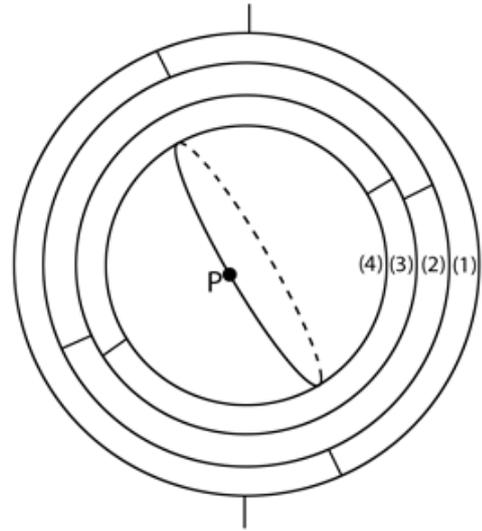
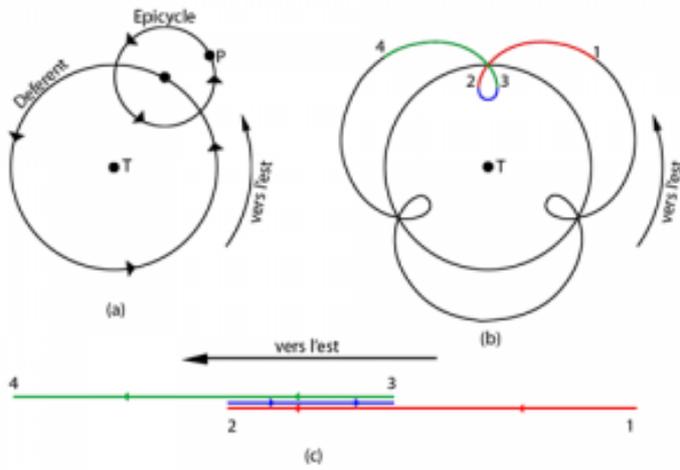


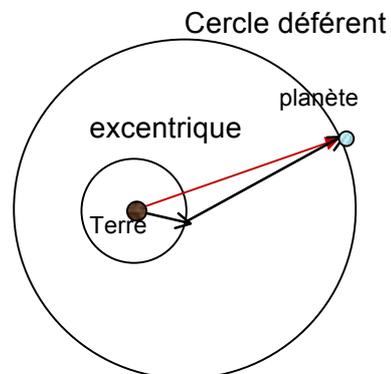
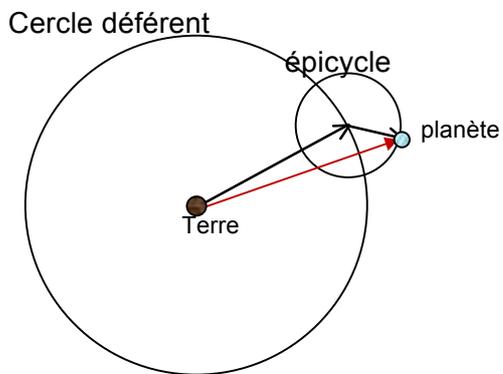
L'univers de Philolaos de Crotona

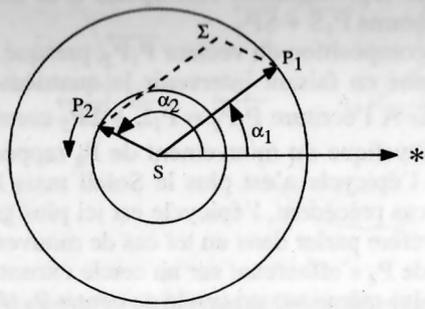


Les sphères d'Eudoxe

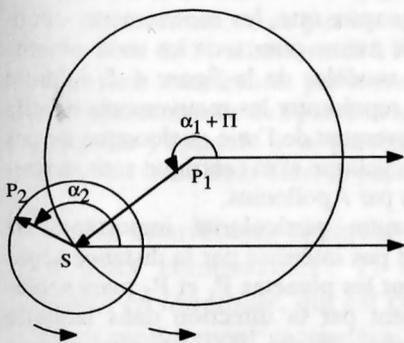


Combinaison d'un déferent et d'un épicycle

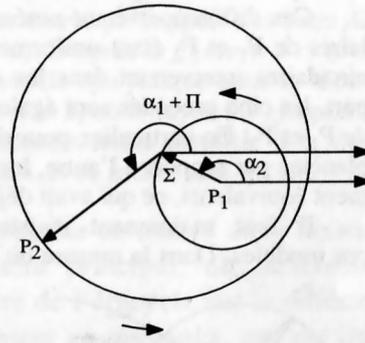




(a) *Mouvement héliocentrique de deux planètes P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>*

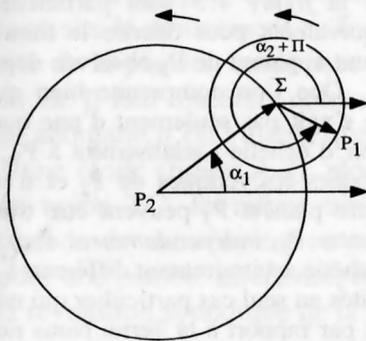


(b') *Modèle épicyclique*

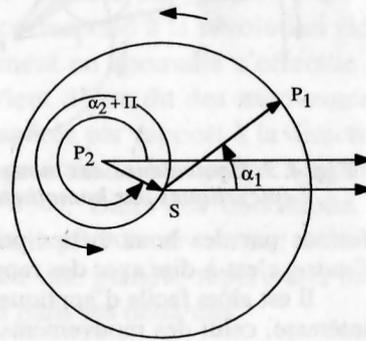


(b'') *Modèle excentrique*

(b) *Mouvement de P<sub>2</sub> rapporté à P<sub>1</sub>*



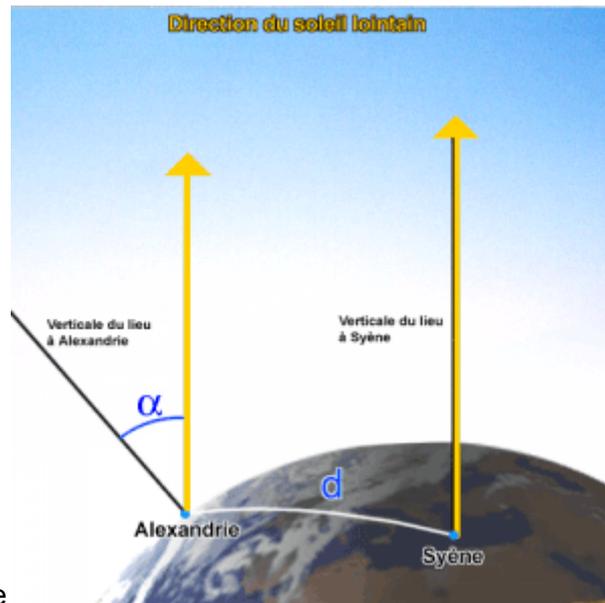
(c') *Modèle épicyclique*



(c'') *Modèle excentrique*

(c) *Mouvement de P<sub>1</sub> rapporté à P<sub>2</sub>*

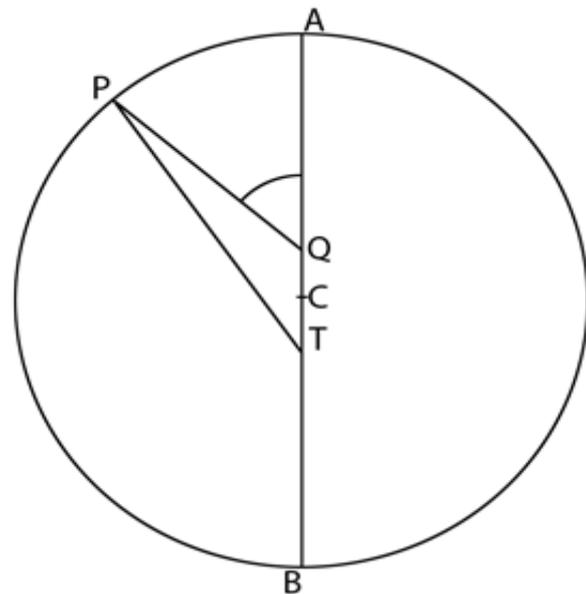
L



La mesure d'Eratosthène de Cyrène

## Introduction du point équiant pour le mouvement des planètes.

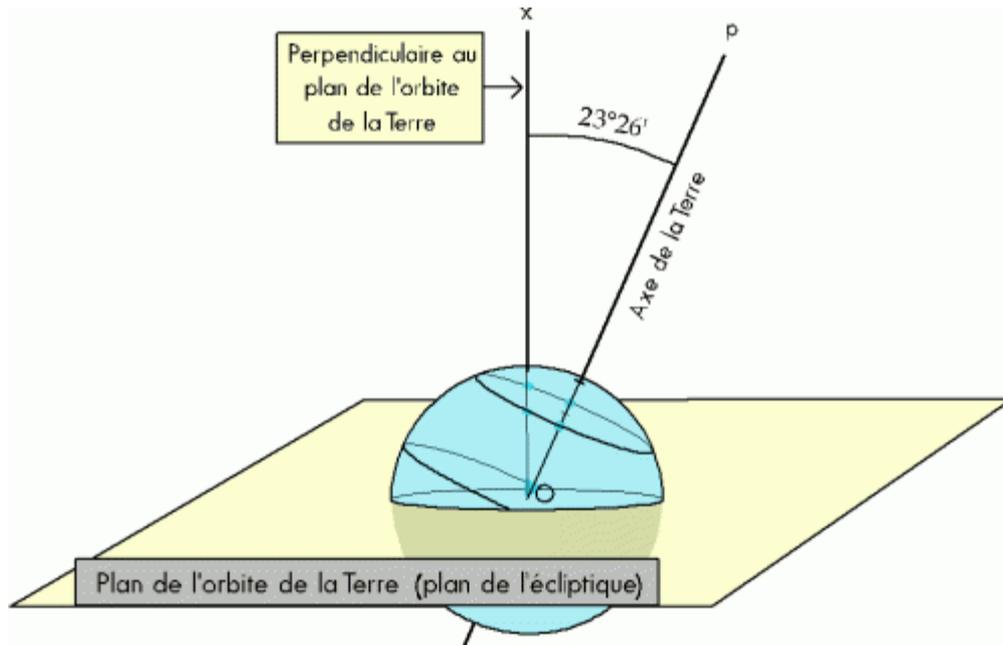
La planète P se meut sur un cercle excentrique de centre fixe C. T est la Terre. (Le centre du cercle C ne coïncide pas avec la Terre : le cercle est un excentrique) De plus, la planète se meut uniformément non pas par rapport à C, ni par rapport à la Terre, mais par rapport à un point Q (appelé point équiant) situé sur TCA de sorte que  $TC=CQ$ . La planète tourne de telle manière que l'angle PQA croisse uniformément, c'est-à-dire de quantité égale dans des temps égaux. (C'est donc l'angle AQP qui varie régulièrement en fonction du temps). Dans ce cas, bien que P demeure à la même distance du centre C, le point par rapport auquel le mouvement est uniforme est le point Q (point équiant). On peut donc parler de mouvement circulaire par rapport à C, et de mouvement uniforme par rapport à Q, mais on ne peut plus parler de mouvement circulaire uniforme. L'historien Jean-Pierre Verdet parle, à propos du point équiant, d'une « tricherie géniale », indiquant par là que Ptolémée parvient à conserver les exigences de mouvements circulaires et uniformes sans pourtant être totalement enfermé dans ce carcan théorique.



## Plan de l'écliptique

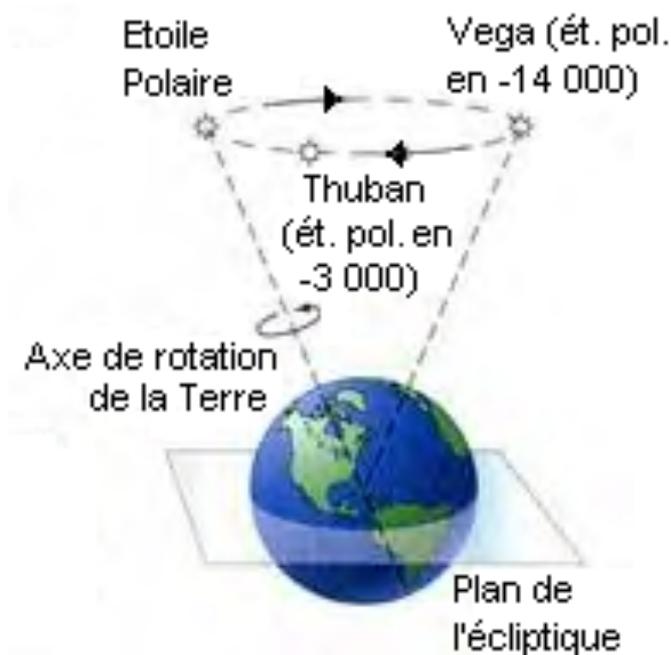
L'axe de la Terre fait un angle d'environ  $23,4^\circ$  avec la perpendiculaire au plan de l'écliptique.

C'est aussi l'angle que fait le plan de l'équateur avec le plan de l'écliptique.



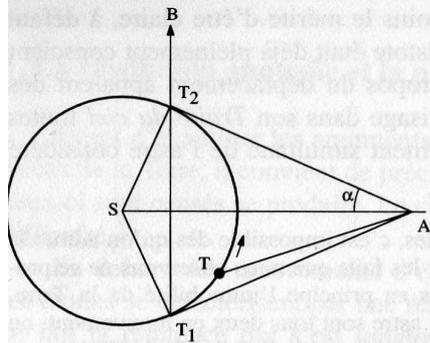
<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/divers/mouveter.html>

### Précession des équinoxes. Rotation de l'axe des pôles



La Terre tourne comme une toupie [très lente !] sur son axe d'où le changement graduel d'étoile Polaire - et donc aussi d'équateur céleste, d'où la précession des équinoxes. Un tour est bouclé en 26 000 ans environ.

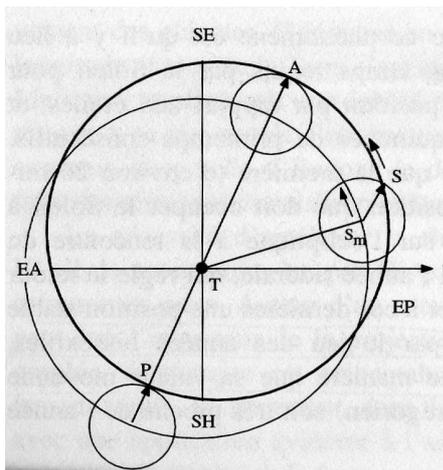
Les astronomes traditionalistes avaient de bonnes raisons d'être sûrs que ce phénomène de *parallaxe annuelle* des étoiles ne pourrait pas échapper à l'observation. Considérons en effet une étoile A que nous supposons dans le plan de l'écliptique (*figure 6.1*).



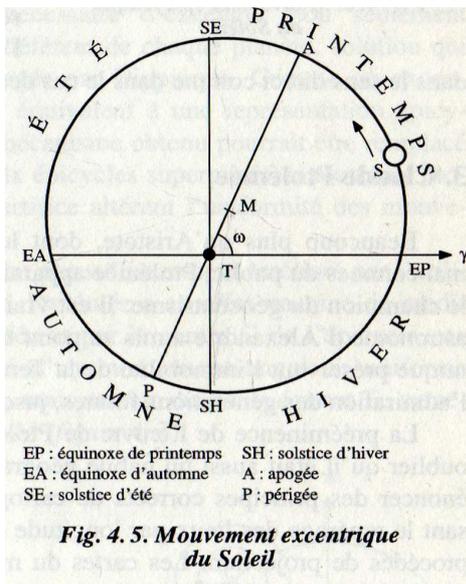
**Fig. 6.1. Parallaxe annuelle d'une étoile du plan de l'écliptique**

Si la Terre décrit une orbite circulaire centrée, en première approximation, sur le Soleil S, au cours de l'année la direction TA dans laquelle l'étoile est vue depuis la Terre T reste comprise entre celles des droites  $T_1A$  et  $T_2A$ . Ces deux directions extrêmes s'écartent de l'angle  $2\alpha$  tel que  $\sin \alpha = ST_2/SA$ . Or, selon Ptolémée, la distance moyenne de la Terre au Soleil vaut  $1210 R_T$  (où  $R_T$  est le rayon de la Terre), tandis que le rayon de la sphère stellaire mesure  $20\,000 R_T$ . Le sinus de l'angle  $\alpha$  vaut par conséquent  $1210/20\,000 = 0,0605$ , de sorte que l'angle  $\alpha$ , appelé *parallaxe*

de l'étoile A, est d'environ  $3^\circ 1/2$ . L'écart entre les directions  $T_1A$  et  $T_2A$  est donc proche de  $7^\circ$ . Il en résulte que l'angle sous lequel serait vu l'arc AB séparant A d'une autre étoile B approximativement située sur la droite  $T_1T_2$ , varierait



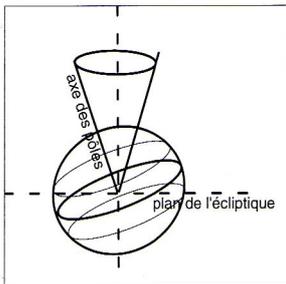
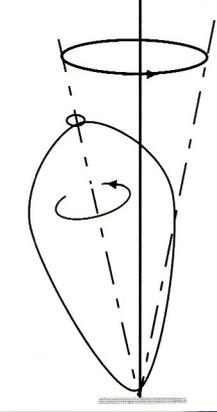
Soleil selon un épicycle



**Fig. 4.5. Mouvement excentrique du Soleil**

## Précession des équinoxes

Précession d'une toupie



Dans le mouvement annuel de révolution, le centre de la Terre et celui du Soleil se trouvent dans un même plan, celui de **l'écliptique**. Dans son mouvement de rotation diurne, la Terre tourne autour de l'axe des pôles, incliné de  $23^{\circ}27'$  par rapport à la perpendiculaire à l'écliptique. Il pointe actuellement en direction de l'étoile polaire - ainsi appelée justement parce qu'elle se trouve dans la direction du Pôle Nord terrestre, donc de l'axe de la Terre.

Or cet axe n'a pas toujours été dirigé vers cette étoile, et dans quelque temps, il sera dirigé vers d'autres points de la voûte céleste. Ce changement est dû à la précession.

On illustre habituellement ce phénomène par le mouvement d'une toupie qui tourne. L'axe de la toupie, fixe à un point du sol, décrit un mouvement conique appelé précession.

L'axe des pôles a le même mouvement conique que celui d'une toupie dont le sommet du cône serait situé au centre de la Terre. L'angle est d'environ  $47^{\circ}$ , c'est-à-dire deux fois l'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport à la perpendiculaire à l'écliptique. Le mouvement de précession de l'axe de la Terre est très lent, il faut environ 25.800 ans

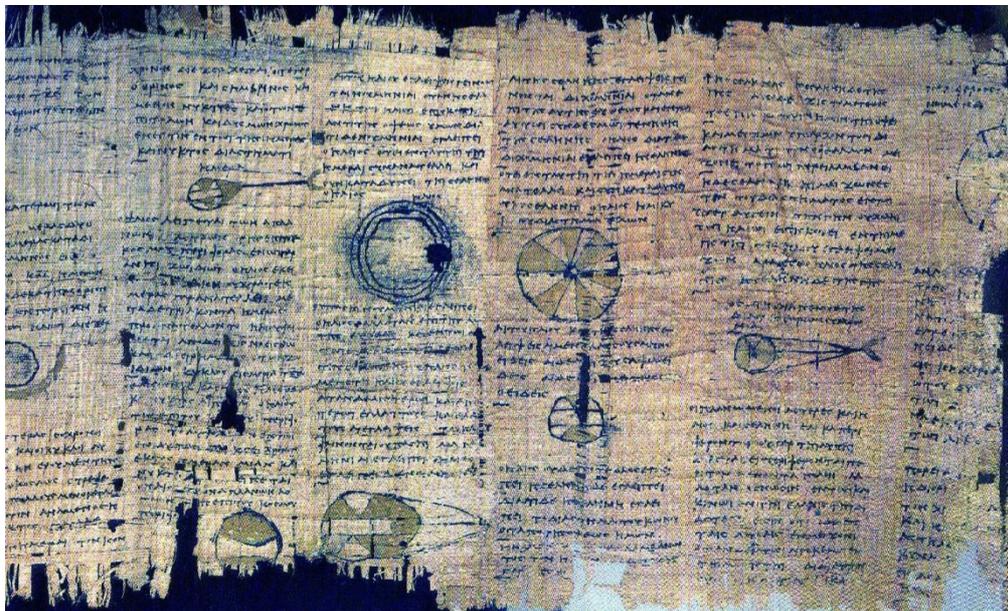
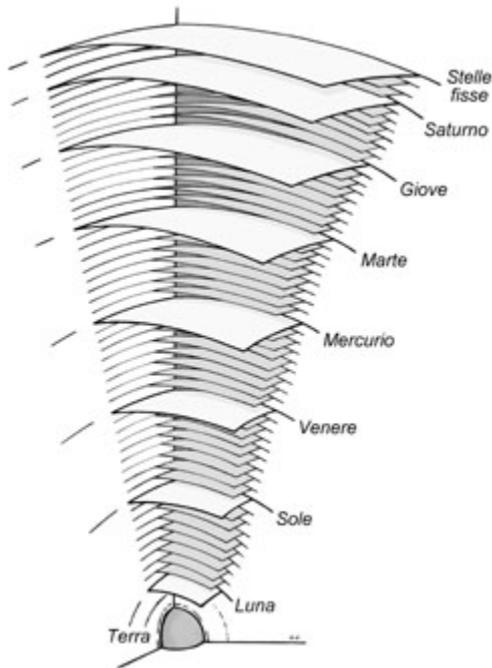
pour un tour complet. Comme dans un tour il y a  $360^{\circ}$ , l'axe de la Terre dérive d'environ 50 secondes d'arc par an. C'est ainsi que l'étoile "polaire" des Egyptiens était Alpha Draconis (Thuban) et dans 12.000 ans, la nouvelle étoile "polaire" se trouvera à peu près à l'opposé dans le ciel, en direction de Alpha Lyrae (Véga).

Hipparque se rendit compte de la précession par la dérive de la date des **équinoxes**, moments où pour toute la Terre le jour est égal à la nuit. Dans notre calendrier actuel ces dates sont le 21 mars et le 22 septembre. La Terre passe alors par deux points de son orbite : le premier, point Vernal ou équinoxe de printemps et le deuxième, équinoxe d'automne. En comparant ses propres dates d'équinoxes avec celles de deux astronomes du siècle précédent, Hipparque obtint pour l'équinoxe de printemps une dérive annuelle de 42 secondes d'arc par an pour l'une, et de 58 pour l'autre.

Ce résultat est impressionnant : la moyenne entre les deux est bien de 50 secondes !

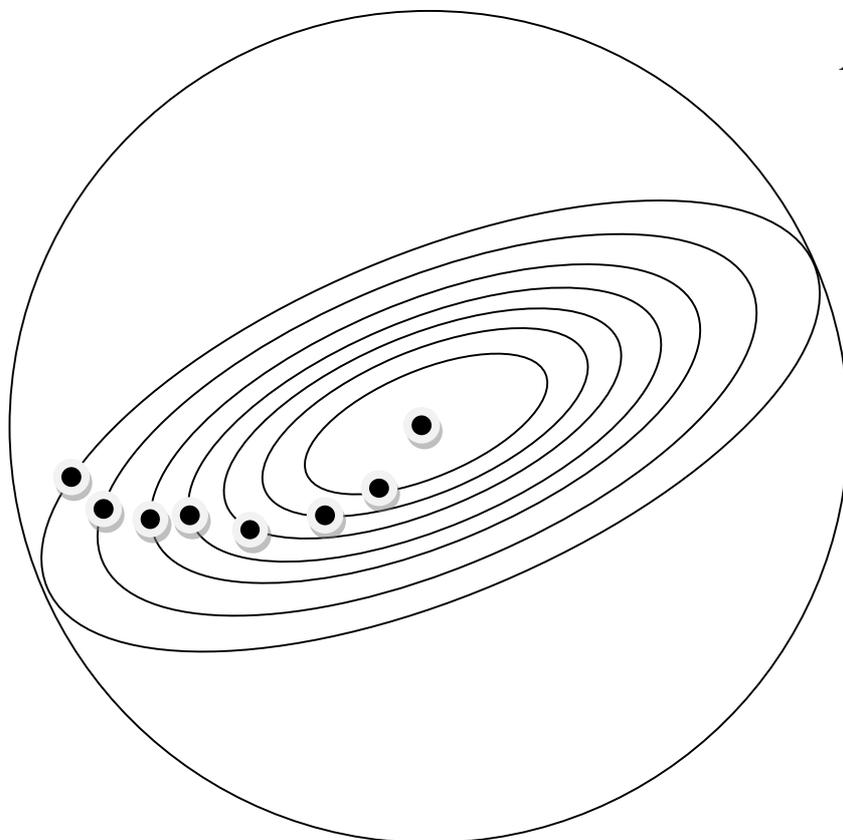
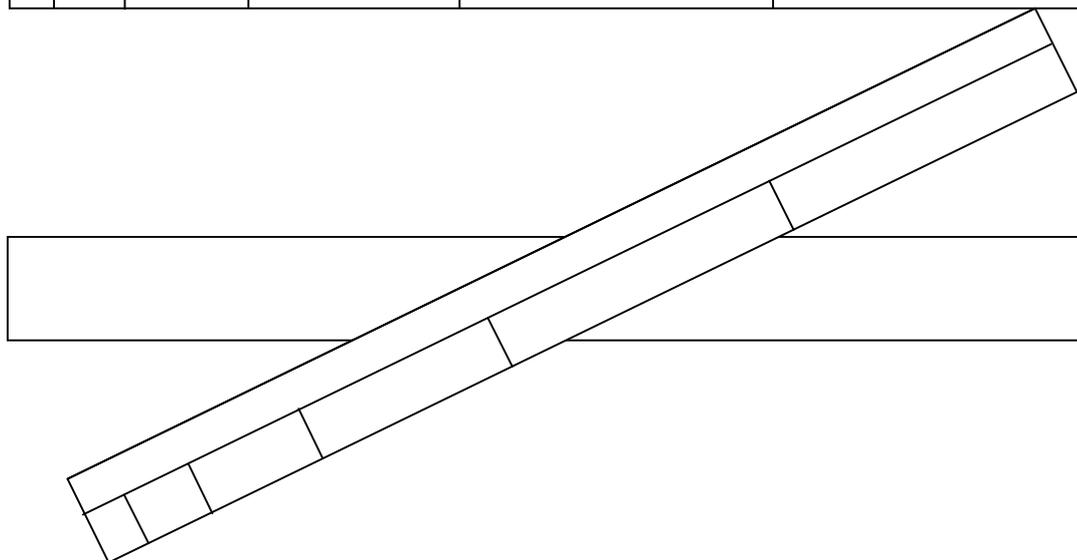
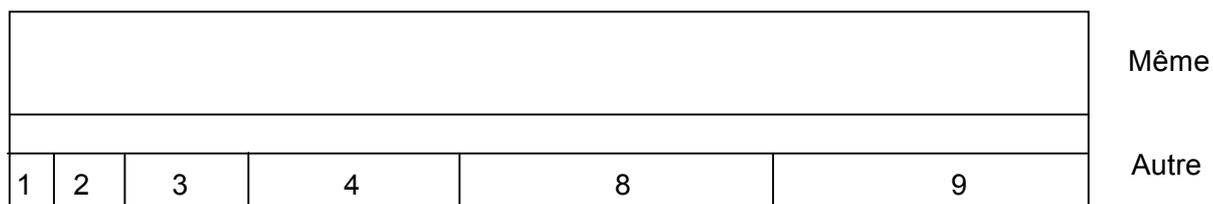
La précession est due à la forme de la Terre et aux actions gravitationnelles du Soleil et de la Lune. Une Terre parfaitement sphérique n'aurait pas ce mouvement. Mais les forces centrifuges qui découlent de sa rotation provoquent un aplatissement des pôles et un renflement de l'Equateur : le rayon équatorial est de 6 378 140 m, le rayon polaire de 6 356 755 m seulement.

## Les sphères adamantines. Aristote



Le Traité des sphères d'Eudoxe, Papyrus du deuxième siècle après J.C.

Les cercles du Même et de l'autre du Timée. Schémas de Luc Brisson. G.F.



*A partir du centre*

- Terre*
- Lune*
- Soleil*
- Mercure*
- Vénus*
- Mars*
- Jupiter*
- Saturne*

Emmanuel POULLE

Ecole des Chartes

## LA THÉORIE ÉPICYCLIQUE SELON PTOLÉMÉE AU MOYEN AGE

A la fin du Moyen Age, la théorie des épicycles élaborée par Ptolémée est un outil parfaitement rodé. On peut la considérer d'un point de vue cosmologique ou d'un point de vue technique. Selon le premier, les mouvements planétaires s'insèrent dans une série de « sphères » concentriques, c'est à dire dans une suite de volumes délimités par des surfaces sphériques concentriques, à raison d'une « sphère » pour chaque planète ; la remise en cause de cet agencement peut répondre à des préoccupations intellectuelles, philosophiques, elle ne saurait pas même ébranler tout l'appareil mathématique dont dépendent les positions planétaires. Du point de vue technique, en effet, la théorie épicyclique est unanimement acceptée, et il faudrait être fou, à la fin du xv<sup>e</sup> siècle, pour contester un édifice sur lequel repose alors absolument toute l'astronomie planétaire : instruments, tables, almanachs, éphémérides.

Depuis le xii<sup>e</sup> siècle et la renaissance d'une astronomie planétaire en Occident, la conception ptoléméenne des mouvements des planètes a traversé telle quelle le Moyen Age ; les seuls aménagements dont elle a fait l'objet sont quelques légères modifications des valeurs de certaines excentricités et surtout une hésitation à propos du mouvement dont sont animées les étoiles fixes et les auges des planètes. Mais les astronomes alphonsins ont réglé la question et mis tout le monde d'accord en combinant les deux thèses concurrentes : le mouvement de précession des Anciens et le mouvement d'accès et de recès.

Les qualités de présentation de la construction alphonsine, sans doute aussi les conditions de sa diffusion, à partir des milieux universitaires parisiens, lui ont valu un succès total, décisif, éclatant : au xv<sup>e</sup> siècle, l'astronomie alphonsine est le langage unique, infaillible de tous les

praticiens de l'astronomie. A travers elle, c'est la théorie planétaire de Ptolémée qui est ainsi glorifiée.

Cette théorie est semblable pour les trois planètes supérieures et pour Vénus ; elle s'applique à Mercure moyennant une complication, à la Lune moyennant des modifications, au Soleil moyennant une simplification.

Dans le cas général (<sup>1</sup>), la planète P parcourt un petit cercle (fig. 1), l'épicycle, dont le centre O parcourt un autre cercle, le déférent, excentrique par rapport au centre T de la Terre. Le mouvement de la planète sur l'épicycle est un mouvement régulier ; le mouvement du centre O de l'épicycle

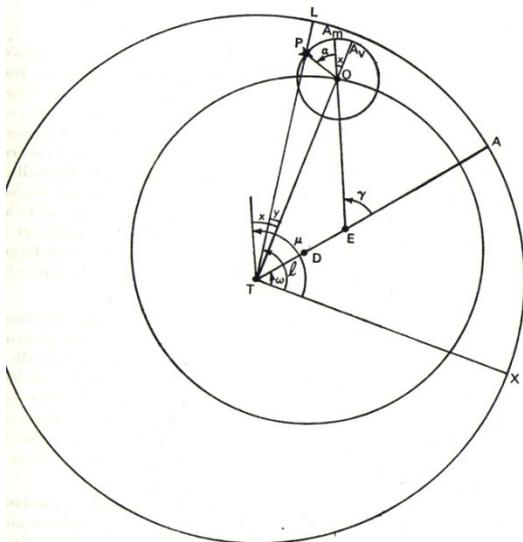


Fig. 1. — Théorie de Saturne, de Jupiter, de Mars et de Vénus.

sur le déférent n'est régulier ni par rapport au centre T de la Terre, par rapport au centre D du déférent, mais par rapport à un troisième point centre de l'équant (E). Les trois centres de la Terre, du déférent et l'équant sont alignés et placés de telle sorte que le centre du déférent se trouve au milieu des deux autres (TD = DE). La droite qui les porte, ou ligne des centres, est dans le plan du déférent, lequel est légèrement incliné sur le plan de l'écliptique ; l'extrémité de la ligne des centres sur le déférent est l'auge de la planète, et sa projection dans le plan de l'écliptique correspond à l'auge sur l'écliptique (A).

La ligne des centres est animée d'un mouvement très lent : elle participe du mouvement de la huitième sphère des fixes (double mouvement : phosin, de précession et d'accès et de recès).

Le mouvement régulier, sur le déférent, du centre de l'épicycle par rapport au centre de l'équant s'apprécie par référence à l'origine X de coordonnées (début du Bélier) : c'est le moyen mouvement  $\mu$  ; mais est aussi coutumier et commode d'apprécier ce mouvement par référence à la ligne des centres : c'est le centre moyen  $\gamma$ , qui ne varie pas régulièrement du fait de l'irrégularité que l'astronomie reconnaît au mouvement de la ligne des centres depuis qu'elle a admis le mouvement d'accès et de recès comme une de ses composantes, car la nature du mouvement d'accès et de recès est d'être progressivement accéléré ou progressivement ralenti.

## Ecliptique

L'**écliptique** est le grand cercle sur la sphère céleste représentant la trajectoire annuelle du soleil vue de la Terre. Plus précisément, il s'agit de l'intersection de la sphère céleste avec le plan écliptique, qui est le plan géométrique qui contient l'orbite de la Terre autour du Soleil. La plupart des planètes du système solaire ont une orbite qui se trouve très proche du plan écliptique. Le zodiaque se trouve également le long du plan de l'écliptique. Le plan de l'écliptique est incliné, par rapport à l'équateur céleste, d'un angle appelé *inclinaison de l'écliptique* et qui vaut environ  $23,27^\circ$  ; cet angle exprime l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à la normale au plan de son orbite. Quant au plan orbital de la Lune, il est incliné d'environ  $5^\circ$  par rapport à l'écliptique.

Puisqu'il y a environ 365,26 jours dans une année et 360 degrés dans un cercle, le Soleil semble se déplacer le long de l'écliptique à vitesse approximative de  $1^\circ$  par jour. Ce mouvement d'ouest en est est bien sûr contraire au mouvement apparent d'est en ouest de la sphère céleste.

L'écliptique et l'équateur céleste se croisent en deux points, directement en vis-à-vis l'un de l'autre. On appelle *équinoxes* les moments où le Soleil apparaît à ces points. À ces moments, jour et nuit ont chacun environ 12 heures de long, et ceci à tous les endroits du globe terrestre. Le point sur l'écliptique qui est le plus au nord de l'équateur céleste s'appelle *solstice d'été* dans l'hémisphère Nord et *solstice d'hiver* dans l'hémisphère austral. Ces dénominations sont inversées lorsque le Soleil est le plus au sud de l'équateur céleste.

Si, pendant la nouvelle Lune ou la pleine Lune, la Lune croise l'écliptique (de tels points de croisement sont appelés *nœuds*) ; une éclipse se produira. Le plan écliptique est aussi fréquemment appelé plan de l'Écliptique et peut être défini ainsi : c'est le plan qui contient le centre de gravité du Soleil et le centre de gravité de la Terre tournant autour du Soleil ; ce plan est projeté à l'infini et sert à définir un système de coordonnées pour repérer les étoiles.