

## Évolution des trajectoires des planètes

Véronique Hauguel, Rouen, Pierre Causeret, Esbarres

À chaque époque correspond une recherche de cohérence et d'harmonie ontologique pour expliquer l'étrange ballet des astres. Après la justification mythologique (une barque chargée de ramener chaque nuit le Soleil vers l'est) on passe à la représentation géocentrique qui sauve mieux les apparences puis, laborieusement, à l'héliocentrisme. Dans tous les cas il convient de posséder un peu d'esprit de géométrie.

À partir du VI<sup>e</sup> siècle avant notre ère, ce sont les Grecs qui, les premiers, ont cherché à expliquer tous les phénomènes célestes. Auparavant, les explications étaient mythologiques ; par exemple, pour les Égyptiens, le Soleil était ramené par une barque vers l'est pendant la nuit après son coucher.

Il a fallu du temps pour que la Terre apparaisse comme une boule en équilibre dans le cosmos, univers ordonné. Anaximandre imaginait la Terre comme un cylindre isolé au centre de la sphère céleste et c'est probablement Pythagore le premier à avoir eu l'idée d'une Terre ronde comme une boule pour des raisons d'ordre philosophique plutôt que scientifique.

Les astronomes et géomètres grecs ont réussi à mettre en place un système remarquable pour expliquer les mouvements des astres avec des observations remontant seulement au VIII<sup>e</sup> siècle avant J.-C. (il semble qu'ils ne connaissaient pas de tablettes babyloniennes plus anciennes).

### Géocentrisme et héliocentrisme

On peut commencer à parler système à partir des travaux de l'école de Pythagore qui ont permis une première approche des trajectoires des 7 planètes.

Le terme de planète, qui signifie "astre errant", désignait les astres que l'on voit bouger régulièrement sur la voûte céleste, y compris la Lune et le Soleil, même si ces astres gardaient une place à part. Dans un ordre qui variera jusqu'à Hipparque avant de se stabiliser, on énonce la Lune, Mercure, Vénus, le Soleil, Mars, Jupiter et Saturne, de la plus proche à la plus lointaine.

Pythagore a recherché des lois harmonieuses et des analogies pour expliquer le monde et le mouvement des planètes (astronomie) à partir de formes régulières (géométrie), de nombres naturels (arithmétique) et de notes (musique).

« Les Pythagoriciens qui les premiers abordèrent ce genre de recherches sont partis de l'hypothèse que

les mouvements du Soleil de la Lune et des 5 planètes étaient circulaires et réguliers »<sup>1</sup>.

Cette recherche d'harmonie, d'équilibre, de perfection, de régularité et de symétrie guidera les travaux des astronomes jusqu'à Kepler.



Fig.1. Système géocentrique (cosmographie de Pierre Apian, 1544). La figure reprend le modèle de Platon avec les sphères contenant chacune une planète à l'intérieur du premier mobile (la sphère stellaire) centrées toutes sur la Terre immobile formée d'eau et de terre, entourée de feu puis d'air et enfin, au-delà de la Lune, d'éther. (Document BNF).

À partir de Platon, il s'agit, en plus, de « sauver les apparences ». Il faut donc trouver un modèle qui rende compte des observations.

Platon a-t-il choisi l'hypothèse de la Terre immobile au centre du monde pour des raisons philosophiques ou religieuses<sup>2</sup> ? Pour des raisons pratiques ? Il est vrai que le système où l'observateur, c'est à dire la Terre ou nous-mêmes, est à l'origine du repère est a priori plus simple et même plus naturel.

<sup>1</sup> Géménius, Introduction, 1<sup>er</sup> s. avant notre ère.

<sup>2</sup> Platon connaissait les hypothèses de l'école pythagoricienne.

Ce système géocentrique sera privilégié par tous les astronomes jusqu'au livre de Copernic. Cela ne veut pas dire que cette théorie était suivie par tous, comme nous le verrons par la suite<sup>3</sup>.

Mais Ptolémée, au II<sup>e</sup> siècle de notre ère, avait mis en place un tel degré d'ingéniosité et poussé à l'extrême la sophistication d'un modèle avec une précision si remarquable pour l'époque qu'il faudra 2 000 ans, bien après les travaux de Newton, pour que le système héliocentrique soit complètement reconnu.

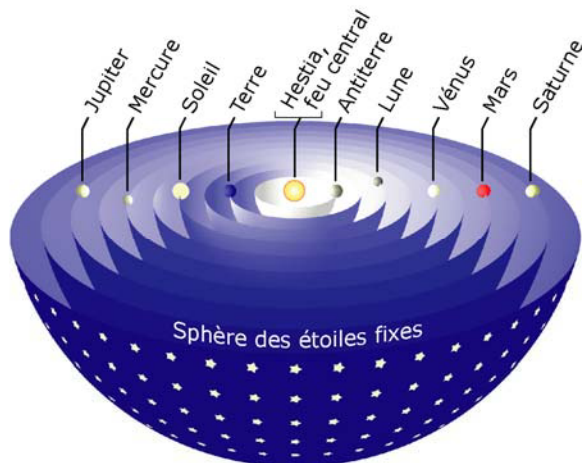
Il est intéressant de noter, qu'après la sortie du livre de Copernic présentant l'héliocentrisme, de nombreux traités (comme par exemple ceux d'hydrographes qui expliquaient la manière de naviguer aux étoiles) continuent à présenter le ciel de Ptolémée.

## Trajectoires avant Apollonius

### 1<sup>er</sup> système

#### Modèle de Philolaos de Crotonne (v.-470 ; v.-395)

Dans le système de Philolaos, pythagoricien du V<sup>e</sup> siècle avant notre ère, le monde est organisé autour d'un feu central, Hestia, au centre du cosmos, autour duquel gravitent 10 sphères de cristal séparées par des intervalles harmonieux. Sur chacune de ces sphères, en plus des 7 planètes des Grecs, il y a la Terre, une Antiterre (opposée à la Terre par rapport au feu central) et les étoiles fixes. Les astres renvoient la lumière du feu central.



**Fig.2.** Système de Philolaos composé de 10 sphères entourant Hestia, le feu central. L'Antiterre ainsi que le feu central nous sont invisibles car situés à l'opposé de la partie habitée de la Terre, l'æcoumène (partie gauche de la Terre sur la figure). La Terre montre la même face au feu central et tourne en 24 heures.

<sup>3</sup> Voir système 3 et 4, puis de Ptolémée à Copernic.

Le nombre de sphères célestes n'est pas un hasard. Elles sont 10, et 10 est la décade, nombre complet et symbolique, composé des 4 premiers chiffres, appelés tétrade car  $10 = 1 + 2 + 3 + 4$ .

Au siècle suivant, Platon « pose alors ce problème aux mathématiciens », d'après Simplicius, « quels sont les mouvements circulaires uniformes et parfaitement réguliers qu'il convient de prendre pour hypothèses, afin que l'on puisse sauver les apparences que les astres errants présentent ? »<sup>4</sup>.

Le cadre est alors fixé, la Terre est immobile au centre du cosmos et tous les modèles qui suivront iront en s'améliorant jusqu'à Ptolémée permettant un calcul de la position des planètes conforme aux observations<sup>5</sup>.

Il est marqué aussi par une définition mystique de l'univers qui imprégnera les esprits longtemps, l'univers fini se divisant en deux parties :

- le monde sublunaire, entre la Terre et la Lune, instable, incertain, altérable (ou monde de la génération et de la corruption) lié au mouvement rectiligne ;

- le monde supralunaire, au-dessus de la Lune, immuable, parfait, stable et éternel, lié au mouvement régulier et circulaire.

Aristote insistera sur les lois physiques différentes régissant chacun des deux mondes.



**Fig.3.** Pour Platon, les 5 polyèdres réguliers représentent chacun un corps élémentaire. Sur la figure, on trouve de gauche à droite : le tétraèdre (le feu), le cube (la terre), l'octaèdre (l'air), le dodécaèdre (l'éther), et l'icosaèdre (l'eau). (Crédit photo 123rf. Darius Turek).

### 2<sup>e</sup> système

#### Modèle d'Eudoxe de Cnide (-408, -355)

Dans le même temps, Eudoxe de Cnide, élève de Platon, met en place un système de 27 sphères homocentriques, sphères emboîtées autour de la Terre pour résoudre le problème de la rétrogradation, un des phénomènes liés à l'observation, jusqu'alors inexpliqué<sup>6</sup>.

Mais ce système n'explique pas les fluctuations d'éclat des planètes qui suggèrent une variation de l'éloignement des astres alors qu'ils sont ici toujours à la même distance de la Terre.

<sup>4</sup> Commentaire sur la physique d'Aristote, Simplicius (490-560)

<sup>5</sup> Pour les observations, voir page 9.

<sup>6</sup> Le modèle des sphères d'Eudoxe montre bien des rétrogradations pour Jupiter et Saturne mais il fonctionne mal pour Mars (pour les rétrogradations voir page 9).

Un mécanisme de 4 sphères est proposé pour chaque planète (voir figure) sauf pour la Lune et le Soleil qui en ont 3. La planète est située sur l'équateur de la sphère intérieure. L'axe de rotation de chaque sphère est solidaire de celle directement extérieure.

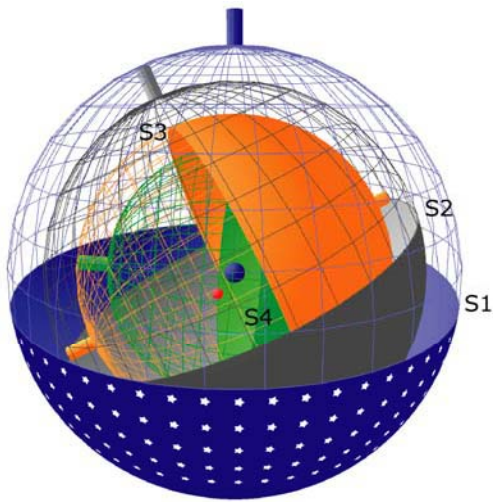


Fig.4. Mécanisme des 4 sphères d'une planète.

La sphère S1, sphère des fixes (en bleu) sert à reproduire le mouvement diurne, S2 en gris donne le mouvement moyen de la planète. S3 et S4, en orange et en vert, permettent de simuler les rétrogradations et les mouvements en latitude.

Pour un observateur situé sur la Terre (en bleu au centre), la sphère extérieure S1 tourne dans le sens direct autour de l'axe polaire en 24 heures, comme la voûte céleste. La sphère S2 dont l'équateur est dans le plan de l'écliptique tourne dans le sens inverse, en un an pour une planète inférieure (Mercure, Vénus) et en une période sidérale pour une planète supérieure (Mars, Jupiter, Saturne). La sphère S3 dont l'axe est dans le plan de l'écliptique, tourne selon la période synodique de la planète. La sphère S4 tourne dans le sens contraire, son axe faisant un petit angle avec celui de S3, qui dépend de la planète. C'est elle qui porte la planète (en rouge).

À ce système cinétique théorique, Aristote ajoute 29 sphères, ce qui donne un total de 56 sphères, pour répondre à une existence physique sans vide (sortes de sphères-engrenage) du système.

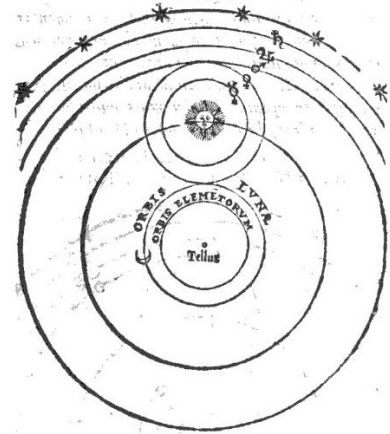
### 3<sup>e</sup> système

#### Modèle attribué à Héraclide du Pont (v.-388 ; v.- 310)

Héraclide, élève de Platon puis d'Aristote, aurait été le premier à soutenir que la Terre tourne sur elle-même en 24 heures pour expliquer le mouvement apparent des étoiles au cours de la nuit. Certains auteurs lui attribuent aussi la paternité d'un système qui fait tourner Vénus et Mercure autour du Soleil, la Terre restant au centre, pour expliquer leur proximité avec le Soleil. Ce système est une

première réflexion qui inspirera le 5<sup>e</sup> système des épicycles.

Fig.5. Représentation en 1573 par Valentin Naboth du modèle astronomique géohéliocentrique d'Héraclide transmis par Martianus Capella (au V<sup>e</sup> siècle de notre ère).



Par Valentin Naboth [Public domain], via Wikimedia

### 4<sup>e</sup> système

#### Modèle d'Aristarque de Samos (v.-310, v.-230)

C'est grâce à Archimède que l'on connaît les idées d'héliocentrisme d'Aristarque « Il [Aristarque] suppose que les étoiles fixes et le Soleil sont immobiles tandis que la Terre est emportée, autour du Soleil, le long d'une circonférence dont le Soleil occupe le centre, et d'autre part que la sphère des astres fixes, centrée sur le même centre du Soleil, est si grande que la circonférence sur laquelle la Terre est supposée se mouvoir est à la distance des étoiles comme le centre de la sphère est à sa surface »<sup>7</sup>.

Aristarque est donc bien un précurseur de Copernic. Mais ce même Archimède participe à le faire tomber dans l'oubli... Il lui reproche son manque de précision dans la « proportion » et sa critique de la physique d'Aristote, comme par exemple :

- comment un astre fait de feu, plus léger que la Terre pourrait être immobile ?
- si la Terre se déplace, on verrait des déformations angulaires dans les constellations ;
- si la Terre tournait sur elle-même, les objets non fixés s'envoleraient vers l'ouest.

Pour terminer, s'opposer au dogme de la Terre-divinité et du feu d'Hestia est un sacrilège. La force des préjugés fera le reste et Aristarque meurt isolé dans sa vision du monde.

Il faudra attendre 18 siècles pour en revenir là.

À la même époque, toujours à Alexandrie, un grand géomètre et astronome, Apollonius<sup>8</sup> de Perge met en place une nouvelle manière de résoudre le problème posé par Platon, l'astronomie circulaire, sans remettre en cause les sphères qui supportent les planètes. Son modèle sera amélioré par Hipparque puis par Ptolémée.

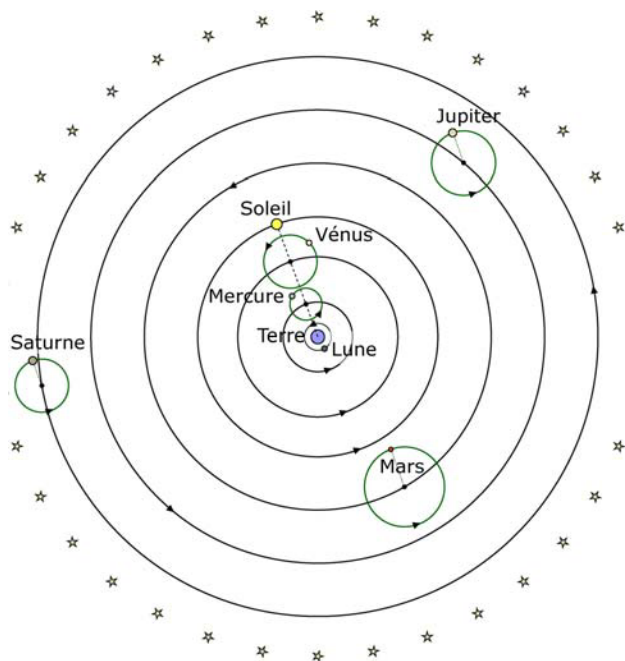
<sup>7</sup> Préface du traité *Arénaire*.

<sup>8</sup> Apollonius est célèbre pour ses écrits sur les coniques.

# Les épicycles

## 5<sup>e</sup> système (astronomie circulaire)

### 1- Apollonius de Perge (v.-262, v.-190)

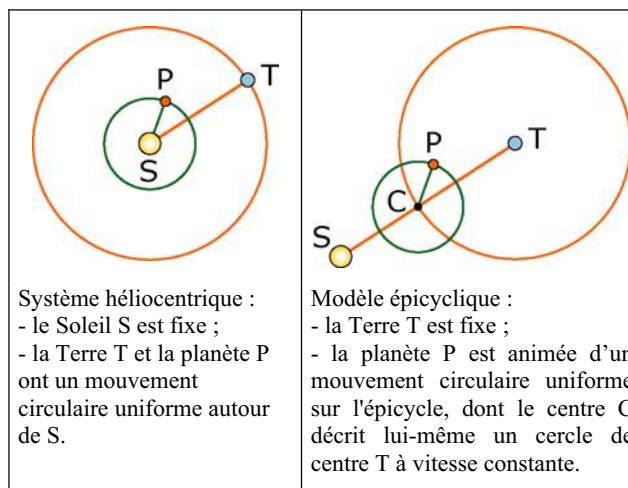


**Fig.6.** Le système des épicycles. Chaque planète se déplace sur un cercle (l'épicycle, en vert), dont le centre tourne autour de la Terre sur un autre cercle, le déférent. Pour les planètes inférieures, les centres des épicycles de Mercure et de Vénus sont alignés avec la Terre et le Soleil. Pour les planètes supérieures, la droite passant par le centre de l'épicycle et la planète est parallèle à la droite Terre – Soleil.

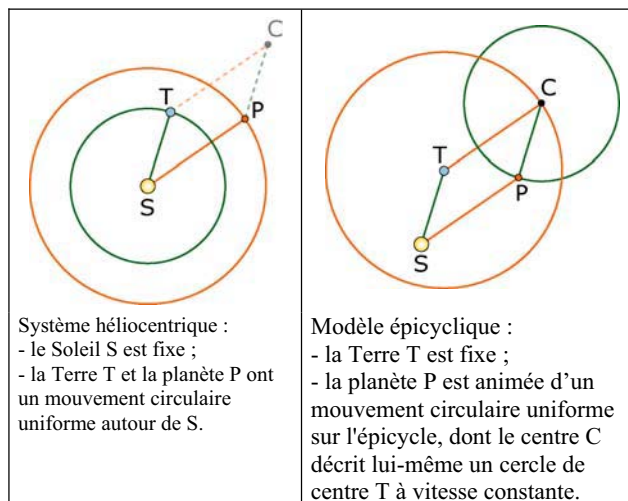
Ce modèle attribué à Apollonius explique les mouvements en y incluant les rétrogradations et les variations de luminosité des planètes<sup>9</sup>.

Cependant, dans ce système, chaque planète est dans le plan de l'écliptique (ce qui est faux en réalité) et seul le mouvement en longitude est pris en compte. De plus, le Soleil a une vitesse angulaire constante (ce qui est aussi faux) ; ce dernier problème sera résolu par Hipparque.

On peut montrer l'équivalence cinématique entre un système héliocentrique, celui d'Aristarque avec le Soleil au centre, et un système géocentrique à épicycles, celui d'Apollonius avec la Terre au centre (figures 7 et 8).



**Fig.7.** Équivalence entre le modèle héliocentrique et un épicycle pour une planète inférieure P comme Vénus. Pour passer de la figure de gauche à celle de droite, il suffit de changer de point fixe. Si on place le Soleil en C dans le modèle à épicycle, on obtient le modèle attribué à Héraclide du Pont (3<sup>e</sup> système). Le Soleil vu depuis la Terre est dans la même direction et l'équivalence avec le système héliocentrique est encore plus évident. Mais pour Apollonius et ses successeurs, le centre C de l'épicycle est situé entre la Terre et le Soleil.



**Fig.8.** Équivalence entre le modèle héliocentrique et un épicycle pour une planète supérieure P comme Mars. Sur la figure de gauche, on a ajouté un point C pour que SPCT soit un parallélogramme :  $\vec{SP} = \vec{TC}$ . Pour passer de la figure de gauche à celle de droite, il suffit de changer de point fixe.

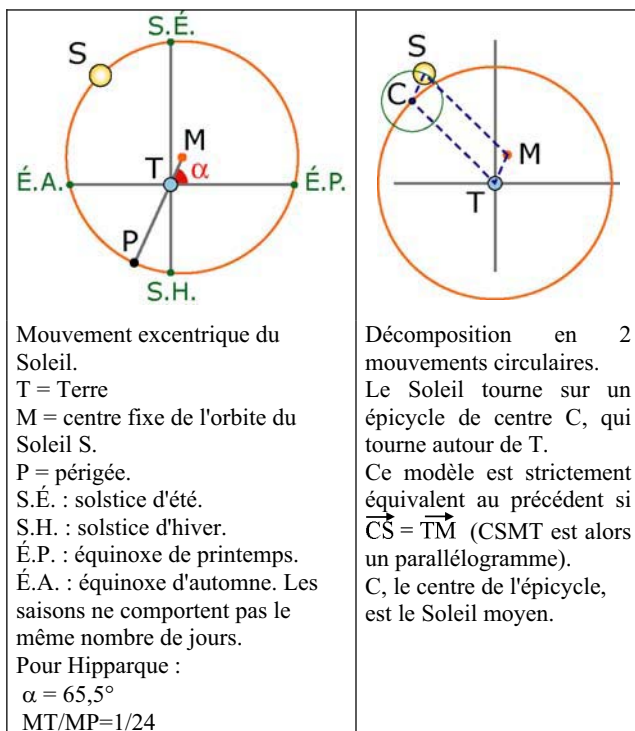
### 2- Hipparque (v.-190, v.-120)

Un siècle plus tard, Hipparque<sup>10</sup>, un des plus grands astronomes grecs, précise ce système. Il rend compte de la différence concernant la durée des saisons en faisant tourner le Soleil à vitesse constante sur un cercle qui n'est pas centré sur la Terre : c'est ce qu'on appelle un excentrique. On

<sup>9</sup> Voir page 9.

<sup>10</sup> Découvreur de la précession des équinoxes, inventeur de la trigonométrie plane (table des cordes), auteur d'un catalogue de 800 étoiles.

peut montrer simplement que ce modèle est équivalent à un modèle épicyclique, composition de deux mouvements circulaires uniformes dont un centré sur la Terre (figure 9).



**Fig.9.** Équivalence entre un excentrique et un épicycle pour le Soleil. On a la même équivalence entre les deux systèmes pour une planète.

L'équivalence excentrique – épicycle est aussi vraie pour une planète mais avec cette fois M mobile. Nous avons vu l'équivalence du système à épicycles avec le système héliocentrique (figures 7 et 8). Les trois systèmes présentés ici sont donc géométriquement équivalents.

Malgré ces remarquables améliorations<sup>11</sup> en utilisant seulement des mouvements circulaires uniformes centrés sur T, la Terre, Hipparque n'est pas arrivé à déterminer de manière satisfaisante les positions des planètes avec son modèle épicyclique.

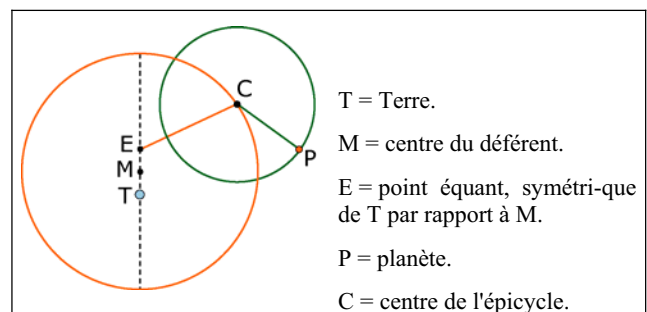
On peut se demander comment les mesures arrivaient à une telle précision connaissant les instruments peu précis de l'époque comme la sphère armillaire, le triquetrum et le quadrant, même ancrés dans le sol.

### 3- Claude Ptolémée (v.90, 168)

Plus de 3 siècles plus tard, dans la composition mathématique, appelée l'« Almageste », Ptolémée excentre l'orbite du Soleil comme Hipparque mais

<sup>11</sup> Hipparque utilise le Soleil moyen (point C de la figure 6) et non S dans le modèle épicyclique des planètes supérieures.

aussi le déférent de chaque planète. Le centre du déférent M n'est pas la Terre T. De plus, il utilise le point équant E, symétrique de T par rapport à M. Le centre de l'épicycle tourne à vitesse angulaire constante non plus autour de la Terre mais autour du point équant.



**Fig.10.** Mouvement des planètes pour Ptolémée. La planète P tourne à vitesse constante sur son épicycle. Le point C, centre de l'épicycle tourne sur le déférent mais c'est la vitesse angulaire autour de E qui est constante. Pour les planètes inférieures, le Soleil est aligné avec T et C (comme sur la figure 7b). Pour les planètes supérieures, la droite (CP) reste parallèle à la droite Terre – Soleil moyen (le Soleil moyen tournant à vitesse constante autour de la Terre).

Avec l'équant, Ptolémée améliore la précision de son modèle pour le mouvement en longitude des planètes.

Pour rendre compte du mouvement en latitude – de part et d'autre de l'écliptique, les planètes ne se déplaçant pas exactement sur l'écliptique – Ptolémée trouve une solution assez satisfaisante en mettant, pour chaque planète, épicycle et déférent dans 2 plans différents faisant un angle réglable par des petits cercles perpendiculaires au plan de l'écliptique. Mais, dans ce modèle, les plans des trajectoires des planètes ne passent pas par le Soleil.

Le point équant est une grosse entorse au mouvement circulaire régulier imposé par Platon et Aristote. Malgré cela, le modèle de Ptolémée va connaître une longue vie. Il ne sera détrôné qu'à partir de 1543 par le modèle héliocentrique de Copernic.

(À suivre...)

Des animations de ces différents systèmes seront prochainement disponibles sur le site du CLEA.

### Bibliographie

« Et pourtant elle tourne » de Jacques Gapaillard, 1993, éditions du Seuil, un excellent livre sur l'histoire des mouvements dans le système solaire.