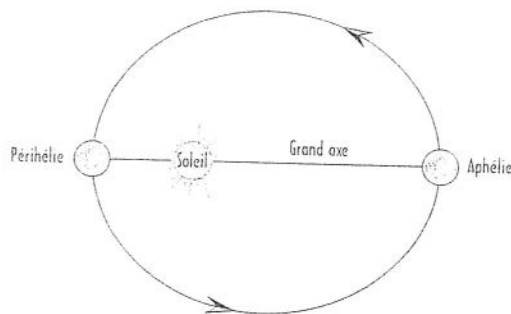


Mouvements des planètes

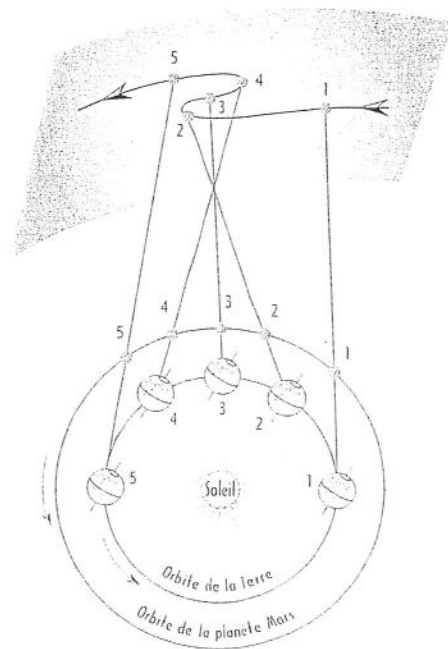
Le modèle du Monde

Les planètes tournent autour du Soleil dans le même sens en décrivant des orbites faiblement elliptiques. D'après les lois de Kepler, les planètes ne tournent pas à vitesse constante : elles se déplacent plus vite lorsqu'elles sont proches du périhélie et plus lentement vers l'aphélie. Les Anciens, qui en ignoraient la cause véritable, appelaient ces variations de vitesse "inégalités".



Le plus grand diamètre de l'ellipse, sur lequel se trouve le Soleil, est appelé grand axe. Plus l'excentricité de l'orbite est importante, plus la trajectoire de la planète est aplatie.

Selon la position de la Terre et celle d'une autre planète par rapport au Soleil, le mouvement de la planète s'effectue tantôt dans le sens direct, tantôt dans le sens rétrograde par rapport aux étoiles. Ces phénomènes sont dus au fait que la Terre et la planète tournent autour du Soleil à des vitesses différentes.



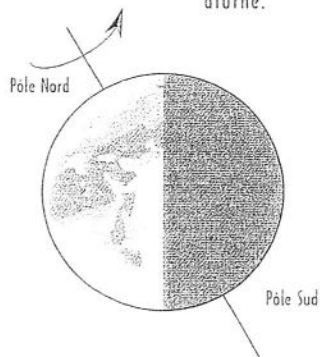
Mouvements de la Terre

Le modèle du Monde

Les Anciens, considérant la Terre comme immobile au centre du Monde, imaginent des modèles pour rendre compte de ce qu'ils voient. On sait aujourd'hui que la Terre possède plusieurs mouvements (mouvement diurne, annuel, précession). Ceux-là sont illustrés ci-dessous avec leurs conséquences pour un observateur terrestre.

Mouvement diurne

La Terre tourne sur elle-même d'ouest en est en 24 heures environ, d'où l'impression que tous les astres se meuvent d'est en ouest : c'est le mouvement diurne.



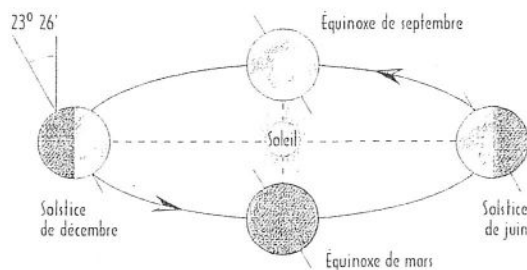
Mouvement de précession

La Terre n'étant pas parfaitement sphérique, son axe de rotation ne conserve pas une direction fixe dans le ciel au cours du temps : c'est la précession. L'axe décrit un cône en 26 000 ans, ce qui entraîne un changement au niveau des étoiles dites « polaires ». De même, les étoiles sont affectées d'une dérive systématique en position (coordonnées).



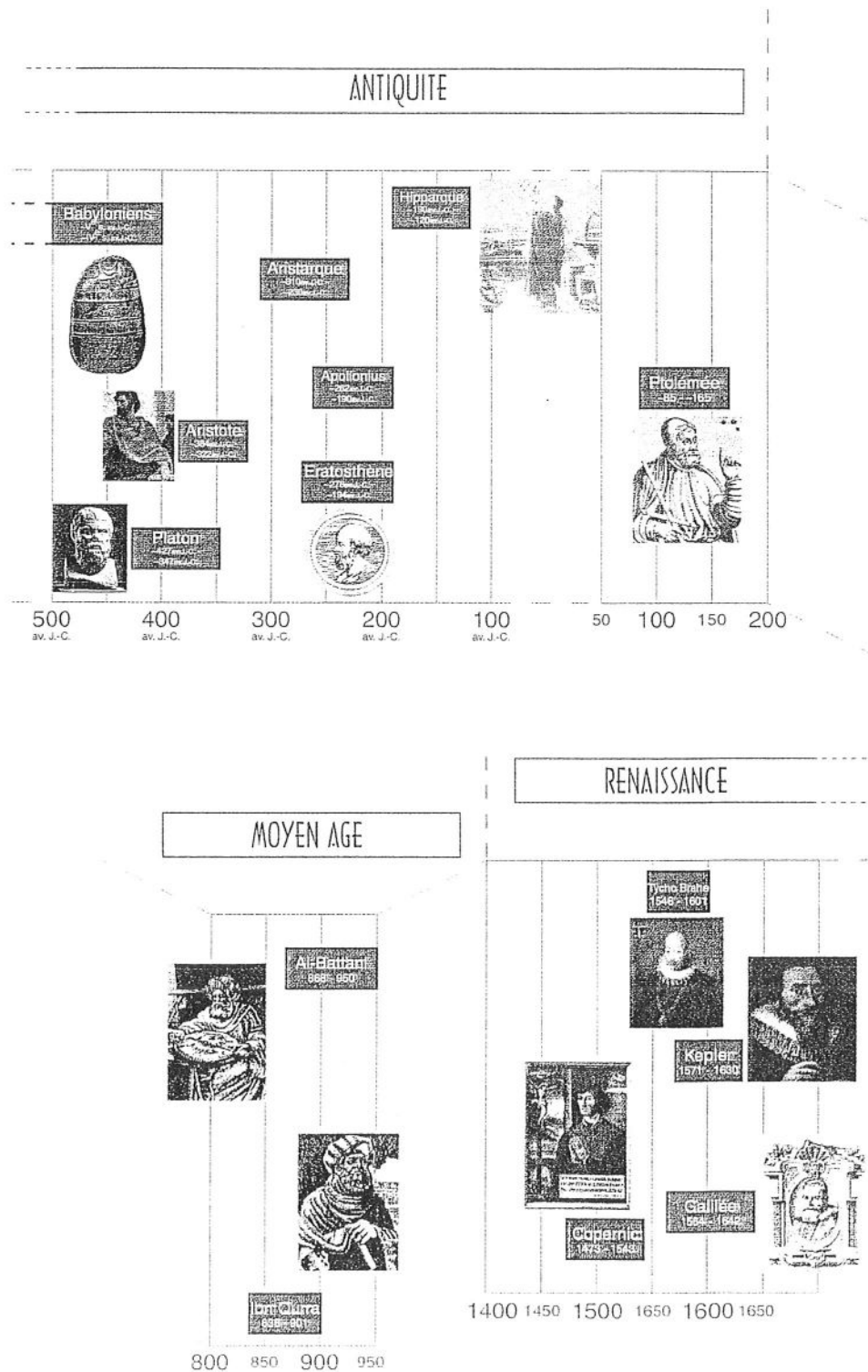
Mouvement annuel

La Terre tourne autour du Soleil en 365 jours environ. Depuis la Terre, le Soleil semble se déplacer devant différentes constellations au cours de l'année : c'est le mouvement annuel. L'axe de rotation de la Terre est incliné de $23^{\circ} 26'$, ce qui produit l'inégalité des jours et des nuits ainsi que les saisons.



Le modèle du Monde

Le modèle du Monde



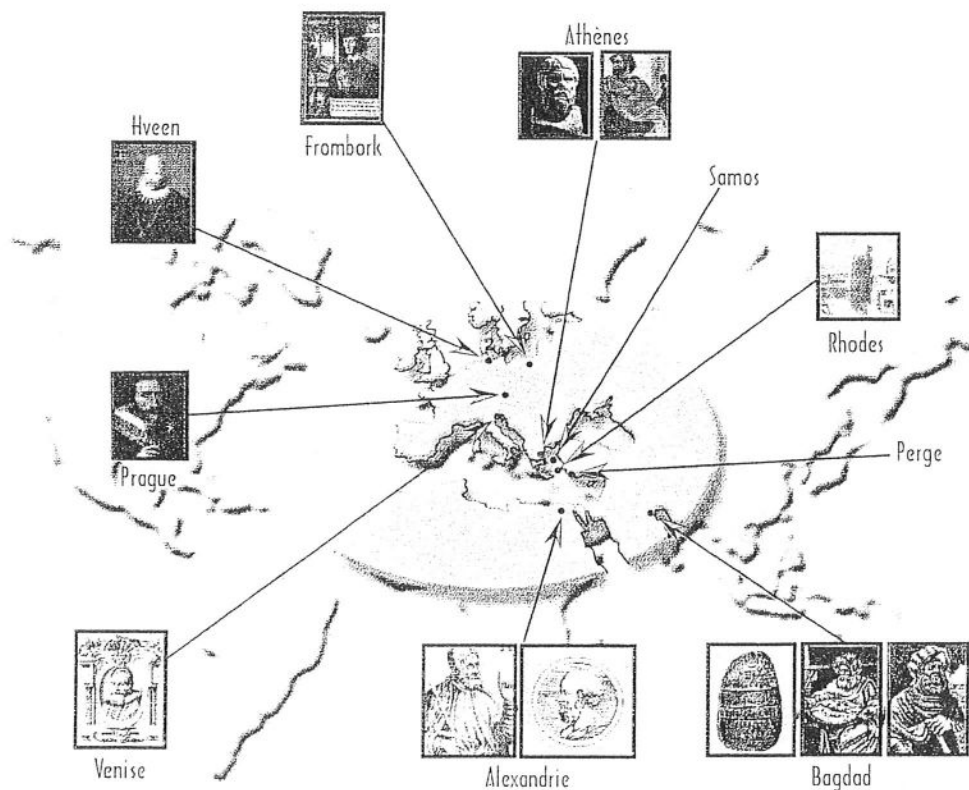
Le modèle du Monde

Le modèle du Monde

L'astronomie occidentale est née dans le bassin méditerranéen.

L'observation du ciel avait permis de distinguer deux types d'astres : les astres fixes, c'est-à-dire les étoiles, et les astres errants, qui regroupent le Soleil, la Lune et les cinq planètes visibles à l'œil nu.

Un des buts essentiels de l'astronomie ancienne est de concevoir un modèle cosmologique capable de sauver les apparences des mouvements célestes.



Aristote

Le modèle du Monde

Aristote (384-322 av. J.-C.), élève de Platon, fixe pour près de 2 000 ans la cosmologie en posant trois principes de base dans deux ouvrages *la Physique* et *le Traité du ciel*.

Premier principe

Le géocentrisme. La Terre, immobile, occupe le centre de l'Univers sphérique. Autour de la Terre tournent la Lune, le Soleil, Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne et enfin le ciel des étoiles fixes.

Deuxième principe

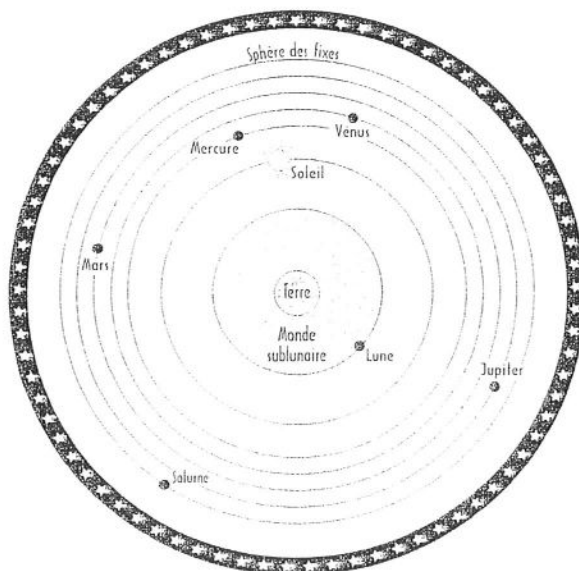
Le Monde est divisé en deux régions. Aristote distingue :

- le Monde sublunaire (situé sous la Lune) : Monde du changement où les mouvements sont rectilignes,
- le Monde supralunaire, sans vide, rempli d'une substance appelée éther : Monde immuable où rien ne peut naître ni périr.

Troisième principe

Dans le Monde supralunaire les mouvements sont circulaires et uniformes.

Ce dernier principe est conforme à l'exigence formulée par Platon : quels sont les mouvements circulaires uniformes qu'il convient de prendre comme hypothèse afin de sauver les apparences des mouvements que présentent les astres errants ?



Astronomie babylonienne

Le du Monde

C'est de la Mésopotamie antique, l'Irak actuel, que nous viennent les plus anciennes traces d'observations systématiques du ciel. Elles sont consignées, en écriture cunéiforme, sur des tablettes d'argile qui datent, pour les plus anciennes, de 1800 avant J.-C.

Les astronomes babyloniens ont accumulé durant plusieurs siècles de nombreuses observations. On leur doit notamment la détermination de l'écliptique et du zodiaque, leur division en 12 secteurs égaux.

L'apport le plus important concerne la détermination des mouvements et des trajectoires des astres errants : les éphémérides issues de calculs arithmétiques permettent de connaître année par année la position du Soleil, de la Lune et des planètes.



L'astronomie babylonienne, qui atteint son apogée après les conquêtes d'Alexandre au IV^e siècle av. J.-C., n'utilise pas, comme le fera l'astronomie grecque, de modèles géométriques. La prévision des phénomènes célestes repose uniquement sur l'utilisation de fonctions arithmétiques. Cependant les Babyloniens vont transmettre aux Grecs des archives de plusieurs siècles d'observation ainsi que la valeur de constantes fondamentales comme la période de révolution de la Lune et la durée de l'année solaire.

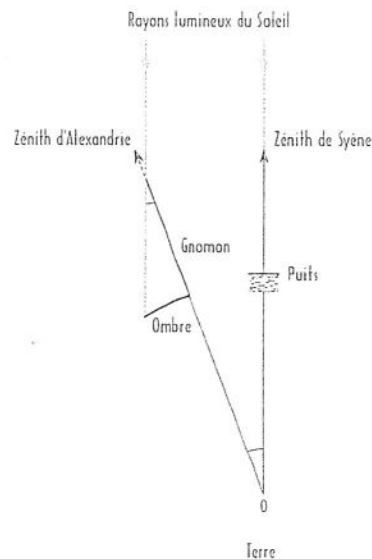
Eratosthène

Le modèle du monde

On sait au moins depuis Platon (427-347 av. J.-C.) que la Terre est ronde. Il revient à l'astronome géographe Eratosthène (280-190 av. J.-C.) d'avoir le premier estimé la circonférence terrestre en utilisant une méthode d'une grande simplicité.

A Syène, ville d'Egypte située près du tropique du Cancer, on observait qu'à midi le jour du solstice d'été l'image du Soleil se projetait au fond d'un puits, autrement dit que le Soleil était au zénith du puits. Au même instant, un gnomon, bâton planté verticalement dans le sol, à Alexandrie, ville qui est presque sur le même méridien, projette sur le sol une ombre dont la mesure permet de déterminer la distance angulaire du Soleil au zénith : Eratosthène trouva $7^{\circ} 10'$, soit $1/50$ de cercle. Cette valeur représente la différence de latitude entre ces deux villes.

La distance entre Alexandrie et Syène (800 km) était connue grâce aux bématistes (des arpenteurs qui comptaient leurs pas) et estimée à 5 000 stades (unité de mesure de l'époque). Une simple règle de trois donne alors la circonférence de la Terre (environ 250 000 stades), d'où l'on déduit la valeur du rayon de la Terre. Cette valeur restera employée, jusqu'au XVII^e siècle, comme unité de mesure des distances en astronomie.



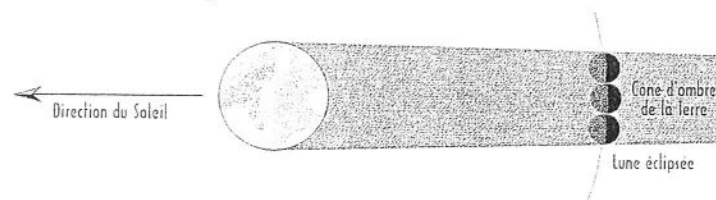
Aristarque de Samos

Le modèle du Monde

C'est dans l'ouvrage *Des dimensions et des distances du Soleil et de la Lune* qu'Aristarque de Samos (310-230 av. J.-C.) a donné pour la première fois une méthode géométrique pour calculer les distances de la Lune et du Soleil à la Terre. Cette méthode sera perfectionnée ensuite par Hipparque et Ptolémée qui bénéficieront de l'invention de la trigonométrie.

Mesure de la distance Terre - Lune

Pour simplifier considérablement et en utilisant des valeurs correctes, l'observation d'éclipses de Lune permet d'affirmer que trois lunes peuvent être contenues dans le cône d'ombre de la Terre. Le diamètre de la Lune est donc un tiers de celui de la Terre (en fait 0,27). Or, Aristarque sait que la Lune est vue sous un angle de un demi-degré. De ces deux observations, il en déduit que la Lune se situe à une distance égale à 111 fois son diamètre, soit 60 rayons terrestres.



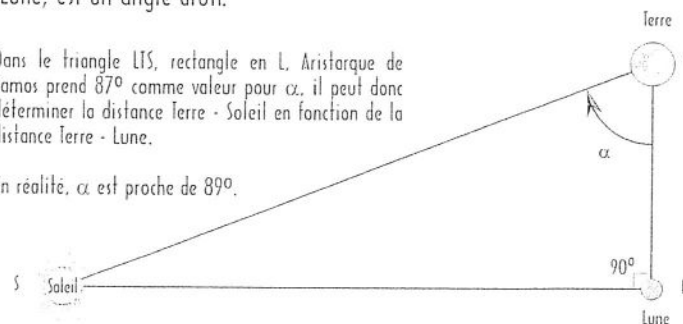
Mesure de la distance Terre - Soleil

Au premier ou au dernier quartier de Lune, Aristarque de Samos estime l'angle α entre le Soleil et la Lune.

Au même instant, il sait que l'angle entre la Terre et le Soleil, vu depuis la Lune, est un angle droit.

Dans le triangle LIS, rectangle en L, Aristarque de Samos prend 87° comme valeur pour α , il peut donc déterminer la distance Terre - Soleil en fonction de la distance Terre - Lune.

En réalité, α est proche de 89° .



Aristarque de Samos en déduit que le Soleil est 19 fois plus loin que la Lune. La valeur réelle est en fait proche de 380. Cependant, ce rapport de 19 sera utilisé jusqu'au XVII^e siècle.

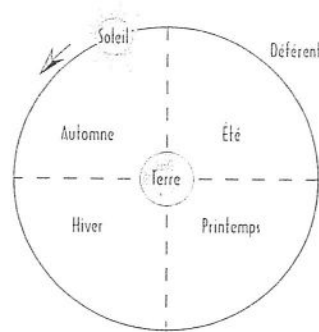
Apollonius de Perge

Le modèle du Monde

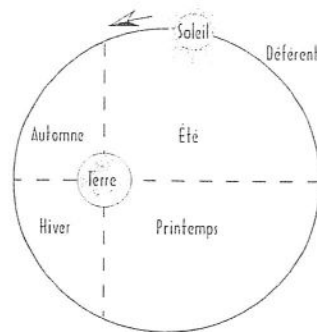
Pour expliquer l'inégalité des saisons et le mouvement apparent des planètes, Apollonius de Perge (240-170 av. J.-C.) emploie l'excentrique et l'épicycle.

L'inégalité des saisons

Les Grecs savaient que les saisons étaient inégales : le printemps et l'été étaient plus longs que l'automne et l'hiver, ce qui signifie que le Soleil ne se déplace pas autour de la Terre à la même vitesse.



Si l'on place la Terre au centre du déférent, le Soleil parcourt les 360° à vitesse uniforme : les saisons ont alors la même durée.

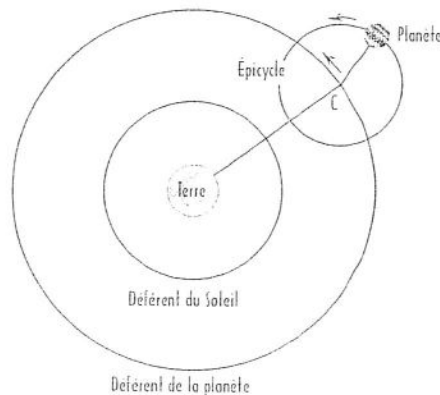


En revanche, si on écarte la Terre du centre d'une quantité appelée excentricité, le mouvement du Soleil n'apparaîtra plus uniforme depuis la Terre : il semblera aller plus vite lorsqu'il est près (périgée) et moins vite lorsqu'il est loin (apogée).

Ce mouvement excentrique permet d'expliquer en première approximation l'inégalité des saisons.

Le mouvement des planètes

Au cours de l'année, les planètes se déplacent par rapport aux étoiles ; mais à certaines époques, on les voit ralentir, stationner, faire demi-tour, puis repartir sur le fond étoilé. Pour expliquer ce mouvement rétrograde, Apollonius de Perge imagine un modèle à épicycle.



C'est en conjuguant ces deux mouvements qu'on explique le déplacement de la planète par rapport aux constellations, et les différentes étapes de son mouvement (station et rétrogradation). L'épicycle sur lequel se trouve la planète ne sert en définitive qu'à compenser l'immobilité de la Terre.

Ptolémée

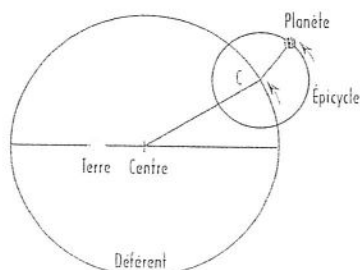
l'Almageste

Le modèle du Monde

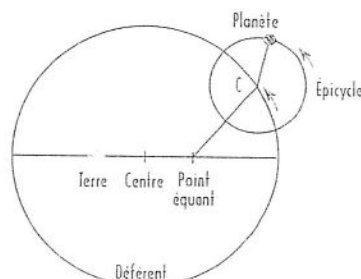
La plus grande œuvre astronomique de l'Antiquité est la *Megale Syntaxis*, que les Arabes traduiront sous le titre *Almageste*. Elle est due à l'astronome Claude Ptolémée (II^e siècle ap. J.-C.). On y trouve la façon de calculer les positions du Soleil, de la Lune, des planètes, mais aussi un catalogue d'étoiles, comment prévoir les éclipses, etc. C'est dans la théorie des planètes que Ptolémée apporte des innovations majeures en introduisant le point équiant.

Le mouvement de Mars, Jupiter, Saturne

Afin de rendre compte des inégalités observées dans le mouvement des planètes, les prédécesseurs de Ptolémée avaient imaginé un modèle excentrique : le mouvement du point C est uniforme par rapport au centre, mais ne l'est pas par rapport à la Terre excentrée.



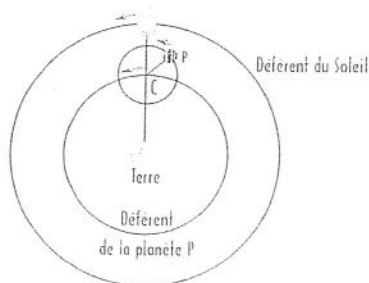
Pour expliquer que le mouvement d'une planète n'est pas uniforme mais qu'il présente des inégalités, on peut, comme dans le cas du mouvement du Soleil, utiliser un excentrique. Mais cet artifice ne permettait pas à Ptolémée de rendre totalement compte des observations.



Ptolémée imagina un point fictif symétrique de la Terre par rapport au centre appelé point équiant. C'est par rapport à ce point que le mouvement du centre C de l'épicycle est uniforme. Ce système est une bonne approximation du mouvement elliptique.

Le mouvement de Mercure, Vénus

En supposant qu'il n'y ait pas d'inégalité dans leur mouvement, voici comment on explique le déplacement des planètes Mercure et Vénus, qui, depuis la Terre, semblent osciller de part et d'autre du Soleil, devenant visibles tantôt le soir, tantôt le matin.

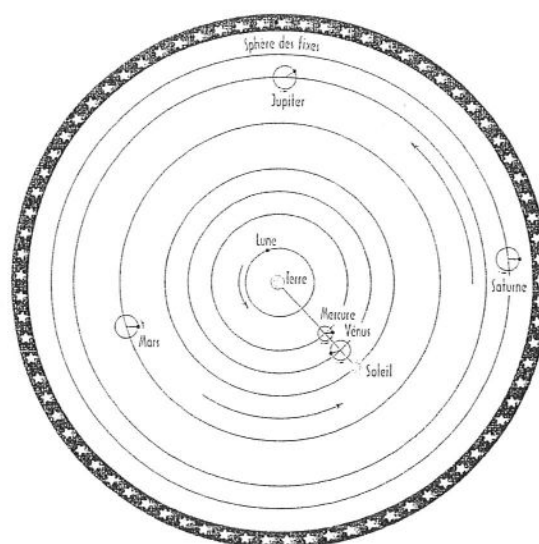


La planète P parcourt un épicycle pendant une révolution synodique tandis que le centre C de l'épicycle décrit le déferent en une révolution du Soleil autour de la Terre. La période de révolution sidérale de la planète est donc égale à celle du Soleil.

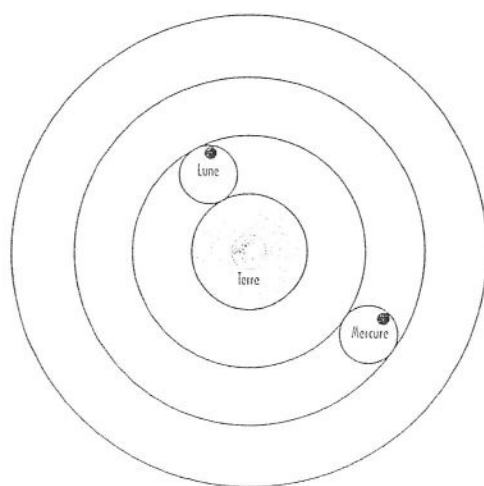
Ptolémée dimensions du Monde

Le modèle du Monde

Ptolémée adopte une cosmologie aristotélicienne où la Terre immobile occupe le centre du Monde. Il en résulte que le mouvement diurne s'explique par la rotation de la sphère des étoiles d'est en ouest, entraînant toutes les autres sphères supportant la Lune, le Soleil et les planètes.



Les Anciens étaient incapables de mesurer la distance des planètes et des étoiles à la Terre. Dans un ouvrage intitulé *les Hypothèses des planètes*, Ptolémée évalue les dimensions du Monde en faisant appel au principe de plénitude qui postule qu'il n'y a pas d'espace vide dans l'Univers. Mais les valeurs qu'il obtient ne résultent que de coïncidences numériques et elles ne reflètent pas la réalité.



Les sphères au sein desquelles les astres se meuvent sont contiguës.

Astre

Distance moyenne des astres
à la Terre (en rayons terrestres)

Lune	48
Mercure	115
Vénus	622
Soleil	1210
Mars	5040
Jupiter	11 503
Saturne	17 026
Etoiles fixes	20 000

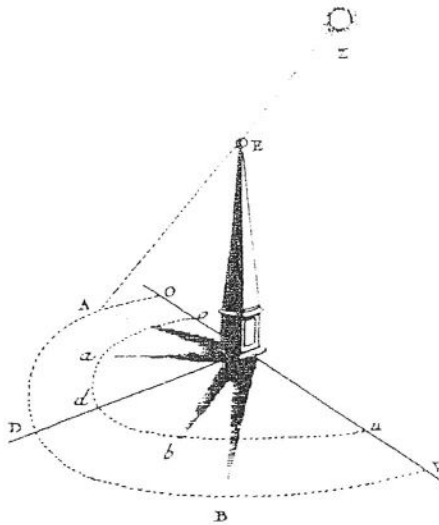
Instruments d'observation

Le modèle du monde

Jusqu'à l'utilisation de la lunette par Galilée au début du XVII^e siècle, les astronomes observent le ciel à l'œil nu ou à l'aide d'instruments plus ou moins perfectionnés. Ces instruments servent essentiellement à déterminer la position des astres sur la sphère céleste.

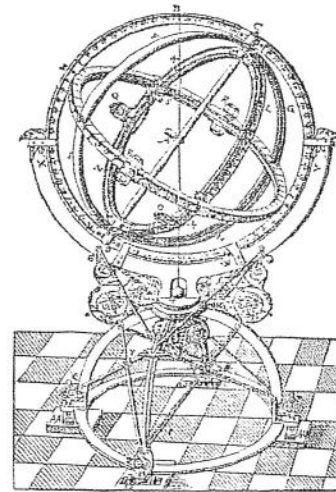
Le gnomon

Le gnomon est un simple bâton planté verticalement dans le sol : il est utilisé pour suivre la course du Soleil et déterminer la latitude du lieu.



La sphère armillaire

La sphère armillaire représente les cercles de la sphère céleste : l'horizon, le méridien, l'équateur, l'écliptique.



L'astrolabe

L'astrolabe est un instrument pédagogique : il donne une représentation du mouvement de la sphère céleste.



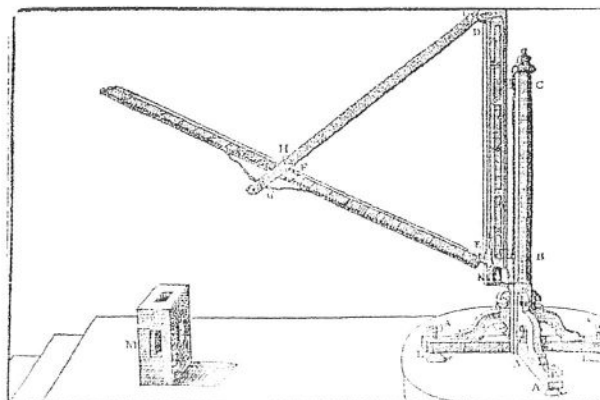
Le bâton de Jacob

Cet appareil permet la mesure de la hauteur d'un astre au-dessus de l'horizon.



Le triquetrum

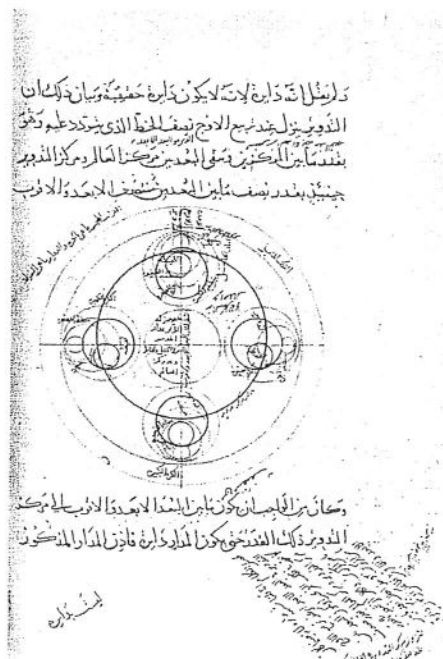
Une règle mobile, montée sur un quart de cercle, permet de mesurer la hauteur d'un astre.



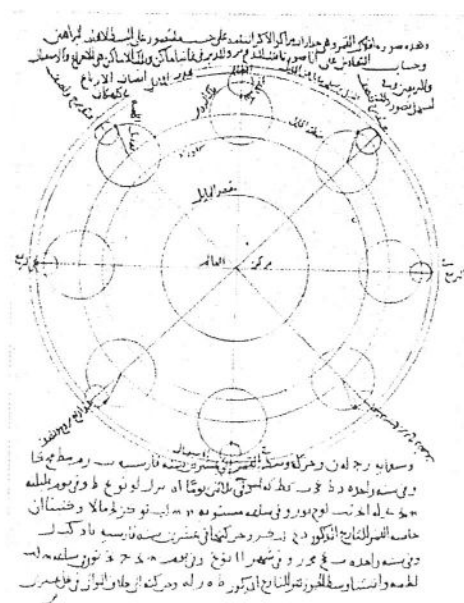
Astronomie arabo-médiévale

Le modèle du Monde

Ce sont les savants arabes qui vont, au début du Moyen Âge, prendre le relais de la science grecque et faire fructifier l'héritage de Ptolémée. Grands observateurs, ils perfectionnent les instruments et créent les premiers observatoires astronomiques au sens moderne du terme. Ils déterminent avec une grande exactitude la valeur de plusieurs paramètres essentiels en astronomie. Un des plus grands astronomes arabe, Al-Battani (868-950) mesure de façon très précise la longueur de l'année ; il est le premier à montrer que le diamètre apparent du Soleil varie.



Les astronomes arabes reprennent les modèles de Ptolémée et les perfectionnent grâce à leur maîtrise des mathématiques, et notamment de la trigonométrie. Mais ils ne remettent jamais en cause les principes cosmologiques de base posés par Aristote et Ptolémée.

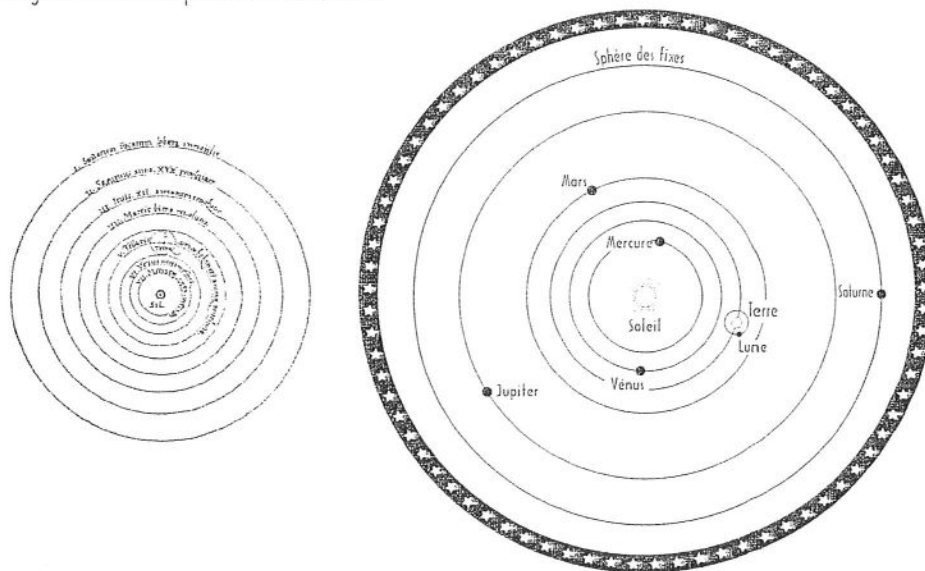


Copernic du géocentrisme...

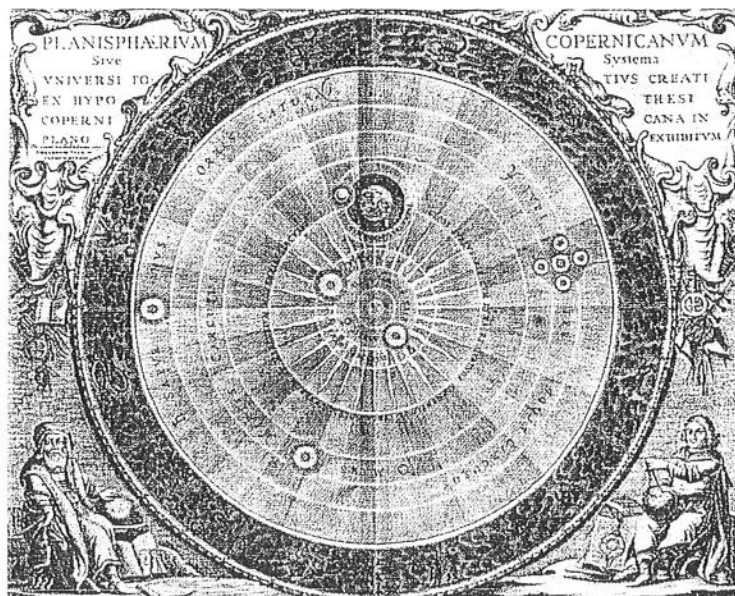
Le modèle du Monde

Le traité *De revolutionibus orbium coelestium*, publié en 1543, constitue un tournant décisif dans l'astronomie. Nicolas Copernic propose une nouvelle vision du Monde : autour du Soleil, immobile, tournent les planètes ; la sphère des étoiles fixes est, elle aussi, immobile.

L'ouvrage se voulait un « Almageste des temps modernes ». Mais Copernic reste attaché au principe du mouvement circulaire des planètes. Des trois principes de la cosmologie grecque, seul le géocentrisme disparaît véritablement.



Pour expliquer le mouvement diurne, Copernic fait tourner la Terre sur elle-même en 24 heures par rapport au Soleil. Quant au déplacement de celui-ci devant les étoiles au cours des saisons, il résulte désormais du mouvement de la Terre autour du Soleil en un an.



Copernic ...à l'héliocentrisme

Le modèle du monde

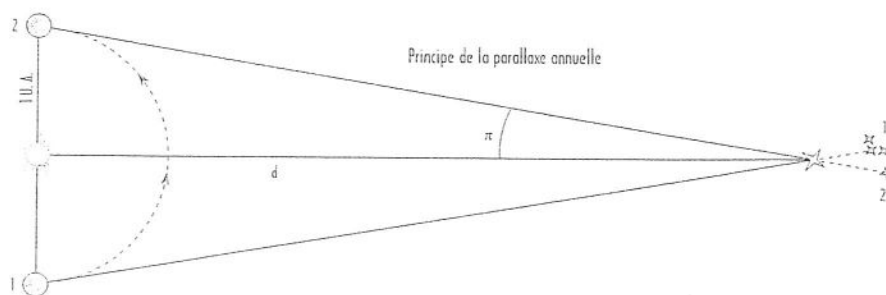
Pour expliquer les inégalités du mouvement des planètes, Copernic conserve les épicycles, bien qu'ils n'aient pas le même rôle que chez Ptolémée. Le passage du géocentrisme à l'héliocentrisme n'apporte pas d'amélioration qualitative dans la prévision des positions des astres, d'autant plus que Copernic n'a pratiquement pas observé.

Avec Copernic, on peut distinguer les planètes inférieures, situées entre le Soleil et la Terre, des planètes supérieures, plus lointaines. Le système héliocentrique permet pour la première fois de donner une estimation de leur distance relative au Soleil : un lien simple apparaît entre la période de révolution de la planète et sa distance au Soleil.

Les rayons moyens des orbites planétaires, rapportés à la distance Terre-Soleil, sont proches des valeurs modernes.

Astre	Copernic	valeurs modernes
Mercure	0,386	0,387
Vénus	0,719	0,723
Terre	1	1
Mars	1,520	1,524
Jupiter	5,219	5,203
Saturne	9,174	9,555

Certains astronomes ont objecté à Copernic que si la Terre tournait autour du Soleil, on devrait observer une parallaxe des étoiles. Cette dernière étant inobservable à l'œil nu, beaucoup ont refusé la cosmologie copernicienne, qui était en outre en contradiction avec les Ecritures. L'ouvrage de Copernic sera mis à l'Index en 1616, mais Kepler et Galilée se rallieront à l'héliocentrisme.



En observant la position d'une étoile proche à six mois d'intervalle, il est possible d'observer son déplacement apparent par rapport à l'arrière plan. La mesure de l'angle π permet de déterminer sa distance. Cette observation est une preuve directe du mouvement de la Terre autour du Soleil. L'angle π étant toujours très petit, il faudra attendre 1838 et Bessel pour qu'une première mesure soit effectuée.

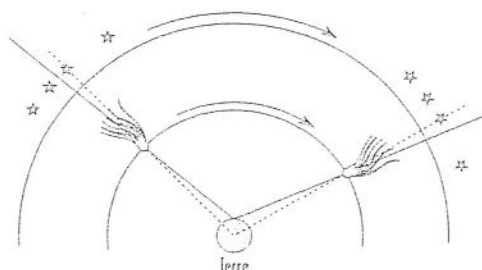
Tycho Brahe

Le modèle du Monde

Issu de la noblesse danoise, Tycho Brahe s'installe en 1576 sur une île non loin de Copenhague ; il y fonde le premier observatoire européen, Uraniborg, où il observera le ciel pendant près de vingt ans à l'aide d'instruments de grande dimension permettant d'effectuer des mesures d'une précision jusque-là jamais atteinte.

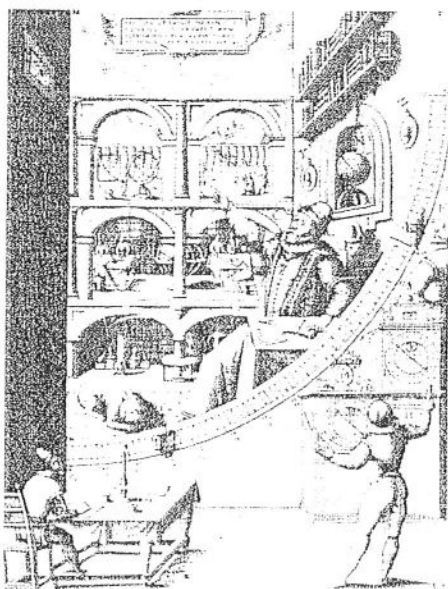
La supernova de 1572 et les comètes

En 1572, Tycho Brahe est témoin de l'apparition d'une nouvelle « étoile » (en réalité une supernova) dans la constellation de Cassiopée. Ne trouvant aucune parallaxe pour cet astre, il en déduit qu'elle appartient à la sphère des fixes. Tycho observe également 5 comètes entre 1577 et 1590. Ses mesures lui permettent de montrer qu'elles ne sont pas des phénomènes atmosphériques comme le croyait Aristote, mais des astres appartenant au Monde supralunaire.

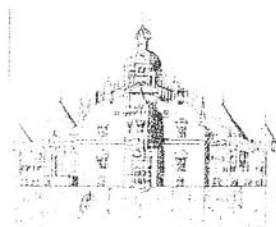


Observé du centre de la Terre, un astre tournant au rythme des étoiles serait vu toujours dans la même direction sur le fond étoilé. Mais Tycho Brahe observe depuis la surface : si cet astre est suffisamment proche, Tycho Brahe décelera un écart au cours du temps.

Les observations de Tycho Brahe montrent que les cieux ne sont pas immuables, contrairement à ce qu'affirmait le dogme aristotélicien.



L'apport de Tycho Brahe est considérable. Par ses mesures sur la supernova et les comètes il ouvre un débat sur le bien-fondé de la cosmologie aristotélicienne, sans pour autant se rallier à Copernic. Ses nombreuses observations, de Mars en particulier, permettront à Kepler de découvrir le mouvement elliptique des planètes.

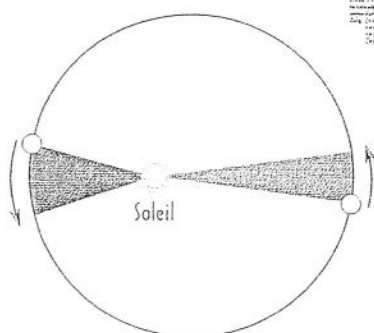


Kepler

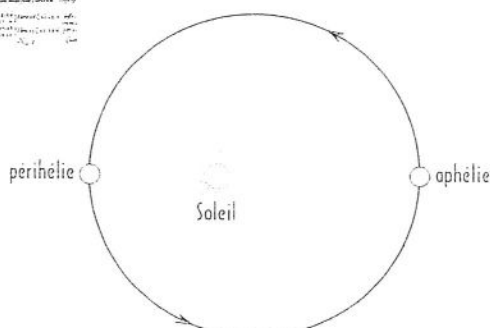
Le modèle du Monde

Travailleur passionné et enthousiaste, Kepler a bouleversé la pensée de son époque, ouvrant la voie aux découvertes de Newton. Par son génie, son intuition et son obstination, il a laissé aux savants un héritage d'où naîtra l'astronomie moderne.

En exploitant méthodiquement les observations de Tycho Brahe sur Mars, Kepler découvre trois lois dont les deux premières sont publiées en 1609 dans *Astronomia nova*. Dans un premier temps, Kepler montre qu'un cercle excentré permet de rendre compte des observations de la planète Mars. A partir de cette trajectoire, il trouve une première loi et par la suite il précise le caractère elliptique de la trajectoire dans une deuxième loi.



première loi : les planètes balayent des aires égales en des temps égaux



deuxième loi : les planètes tournent autour du Soleil en décrivant des ellipses, dont le Soleil occupe l'un des foyers

A la recherche de relations entre les orbites des planètes, Kepler tente d'associer les intervalles musicaux aux diamètres des orbites planétaires. Il découvre sa troisième loi qu'il publie en 1618 dans *Harmonia Mundi*.

$$\frac{a^3}{T^2} = \text{constante}$$

Troisième loi : le demi-grand axe « a » élevé au cube sur la période de révolution « T » élevée au carré d'une planète est égale à une constante.

Il en résulte que la période de révolution d'une planète dépend de sa distance au Soleil.

planète période de révolution

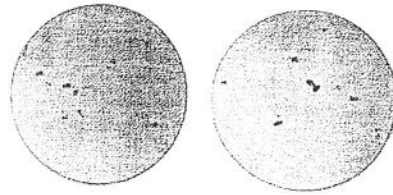
Mercure	87,969 jours
Venus	224,701 jours
Terre	365,256 jours
Mars	686,98 jours
Jupiter	11,86 ans
Saturne	29,46 ans

Galilée

Le modèle du Monde

Les taches solaires

En 1613, Galilée publie ses *Lettres concernant les taches solaires* ; en observant par projection le Soleil, il découvre que l'astre du jour a des taches et il mesure leur période de rotation. Il prouve que ces taches sont situées à la surface ou du moins très près, du Soleil. Le premier auteur à avoir publié (en 1611) un ouvrage sur les taches solaires est Fabricius (1587-1615) qui les a observées auparavant dès 1611.



Le dialogue sur les deux grands systèmes du Monde



En 1632, Galilée publie, à Florence, le *Dialogue sur les deux grands systèmes du Monde*, véritable machine de guerre contre le système géocentrique. Galilée y soutient que seul le système héliocentrique permet de rendre compte des mouvements célestes de façon satisfaisante et d'expliquer en particulier le phénomène des marées. Sa prise de position en faveur de Copernic, dont les idées avaient été condamnées en 1616, le conduira le 22 juin 1633 devant la Congrégation du Saint-Office à Rome où il abjurera à genoux, après avoir écouté la sentence qui interdit le *Dialogue* et le condamne à la prison.

Galilée quitta Rome, théâtre de son humiliation ; deux ans plus tard, le *Dialogue* était traduit en latin et diffusé dans toute l'Europe. Retiré dans sa villa d'Arcetri, Galilée rédigea son plus grand chef-d'œuvre, le *Discours concernant deux sciences nouvelles* qui fut édité à Leyde en 1638.

es tables astronomiques

Le modèle du Monde

De l'Antiquité jusqu'au XVII^e siècle, la finalité essentielle de l'astronomie est de prévoir la position des astres dans le ciel ainsi que la survenue des éclipses. On utilisait à cette fin des tables destinées à calculer les positions des planètes à une date quelconque.

Les plus anciennes tables conservées sont les tables manuelles de Ptolémée ; pendant toute la période islamique et byzantine, leur influence, directe ou indirecte, fut considérable.

Les principales tables astronomiques arabes dérivent de l'*Almageste* : tables d'Al-Khawrizmi, tables d'Al-Battani et surtout tables d'Arzaquiel, dites « Tables de Tolède » en raison de leur méridien de référence, les seules à avoir connu une diffusion quasi générale.

Vers 1320, dans les milieux astronomiques parisiens se répandent des tables beaucoup plus ambitieuses, établies en dehors d'un calendrier particulier : les Tables Alphonsines. Leur succès fut tel qu'à partir du XIV^e siècle, on ne rencontre pratiquement plus que ces Tables ou leurs adaptations.

En 1551, paraissent les Tables Pruteniques, œuvre de l'astronome allemand Erasmе Reinhold, établies à partir des données du *De revolutionibus* de Copernic. Ces tables vont supplanter rapidement toutes les autres et aideront considérablement à diffuser l'œuvre de Copernic.

Puis en 1627 paraissent les Tables Rodolphines de Kepler ; ce sont les plus précises de toutes. Leur supériorité est due à la masse d'observations utilisées pour leur construction et à l'utilisation du mouvement elliptique dans les calculs.

