangle, \\ &\quad \langle E(R), \rightarrow, \xi \rangle \rangle \end{aligned}$$

A un déférent et un épicycle tournant dans le même temps ξ en des directions contraires correspond un excentrique, tournant en ξ dans la direction du déférent autour d'un centre fixe distant du centre du monde de ϱ .

L'équivalence des hypothèses est une donnée fondamentale de l'Astronomie métaphysique. On en a examiné trois conséquences importantes.

2) Première conséquence : Explication de l'anomalie simple de la Lune (Ptolémée, *Almageste*, IV, 5 et 11) et des stations planétaires dans l'hypothèse épicyclique et dans l'hypothèse excentrique (Ptolémée, *Almageste*, XII, chap. 1). Cette question est éclaircie dans Dreyer (p. 152-156) et dans R. Catesby Taliaferro (*Ptolemy, Copernicus, Kepler, Great Books of the Western World*, Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952, p. 391-393).

3) Deuxième conséquence : Hypothèse concernant l'ordre de formation de théories astronomiques antiques.

On a vu comment Héraclide donnait la raison pour laquelle les centres des épicycles de Mercure et de Vénus sont portés par le rayon-vecteur qui joint la Terre au Soleil. Pour les planètes supérieures, le rayon-vecteur qui joint la Terre au Soleil est parallèle aux rayons vecteurs qui joignent le centre de chaque épicycle à la planète qu'il porte. En d'autres termes,

$$\frac{1}{\text{Année}} = \frac{1}{\xi} + \frac{1}{\sigma}$$

Cette remarquable relation entrée durée de révolution zodiacale et durée de révolution synodique de Mars, Jupiter et Saturne est inconnue d'Eudoxe (Duhem, I, p. 447). Elle est, en revanche, citée en passant comme une chose connue de tous, par Ptolémée (*Almageste*, IX, 3), sous une forme un peu différente, à savoir :

$$N = n + v$$

où N est le nombre des périodes du mouvement solaire, n celui du parcours du déférent par le centre de l'épicycle et v celui du parcours de l'épicycle par la planète.

De ce texte, Tannery et Schiaparelli ont tiré la supposition qu'une pareille loi a été héritée d'un système qui la prenait pour hypothèse, c'est-à-dire du système héliocentrique. Cette hypothèse rationaliste est vraisemblable, encore qu'on puisse lui opposer qu'en l'absence de textes formels, on peut penser que Ptolémée est parvenu à ses « nombres » en accumulant les observations. Il est donc vraisemblable que l'équation des temps, relative aux planètes supérieures est un apport de la théorie héliocentrique. De plus, ceci tend à prouver que la théorie des excentriques et des épicycles est dérivée de cette hypothèse.

Poursuivant la suggestion de Tannery et Schiaparelli, Duhem (I, p. 448 *sq.*) suppose que l'inégalité des saisons a obligé les astronomes à renoncer aux épicycles et excentriques héliocentriques, en remplaçant le Soleil par un point géométrique abstrait autour duquel on le faisait tourner. Puis ces centres abstraits s'éparpillant dans l'espace, on aurait abouti aux systèmes d'Hipparque et de Ptolémée. Dans les transformations successives les théorèmes de conversion n'ont cessé de jouer leur rôle.

4) Troisième conséquence : Méthodologie des hypothèses

De l'équivalence des hypothèses astronomiques, Duhem a tiré des conclusions apologétiques : le système de Copernic est plus commode que celui de Tycho, il n'est pas plus vrai. Cette conclusion s'applique à toute théorie scientifique. Elle a été reprise par Quine, selon qui deux hypothèses, logiquement incompatibles, sont susceptibles de rendre compte du même ensemble des observations.

On a vu, pour l'élimination des théories homocentriques, que Duhem n'allait pas si loin. Bornons-nous donc à la question des hypothèses équivalentes.

Catesby-Taliaferro a clairement construit l'équivalence : 1) épicycle/excentrique mobile (*op. cit.*, p. 392). Dans l'hypothèse de l'épicycle, l'angle de distance apparente est égal à la somme de l'angle de longitude et de l'angle d'anomalie moins un certain angle α . Dans l'hypothèse de l'excentrique mobile, l'angle correspondant de distance apparente est égal à l'angle du mouvement du soleil moyen moins un certain angle, $\alpha' = \alpha$. Par l'équation des temps (qui revient à dire que la somme de l'angle de longitude et de l'anomalie est égale à l'angle du mouvement du soleil moyen), on conclut que les deux angles de distance apparente sont égaux. Donc les apparences sont également sauvées. Ici, la Terre était le centre du système, au sens de Ptolémée. On construit alors une seconde équivalence : 2) excentrique mobile/système de Copernic. La Terre se meut autour du centre de l'excentrique planétaire, avec la même vitesse qu'avait ce centre vers l'est à la vitesse du Soleil moyen, dans l'hypothèse de l'excentrique. Le

centre de l'excentrique planétaire sera le Soleil moyen. On suppose que la planète se meut autour du centre de l'excentrique à la vitesse du mouvement longitudinal. L'angle de distance apparente entre deux positions de la planète est encore égal à l'angle du mouvement du Soleil moyen moins un angle α'' égal à α' , de sorte que les apparences sont encore également sauvées.

Il y a donc équivalence des hypothèses au point de vue de la cinématique, d'ailleurs réduite aux changements angulaires. Cette équivalence autorise-t-elle les conclusions sceptiques du Duhem et de Quine ?

Ptolémée, lorsqu'il évoque l'équivalence (*Almageste*, I, VII), oppose à la plus grande simplicité cinématique de l'hypothèse d'Aristarque son absurdité physique. Toute la question est donc de savoir si, dans l'ensemble de toutes leurs conséquences, il n'y en aura aucune qui soit capable de décider entre deux théories « logiquement incompatibles ». Comte (p. 114-115) l'avait clairement noté : « En ôtant la Terre du centre de l'écliptique pour y mettre le Soleil, il suffit de placer la Terre en un point de cette orbite diamétralement opposé à celui qu'occupait le Soleil auparavant ; et dès lors, sans rien changer au sens du mouvement, l'observateur terrestre apercevra continuellement le Soleil dans la même direction que ci-devant. En regardant le mouvement annuel de la Terre comme n'altérant point le parallélisme de son axe de rotation, toute l'explication des phénomènes relatifs aux saisons et aux climats, étant reprise sous ce point de vue, donnera, évidemment, les mêmes résultats que dans l'ancien système. Tous les phénomènes les plus sensibles du ciel sont donc exactement les mêmes pour les deux hypothèses. Ainsi, c'est uniquement dans des comparaisons plus délicates et plus détournées, fondées sur des observations plus approfondies, qu'il faut chercher des motifs de prononcer entre elles, en considérant des phénomènes qui conviennent beaucoup mieux à l'une qu'à l'autre, ou même, comme on en a découvert, qui soient absolument incompatibles avec le système ancien, et mathématiquement en harmonie avec le système moderne ».

Or même sans considérer les phénomènes mécaniques, il n'y a pas équivalence *astronomique* d'hypothèses *cinématiquement* équivalentes. Que signifie, en effet, la plus grande simplicité, que Ptolémée reconnaît à l'hypothèse héliocentrique ? La seule signification objective qu'on puisse donner à ce mot tient à trois caractères, propres à décider astronomiquement de la préférence qu'on doit accorder à l'une de deux hypothèses par ailleurs équivalentes.

a) Premier caractère : il faut préférer l'hypothèse qui assure l'*unité* des apparences. Dans l'hypothèse ptolémaïque, la distinction entre planètes supérieures et inférieures est liée au fait contingent, c'est-à-dire à la donnée, indépendante de l'hypothèse, de deux sortes d'élongations : limitées ou illi-

mitées. Le mouvement et la place de la Terre, dans un système héliocentrique, rend cette distinction nécessaire ; elle en fait une conséquence de la théorie, qui en reçoit plus d'unité.

b) Second caractère : il faut préférer l'hypothèse plus *organique*, c'est-à-dire celle où des relations constantes sont déductibles au lieu d'être simplement observées. L'équation des temps, tant pour les planètes inférieures que pour les planètes supérieures, est une donnée pour Ptolémée, elle devient une loi pour Aristarque (voir V, 3° et Catesby-Taliaferro, p. 273 note 1).

c) Troisième caractère : il faut préférer l'hypothèse qui permet de déduire sans autre observation ce qu'une autre hypothèse ne pourrait poser qu'à l'aide d'une observation nouvelle (critère d'*infirmité* plus aisée de la théorie qui doit être préférée). Ainsi, dans la théorie héliocentrique et non dans la théorie géocentrique, on peut déduire les moyennes distances des planètes. Par exemple, pour Mars, les nombres ptolémaïques (Catesby-Taliaferro, p. 470) donnent : rayon de l'excentrique = 60, rayon de l'épicycle = 39 1/2. Le premier rayon représente la distance moyenne de la planète, le second la distance moyenne de la Terre par rapport au Soleil. Puisque, d'autre part, le rayon de l'excentrique solaire dans la table ptolémaïque est estimé à 60 ; on voit que :

$$\frac{\text{moyenne distance de Mars et du Soleil}}{60} = \frac{60}{39 \frac{1}{2}} = 1,5215$$

D'où :

$$\text{moyenne distance de Mars et du Soleil} = 91,14$$

(Catesby-Taliaferro, p. 473). La loi des temps et la déduction des moyennes distances des planètes au Soleil serviront de fondement aux recherches de Kepler.

VI. Sur l'obstacle à la découverte de l'idée de fonction dans l'Astronomie grecque

Les anciens ont-ils eu conscience de l'équivalence entre le mouvement circulaire uniforme et le mouvement d'un oscillateur harmonique ?

Un texte de l'*Almageste* (XIII, 2) permet de répondre systématiquement à la question (Tannery et Duhem, II, p. 234 sq.). Le problème est d'expliquer les oscillations de l'inclinaison du plan des épicycles planétaires sur le plan de leur excentrique, la variation de cette inclinaison étant périodique, de période égale à la durée de la révolution du centre de l'épicycle sur l'excentrique.

Partons de l'instant où le centre de l'épicycle est apogée, l'inclinaison de son plan étant maximum. L'intersection de deux plans est le diamètre D

de l'épicycle tangent à l'excentrique. Ptolémée appelle diamètre apogée la ligne de plus grande pente dans l'épicycle. Il fixe l'extrémité inférieure de cette ligne, I, à la circonférence d'un petit cercle auxiliaire, α , dont le centre est dans le plan de l'excentrique et dont le plan est normal au plan de l'excentrique. I se confond avec le point inférieur de α qui est le plus distant du plan de l'excentrique. L'intersection de α avec ce dernier plan soit D' est parallèle à D. α accompagne l'épicycle dans son mouvement sur l'excentrique en restant normal au plan de cet excentrique, et D' demeure dans ce plan. Au fur et à mesure que le centre de l'épicycle se déplace vers le nœud descendant, l'inclinaison de son plan diminue. Elle s'annule en ce nœud ; alors I se confond avec l'une des extrémités de D' : il a donc parcouru un quadrant de α . Puis le centre de l'épicycle se déplace vers le périégée. L'inclinaison de son plan croît à nouveau mais en sens contraire. Au périégée elle atteint son maximum négatif ; alors I se confond avec le point supérieur de α le plus distant du plan de l'excentrique. I a donc parcouru un second quadrant de α . Au nœud ascendant où l'inclinaison s'annule à nouveau, I coïncide avec la seconde extrémité du diamètre D'. Enfin, le mouvement se poursuit et au périégée I se confond avec la position inférieure sur α qui était la sienne au point de départ.

Il y a donc correspondance entre le mouvement circulaire de I sur α et l'oscillation de l'inclinaison de l'épicycle sur l'excentrique. L'oscillation n'est pas harmonique, puisque le mouvement circulaire de I, qui dépend de celui du centre de l'épicycle, n'est pas uniforme. Elle le devient cependant en première approximation, lorsqu'on suppose que le centre de l'équant vient se confondre avec le centre du mouvement.

Ptolémée a donné dans les *Hypothèses* une autre explication du même phénomène, qu'il jugeait moins compliquée.

La question est de savoir pourquoi la solution de l'*Almageste* ne l'a pas conduit à l'idée de fonction. C'est qu'il ne pouvait considérer un mouvement harmonique comme continu, car, en vertu des principes d'Aristote, un tel mouvement change de direction et participe donc de contraires « locaux », à la différence du mouvement circulaire qui a lieu constamment dans la même direction. L'équivalence cinématique n'est pas parvenue à vaincre la théorie métaphysique des deux sortes de mouvements locaux : mouvements circulaires propres aux substances simples, mouvements linéaires de haut en bas et de gauche à droite, propres aux substances composées et corruptibles.

VII. La question de l'approximation de la description des apparences en Astronomie antique

1. On appelle *épicycloïdes* les courbes trajectoires résultant du roulement d'un cercle de rayon r_2 autour d'un cercle de rayon R_3 à l'extérieur de

celui-ci, le roulement ayant lieu sans glissement. On obtient les *hypocycloïdes* quand le cercle de rayon r_2 est intérieur à R_3 .

La trajectoire est décrite par un point P lié au cercle de rayon r_2 mais à une distance r_1 de son centre. Le centre de l'épicycloïde r_2 se meut donc sur un cercle fixe de rayon $R = R_3 + r_2$ dans le cas de l'épicycloïde et $R = R_3 - r_2$ dans le cas de l'hypocycloïde. La figure est enfermée entre deux limites : un cercle inscrit de rayon $R_1 = R - r_1$ et un cercle circonscrit de rayon $R_2 = R + r_1$.

Les cas de figure sont déterminés par les relations entre R_1 , R_2 et R_3 .

$R_3 < R_1$: épicycloïde raccourcie (à bosses)

$R_3 = R_1$: épicycloïde à rebroussements

$R_3 > R_1$ et $R_3 < R_1 + \frac{R_2 - R_1}{2}$: épicycloïde allongée (à boucles intérieures)

$R_3 > R_1 + \frac{R_2 - R_1}{2}$ et $R_3 < R_2$: hypocycloïde allongée (à boucles extérieures)

$R_3 = R_2$: hypocycloïde à rebroussements

$R_3 > R_2$: hypocycloïde raccourcie.

2. On appellera *métacycloïde* ou courbe de Ptolémée la trajectoire dégénérée qu'on obtient pour $r_2 = 0$ $\left(R_3 = \frac{R_2 + R_1}{2} = R \right)$. Tandis que les courbes précédentes pouvaient être assignées sans tenir compte de la vitesse qui pouvait être irrégulière sur la trajectoire, ici le roulement sans glissement d'un cercle réduit à un point étant dépourvu de sens, les fonctions $\omega(t)$ et $\Omega(t)$, déterminant les vitesses de la planète sur l'épicycloïde et du centre de l'épicycloïde sur le déférent doivent être fixées pour que la trajectoire géométrique soit elle-même déterminée. L'imposition du caractère uniforme du mouvement permet de déterminer la trajectoire.

3. On peut définir de façon géométrique le problème d'approximation : trouver une épi-, hypo- ou métacycloïde coïncidant avec une ellipse donnée, soit de façon osculatrice, soit quel que soit le point de l'orbite elliptique. Seule cette seconde question offre un intérêt astronomique.

Seules peuvent être retenues :

- a) des hypocycloïdes « allongées » à deux boucles ;
- b) des épicycloïdes « raccourcies » à deux bosses ;
- c) les métacycloïdes.

Dans les deux premiers cas, on peut toujours vérifier la loi des aires en choisissant un mouvement approprié de roulement et on peut construire

des courbes qui ressemblent un peu à l'ellipse. Avec la métacycloïde, on peut décrire, *suivant qu'on choisit une loi $\omega(t)$ ou une autre*, n'importe quelle courbe, voire un carré (S. Toulmin et J. Goodfield, *The Fabric of the Heavens*, Harper, N. York, p. 142). La loi $\omega(t)$ sera fixée par la nécessité d'avoir une ellipse ; elle n'est pas généralement compatible avec l'uniformité ptolémaïque.

4. Les représentations par des métacycloïdes correspondent à l'observation vue de la Terre, la Terre étant proche du centre du déférent (J. C. Pecker, *La Méthode de Kepler est-elle une non-méthode ?* Quatrième centenaire de la naissance de Johannes Kepler, Société astronomique de France, p. 109-116). Le Soleil décrivant le déférent et le cercle épicycle une orbite terrestre, on obtient des métacycloïdes où le rayon de l'épicycle est celui de l'orbite terrestre, celui du déférent étant celui de l'orbite planétaire. C'est parce que les orbites sont à peu près circulaires et que la loi des aires et le mouvement uniforme y sont presque équivalents, que l'assimilation des orbites planétaires à des métacycloïdes a fourni une approximation.

5. On pourrait essayer de mesurer la valeur de cette approximation en la rapportant à la trajectoire keplerienne (roulement sans glissement d'une ellipse sur une ellipse). L'indétermination des distances dans l'astronomie antique ou leur assignation gratuite empêche toutefois de donner un sens précis à cette question. En ce sens, l'Astronomie antique et médiévale n'offre pas ce progrès dans l'approximation qui caractérise l'histoire d'une véritable science. (Je suis entièrement redevable pour ce dernier chapitre à M. J. C. Pecker.)

J. V.

PUBLICATIONS

— Notice nécrologique sur Martial Gueroult, Association amicale des anciens élèves de l'Ecole normale supérieure, 1977, p. 59-63.

— En collaboration avec G. Dreyfus, L. Guillermit et V. Goldschmidt, « Martial Gueroult », *Archiv für Geschichte der Philosophie*, 59. Band 1977, Heft 3, p. 289-312 [289-293].

— « Définition et raison : le paradigme des mathématiques grecques », *Actes du Congrès d'Athènes-Pélon d'octobre 1975*, Athènes, Hellenic Society for Humanistic Studies, 1977, p. 273-282.

— « Caractères et fonctions des signes », *Die Aktualität der Transzendental-Philosophie, Hommage à Hans Wagner*, Bouvier, Bonn, 1977, p. 93-119.

— « De la biologie à la culture », C.R. du livre de J. Ruffié, *Information sur les sciences sociales*, 1977, XVI-5, p. 621-632.

— *La puissance selon Aristote et le possible selon Diodore*, Manuscrito, Campinas, vol. 1, oct. 1977, p. 23-69.

— *De la philosophie analytique à l'idée d'un système critique*, Ist systematische Philosophie möglich ?, Stuttgarter, Hegel-Kongress 1975, hggeben von Dieter Henrich, Bouvier, Bonn, 1977, p. 327-339.

MISSIONS

Cours et conférences aux Universités de Campinas, São Paulo, McMaster, Halifax, Sherbrooke, Toronto, Yale et au Centre de recherches philosophiques de Buenos-Aires.

Participation aux colloques d'Ottawa (oct. 1977) et Dubrovnik (mars 1978).

Participation au Congrès mondial de philosophie de Düsseldorf (août 1978).