

Modèles de l'univers : voir le monde autrement

Stage IREM 9 février et 3 avril 2017

[Sources](#)

Plan

1. Quelques notions d'astronomie
2. Le monde géocentrique
3. Le monde héliocentrique

Quelques notions d'astronomie

Que voit-on à l'œil nu ?

Que voit-on à l'œil nu ?

- Un mouvement diurne

Que voit-on à l'œil nu ?

- Un mouvement diurne

Il suffit de regarder le ciel à intervalle de quelques heures pour constater que l'ensemble des étoiles, tout en gardant des positions relatives fixes, a effectué un mouvement de rotation d'est en ouest autour d'un axe issu du centre de la Terre et passant très près de l'étoile polaire.

Ces objets célestes étaient appelés *étoiles fixes*.



Filé d'étoiles au-dessus du télescope 3,6 m de l'ESO- Crédit : ESO/A.Santerne

Que voit-on à l'œil nu ?

- Un mouvement diurne
- Un mouvement annuel

Que voit-on à l'œil nu ?

- Un mouvement diurne

- Un mouvement annuel

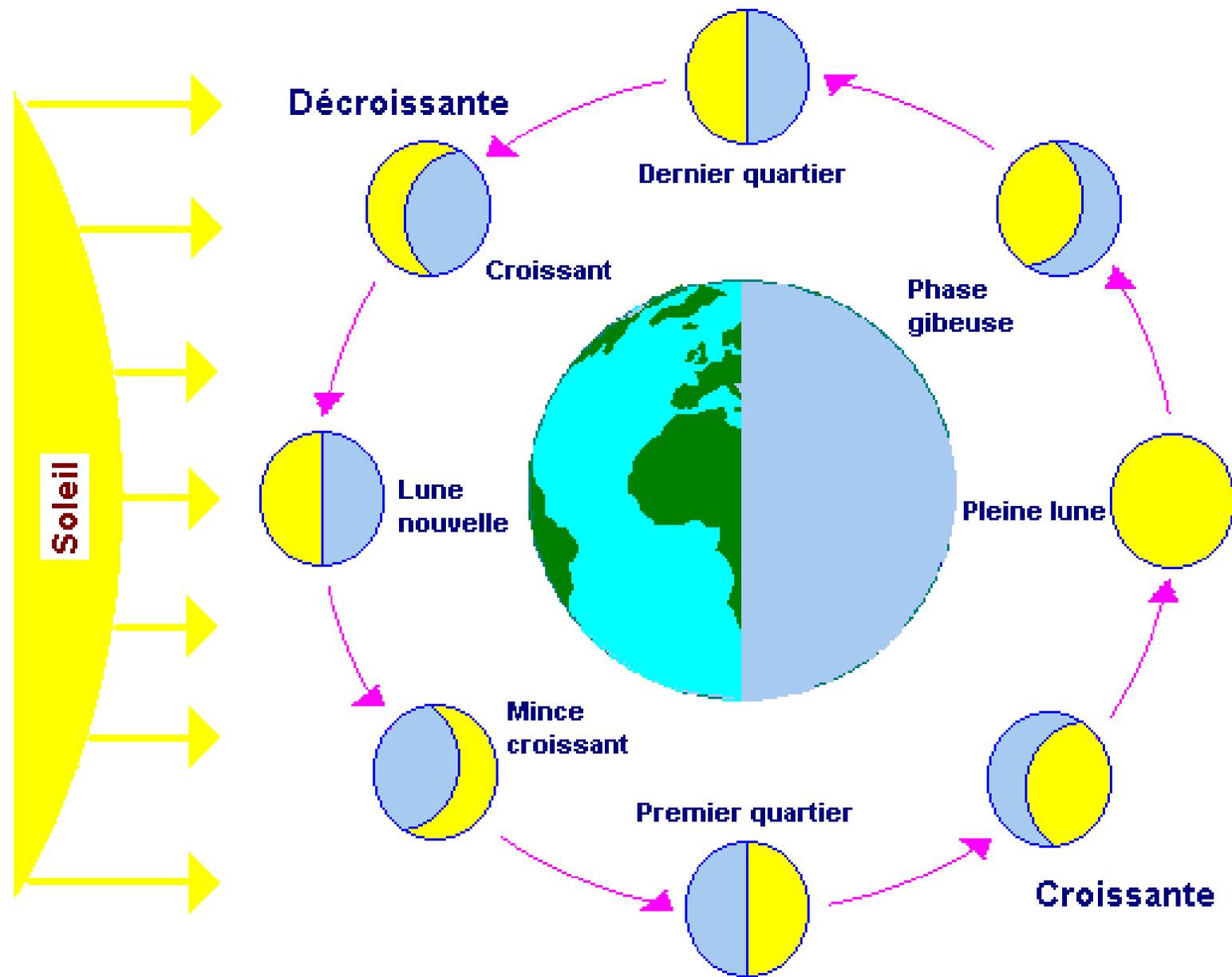
En un lieu et à une heure donnée, les constellations visibles changent au cours de l'année. Une année sidérale est l'intervalle de temps séparant deux positions identiques des constellations dans le ciel (durée légèrement supérieure à 365 jours).

Que voit-on à l'œil nu ?

- Un mouvement diurne
- Un mouvement annuel

En un lieu et à une heure donnée, les constellations visibles changent au cours de l'année. Une année sidérale est l'intervalle de temps séparant deux positions identiques des constellations dans le ciel (durée légèrement supérieure à 365 jours).

Comment observer le mouvement du Soleil par rapport au fond d'étoiles fixes ? Le Soleil éclairant la Lune, on peut comprendre que lorsque la Lune nous apparaît sombre (NL), c'est que le Soleil, pour nous, est derrière elle. En revanche, quand elle est pleine (PL), c'est que le Soleil est en opposition avec la Lune.



Que voit-on à l'œil nu ?

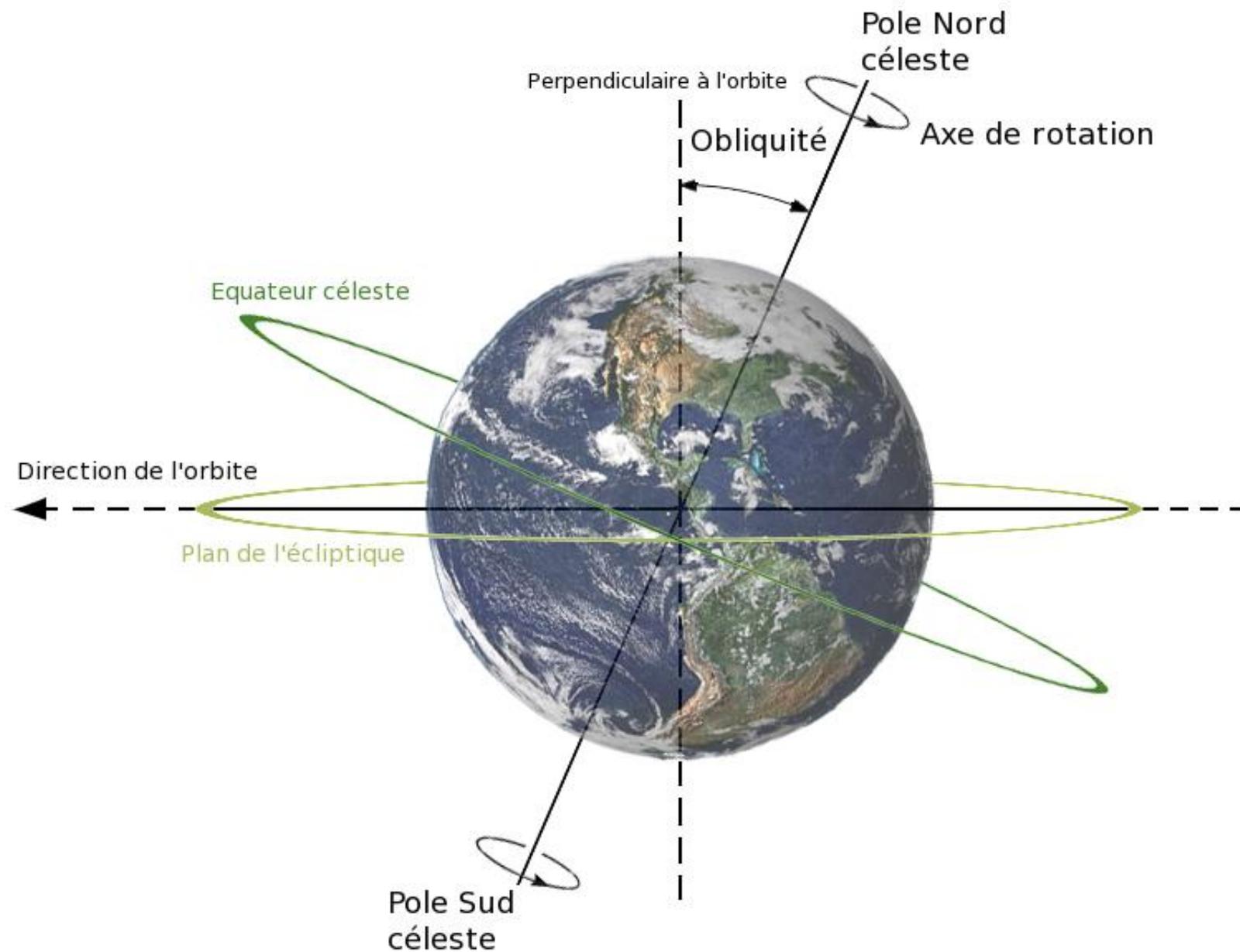
- Un mouvement diurne
- Un mouvement annuel

En un lieu et à une heure donnée, les constellations visibles changent au cours de l'année. Une année sidérale est l'intervalle de temps séparant deux positions identiques des constellations dans le ciel (durée légèrement supérieure à 365 jours).

Comment observer le mouvement du Soleil par rapport au fond d'étoiles fixes ? Le Soleil éclairant la Lune, on peut comprendre que lorsque la Lune nous apparaît sombre (NL), c'est que le Soleil, pour nous, est derrière elle. En revanche, quand elle est pleine (PL), c'est que le Soleil est en opposition avec la Lune.

Les Anciens avaient constaté que le Soleil se déplaçait vers l'est par rapport au fond d'étoiles fixes, décrivant une trajectoire appelée *écliptique*.

Cette trajectoire plane quasi circulaire fait un angle d'environ 23° (obliquité) avec le plan perpendiculaire à l'axe de rotation des étoiles fixes.



Inclinaison de l'axe terrestre (aussi appelé *obliquité*) et sa relation avec [l'équateur céleste](#) et [le plan de l'écliptique](#), ainsi qu'avec l'axe de rotation de la Terre. Article « Inclinaison de l'axe » de Wikipédia.

Que voit-on à l'œil nu ?

- Un mouvement diurne
- Un mouvement annuel
- La rétrogradation des planètes

Que voit-on à l'œil nu ?

- Un mouvement diurne
- Un mouvement annuel
- La rétrogradation des planètes

Outre le Soleil et la Lune, cinq objets célestes visibles à l'œil nu se distinguent des étoiles fixes . Nous les connaissons sous leur nom latin : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne (Uranus et Neptune, trop lointains pour pouvoir être vus à l'œil nu, n'étaient pas connus des Anciens).

Que voit-on à l'œil nu ?

- Un mouvement diurne
- Un mouvement annuel
- La rétrogradation des planètes

Outre le Soleil et la Lune, cinq objets célestes visibles à l'œil nu se distinguent des étoiles fixes . Nous les connaissons sous leur nom latin : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne (Uranus et Neptune, trop lointains pour pouvoir être vus à l'œil nu, n'étaient pas connus des Anciens).

Ces *planètes* (en grec, « astres errants ») se déplacent par rapport aux étoiles fixes, comme le Soleil, vers l'est et approximativement sur l'écliptique.

Que voit-on à l'œil nu ?

- Un mouvement diurne
- Un mouvement annuel
- La rétrogradation des planètes

Outre le Soleil et la Lune, cinq objets célestes visibles à l'œil nu se distinguent des étoiles fixes . Nous les connaissons sous leur nom latin : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne (Uranus et Neptune, trop lointains pour pouvoir être vus à l'œil nu, n'étaient pas connus des Anciens).

Ces *planètes* (en grec, « astres errants ») se déplacent par rapport aux étoiles fixes, comme le Soleil, vers l'est et approximativement sur l'écliptique.

Mais leur mouvement présente des irrégularités : de temps en temps, elles ralentissent leur déplacement vers l'est, s'arrêtent, repartent vers l'ouest avant de s'arrêter de nouveau et de repartir vers l'est.

Que voit-on à l'œil nu ?

- Un mouvement diurne
- Un mouvement annuel
- La rétrogradation des planètes

Outre le Soleil et la Lune, cinq objets célestes visibles à l'œil nu se distinguent des étoiles fixes . Nous les connaissons sous leur nom latin : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne (Uranus et Neptune, trop lointains pour pouvoir être vus à l'œil nu, n'étaient pas connus des Anciens).

Ces *planètes* (en grec, « astres errants ») se déplacent par rapport aux étoiles fixes, comme le Soleil, vers l'est et approximativement sur l'écliptique.

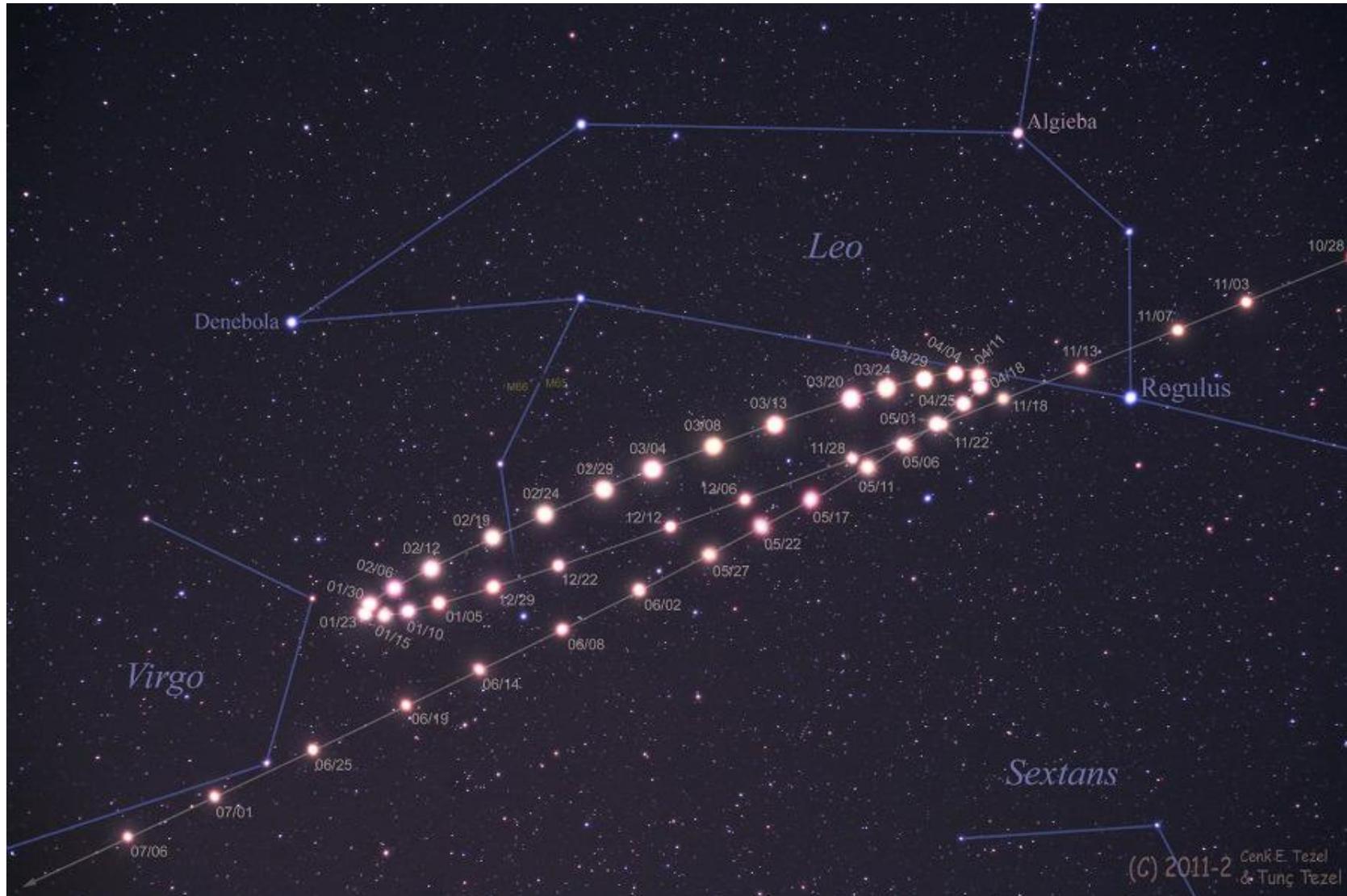
Mais leur mouvement présente des irrégularités : de temps en temps, elles ralentissent leur déplacement vers l'est, s'arrêtent, repartent vers l'ouest avant de s'arrêter de nouveau et de repartir vers l'est.

On appelle ce mouvement une *rétrogradation*. Et comprendre l'origine de ces mouvements irréguliers a été un des grands défis de l'astronomie ancienne.

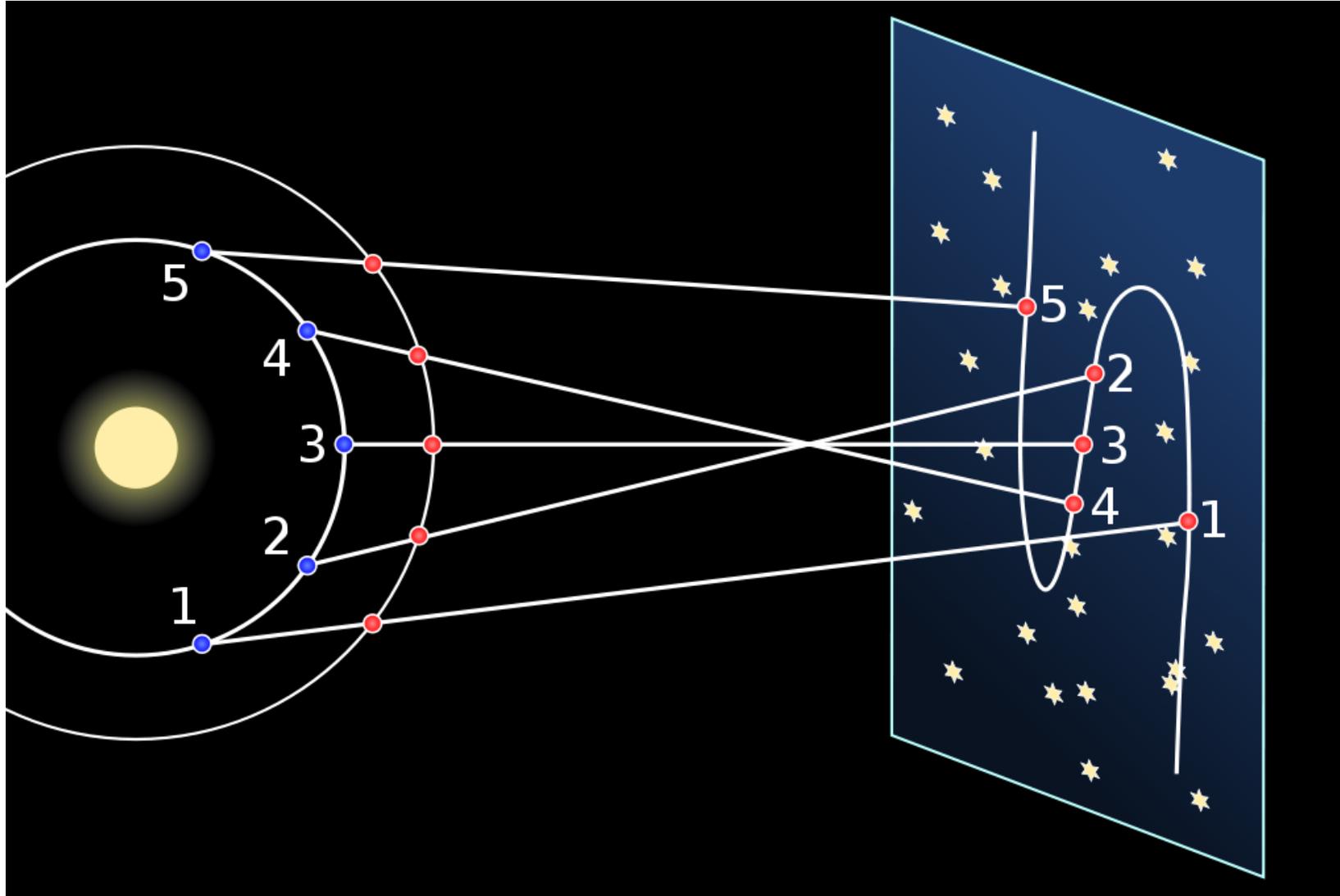
Rétrogradation de la planète Mars 2011-2012



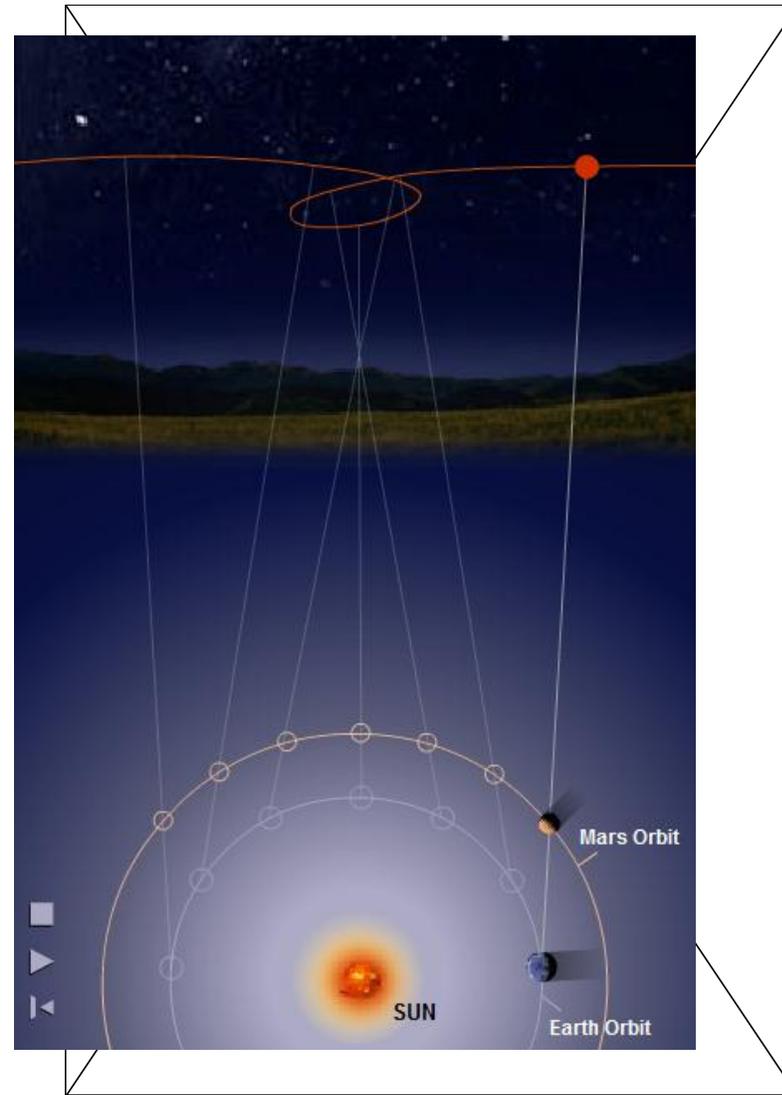
Rétrogradation de la planète Mars 2011-2012



Explication héliocentrique de la rétrogradation (1)



Explication héliocentrique de la rétrogradation (2)



Le mouvement rétrograde de Mars. Le bas de l'animation montre le déplacement de Mars et de la Terre sur leurs orbites. Le haut de l'animation montre le changement de position apparent de Mars dans notre ciel. Crédit : NASA

Le monde géocentrique

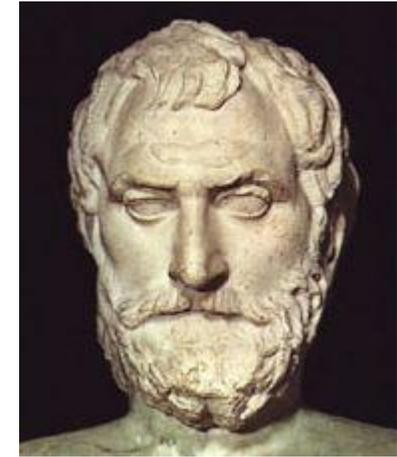
L'astronomie grecque (école ionique VI^e s. av JC)

- Thalès (625 – 547 av JC)

Le premier principe de toute chose est **l'eau** (élément que l'on trouve sous les 3 phases).

Le monde est une sphère entourée d'une masse de liquide.

La Terre est un **disque** flottant à l'intérieur de cette sphère.



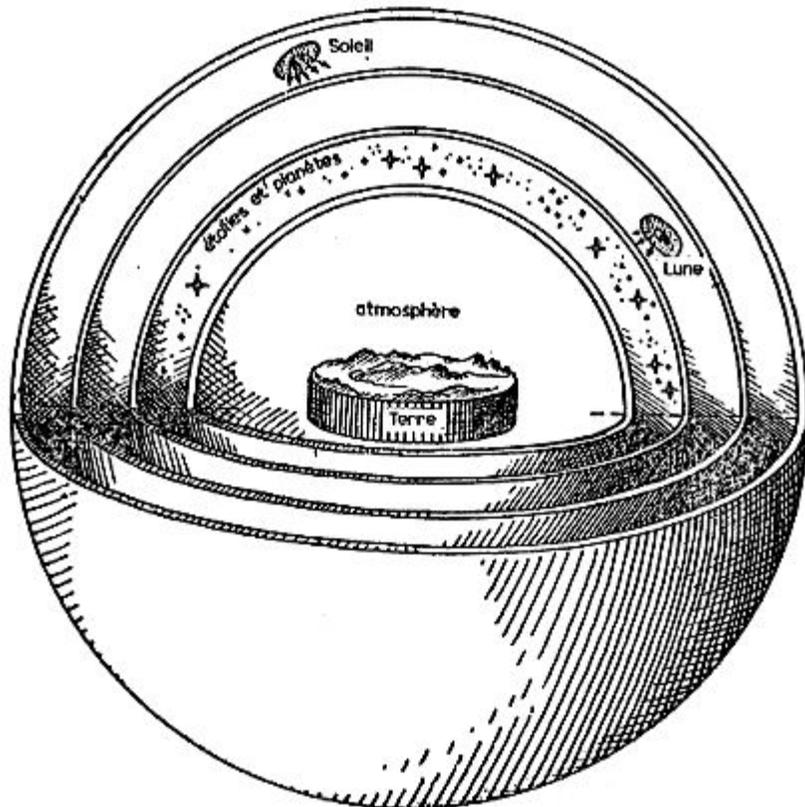
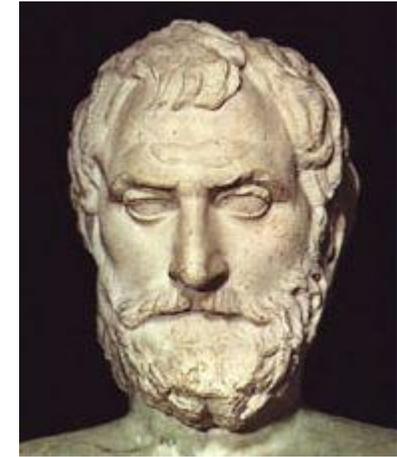
L'astronomie grecque (école ionique VI^e s. av JC)

- Thalès (625 – 547 av JC)

Le premier principe de toute chose est **l'eau** (élément que l'on trouve sous les 3 phases).

Le monde est une sphère entourée d'une masse de liquide.

La Terre est un **disque** flottant à l'intérieur de cette sphère.



- Anaximandre (610 – 546 av JC)

Il remplace l'élément unique de Thalès par les quatre éléments **eau, terre, air et feu**.

La Terre est un **cylindre** qui suspendu dans l'espace au centre d'un univers sphérique.

L'astronomie grecque (école pythagoricienne)

Crotone - VI^e/V^e s. av JC

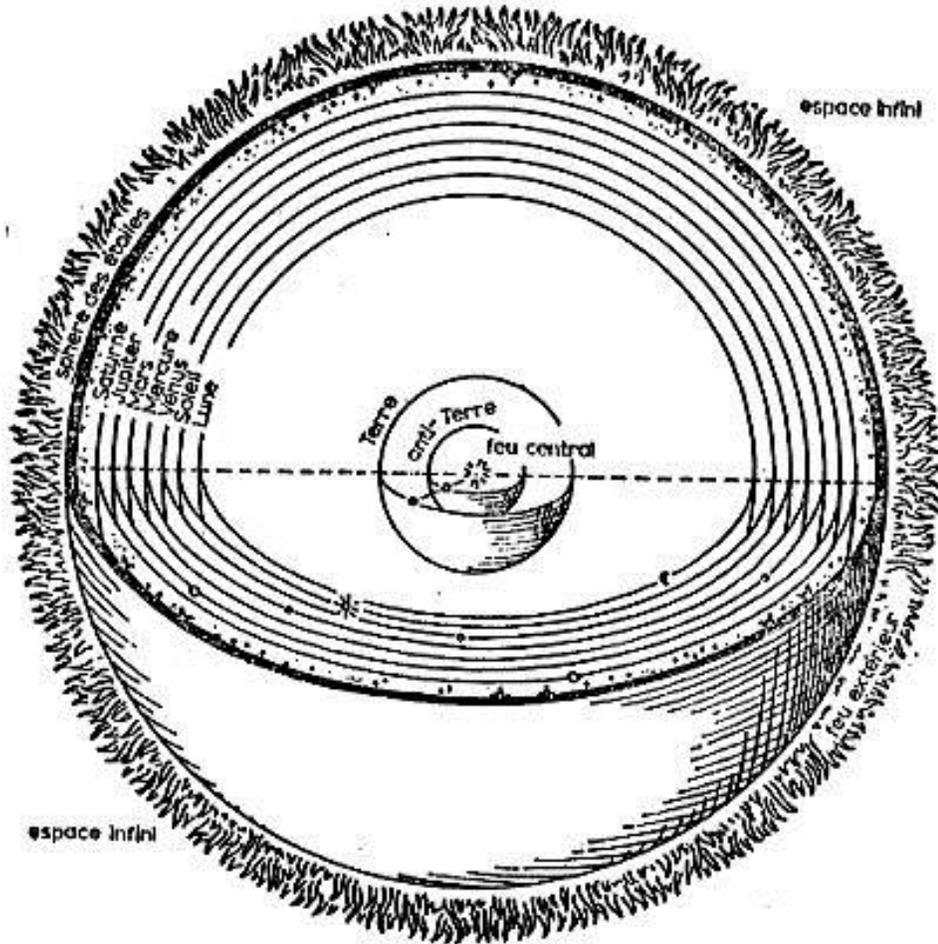
- Pythagore (580 – 495 av JC)

Les nombres sont le principe de toute chose. Recherche du caractère mathématique des phénomènes naturels. Les corps célestes, l'enveloppe du cosmos, la sphère des fixes ne peuvent se déplacer qu'en cercle.

Dogme du cercle et de la sphère.

L'astronomie grecque (école pythagoricienne)

Crotone - VI^e/V^e s. av JC



L'univers selon Philolaos

- Pythagore (580 – 495 av JC)
Les nombres sont le principe de toute chose. Recherche du caractère mathématique des phénomènes naturels. Les corps célestes, l'enveloppe du cosmos, la sphère des fixes ne peuvent se déplacer qu'en cercle.
Dogme du cercle et de la sphère.
- Philolaos (485 – 390 av JC)
La Terre n'est plus au centre. Elle est en mouvement sur une orbite circulaire. Au centre du monde est placé un feu (qui n'est pas le Soleil), puis vient, l'Anti-Terre, la Terre, la Lune, le Soleil, les cinq planètes, et la sphère des étoiles fixes.

Platon (428 – 348 av JC)

Simplicius (~480 - 549) , philosophe néoplatonicien, rapporte :

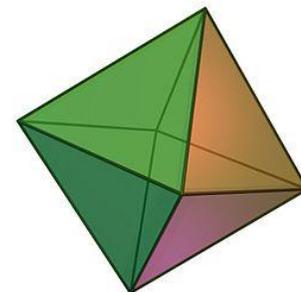
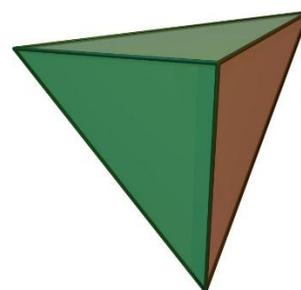
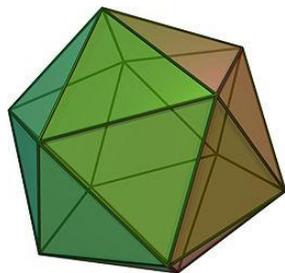
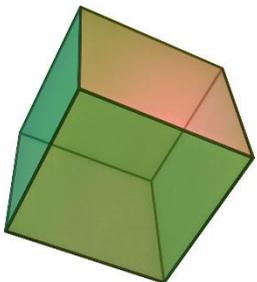
« Platon admet en principe que les corps célestes se meuvent d'un mouvement circulaire, uniforme et constamment régulier ; il pose alors aux mathématiciens ce problème : " Quels sont les mouvements circulaires, uniformes et parfaitement réguliers qu'il convient de prendre pour hypothèses, afin que l'on puisse **sauver les apparences** présentées par les planètes ? " »

Platon (428 – 348 av JC)

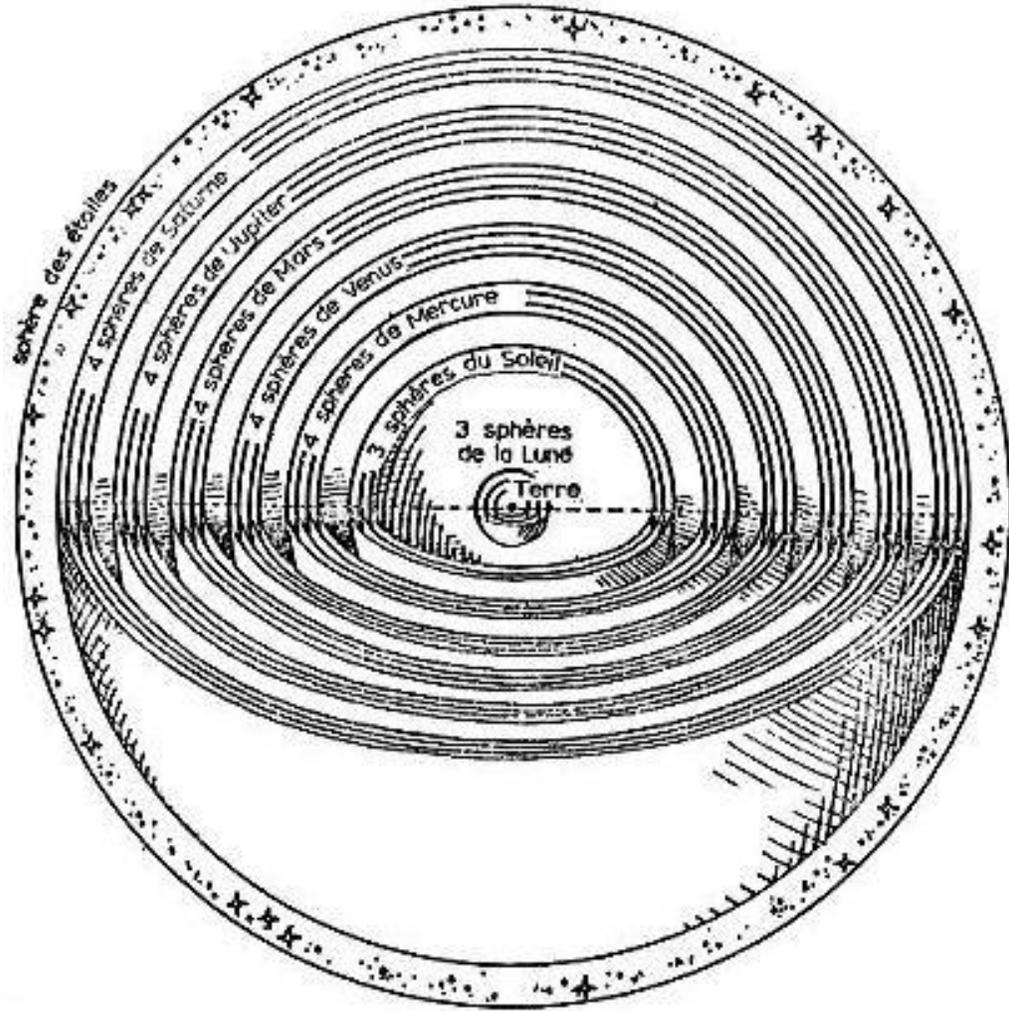
Simplicius (~480 - 549) , philosophe néoplatonicien, rapporte :

« Platon admet en principe que les corps célestes se meuvent d'un mouvement circulaire, uniforme et constamment régulier ; il pose alors aux mathématiciens ce problème : " Quels sont les mouvements circulaires, uniformes et parfaitement réguliers qu'il convient de prendre pour hypothèses, afin que l'on puisse **sauver les apparences** présentées par les planètes ? " »

Platon expose, notamment dans la République et le Timée, sa conception du cosmos. Le monde a une forme sphérique qui est la forme la plus parfaite de toutes et se meut par une rotation sur lui-même. Chaque élément est associé à un solide parfait : la terre avec le cube, l'eau avec l'icosaèdre, le feu avec le tétraèdre et l'air avec l'octaèdre



Eudoxe : 27 sphères pour expliquer le monde



Pour Eudoxe (408 – 355 av JC) :

- La Terre est immobile au centre.
- 3 sphères pour la Lune
- 3 sphères pour le Soleil
- 4 sphères par planète (une extérieure pour rendre compte de la rotation diurne de la Terre, une 2^{ème} pour produire le mouvement apparent de la planète dans le zodiaque et enfin les deux intérieures tournant en sens inverse pour expliquer les stations et les rétrogradations).
- 1 sphère pour les fixes

Modèle complexe qui explique tous les mouvements.

Les distances Terre-planète sont constantes

L'univers selon Eudoxe de Cnide

L'univers selon Aristote (384 – 322 av JC)

- Le Monde est clos, sphérique, inengendré.
- La Terre est au centre de l'univers.
- Les orbites sont circulaires.
- Le Monde est divisé en 2 parties :
 - le monde supralunaire
(astres sphériques parfaits, mouvements toujours répétés)
 - le monde sublunaire
(soumis à la génération et la corruption)

Il y a 5 éléments : terre, eau, air, feu et l'éther
(uniquement dans le monde supralunaire)

Aristote a affiné le système d'Eudoxe et son modèle comporte 55 sphères !



Héraclide du Pont (388 – 310 av JC)

Le Monde est clos et sphérique.

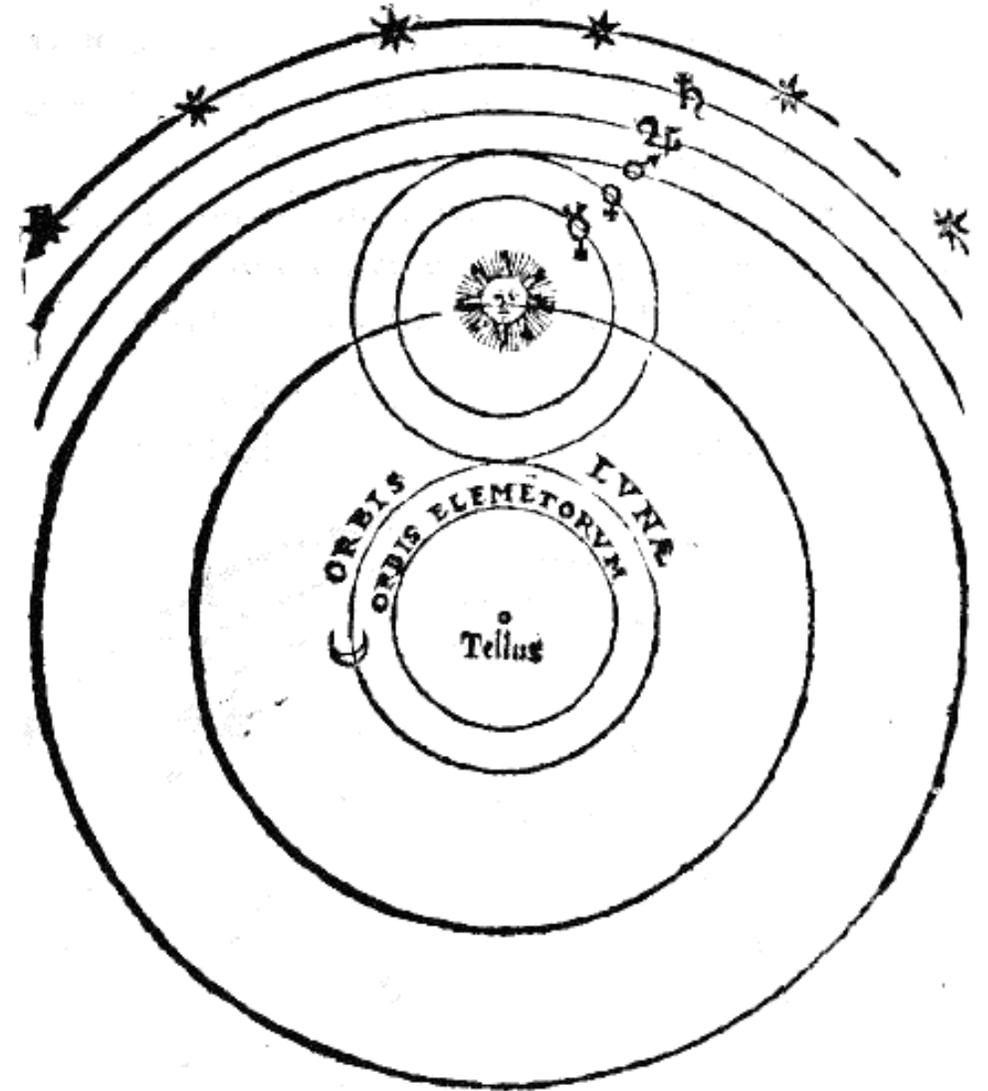
La Terre est au centre de l'univers.

Les orbites sont circulaires et centrées sur la Terre.

La Terre tourne sur elle-même en 24 heures.

La sphère des étoiles est immobile.

Mercure et Vénus tournent autour du Soleil et restent toujours proches du Soleil.



Le système héliocentrique d'Aristarque de Samos

Aristarque de Samos (310 - 230 av JC)

élève de Straton de Lampsaque (aristotélien) à Alexandrie

Le Monde est clos et sphérique.

Toutes les planètes tournent autour du Soleil.

Le Soleil est au centre de l'univers.

Les orbites sont circulaires et **centrées sur le Soleil.**

La Lune tourne autour de la Terre.

La Terre tourne sur elle-même en 24 heures.

La sphère des étoiles est immobile.

Mercure et Vénus restent toujours proches du Soleil.

Ce système rend compte de la rétrogradation des planètes . . .



Hipparque de Nicée (190 – 120 av JC)

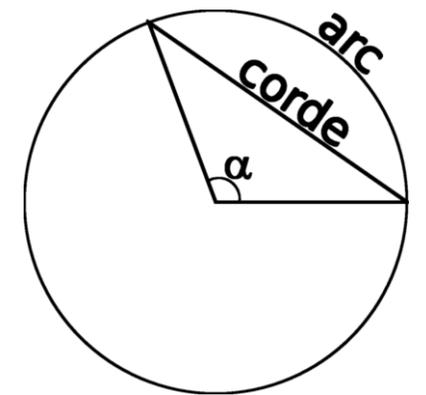
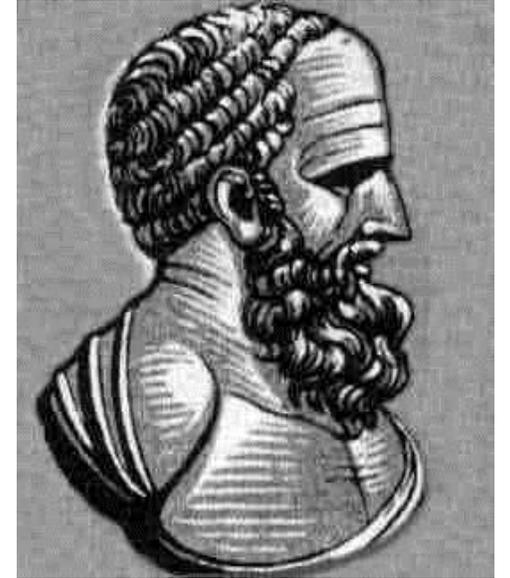
Il est considéré comme le plus grand astronome d'observation de l'Antiquité.

Il construit une table de cordes en divisant le cercle en 360° .

Il utilise les observations des astronomes babyloniens et réalise un catalogue de plus de 850 étoiles.

En comparant ses observations au catalogue de Timocharis d'Alexandrie (360 – 220 av JC), il découvre la précession des équinoxes.

Il étudie le mouvement des astres.



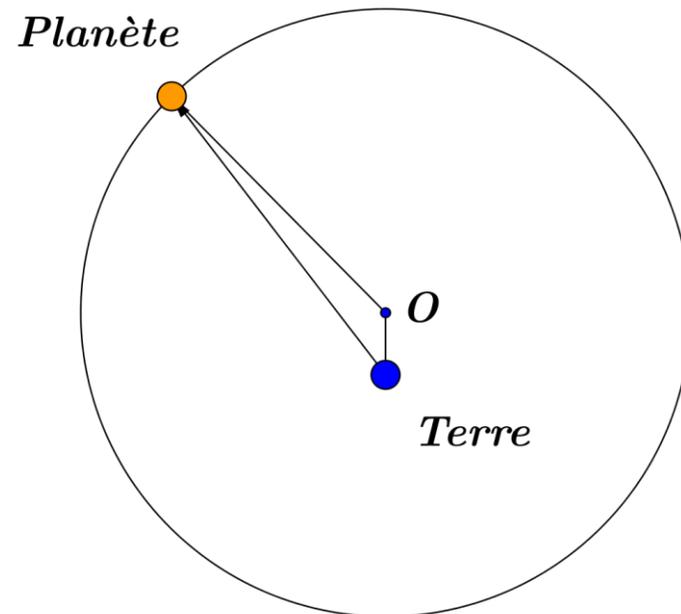
Epicycles et excentriques

Pour expliquer l'irrégularité du mouvement du Soleil et de la Lune, Hipparque propose deux solutions :

Epicycles et excentriques

Pour expliquer l'irrégularité du mouvement du Soleil et de la Lune, Hipparque propose deux solutions :

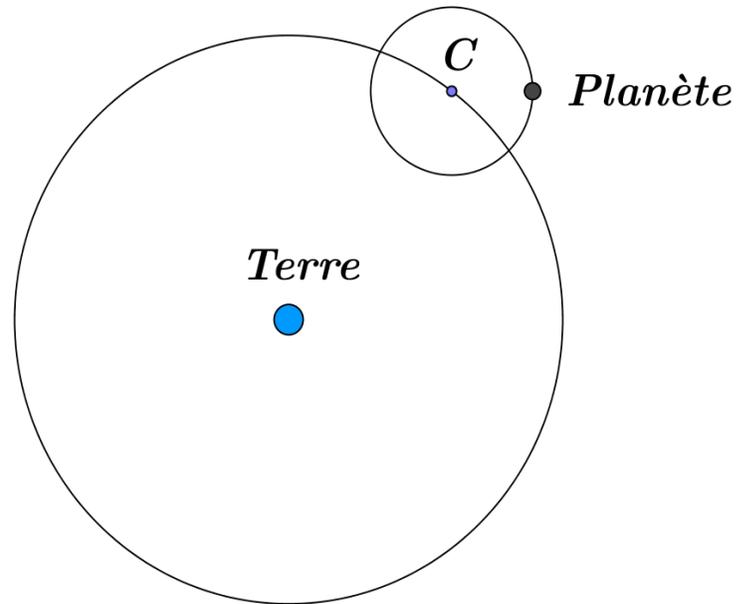
1. Les excentriques : le centre de l'orbite est décalé par rapport à la Terre



Epicycles et excentriques

Pour expliquer l'irrégularité du mouvement du Soleil et de la Lune, deux solutions sont possibles :

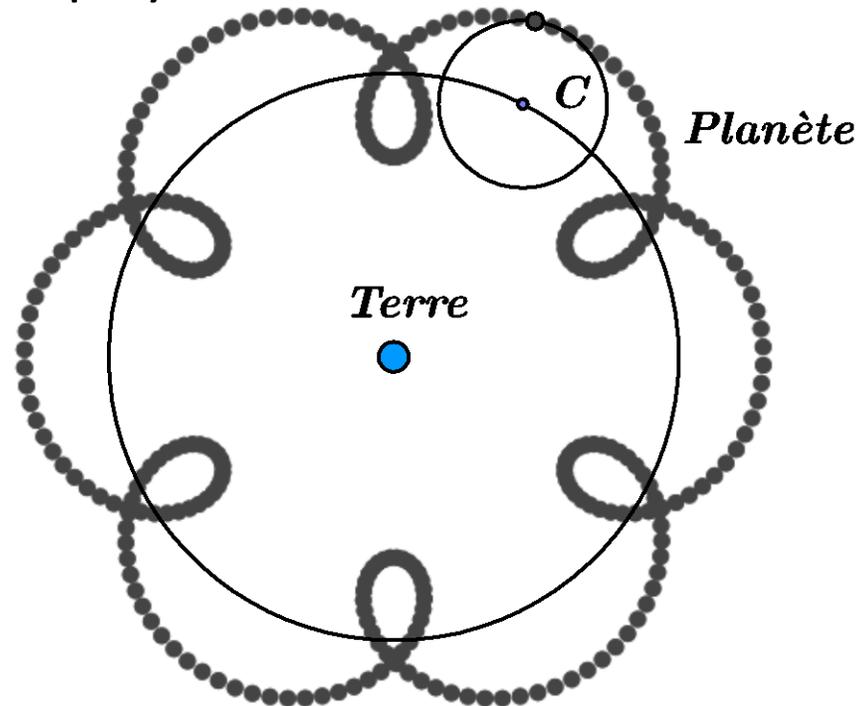
1. **Les excentriques** : le centre de l'orbite est décalé par rapport à la Terre
2. **Les épicycles** : la Terre est au centre d'un cercle nommé **déférent** (du latin *deferens*, portant). Le centre C de l'épicycle se meut sur le déférent autour de la Terre tandis que la planète parcourt son épicycle.



Epicycles et excentriques

Pour expliquer l'irrégularité du mouvement du Soleil et de la Lune, deux solutions sont possibles :

1. **Les excentriques** : le centre de l'orbite est décalé par rapport à la Terre
2. **Les épicycles** : la Terre est au centre d'un cercle nommé **déférent** (du latin *deferens*, portant). Le centre C de l'épicycle se meut sur le déférent autour de la Terre tandis que la planète parcourt son épicycle.



Epicycles et excentriques

Pour expliquer l'irrégularité du mouvement du Soleil et de la Lune, Hipparque propose deux solutions :

- 1. Les excentriques** : le centre de l'orbite est décalé par rapport à la Terre
- 2. Les épicycles** : la Terre est au centre d'un cercle nommé **déférent** (du latin deferens, portant). Le centre C de l'épicycle se meut sur le déférent autour de la Terre tandis que la planète parcourt son épicycle.

Hipparque démontre que ces deux mouvements sont identiques si la révolution de l'épicycle s'effectue dans le même temps que la révolution autour du déférent.

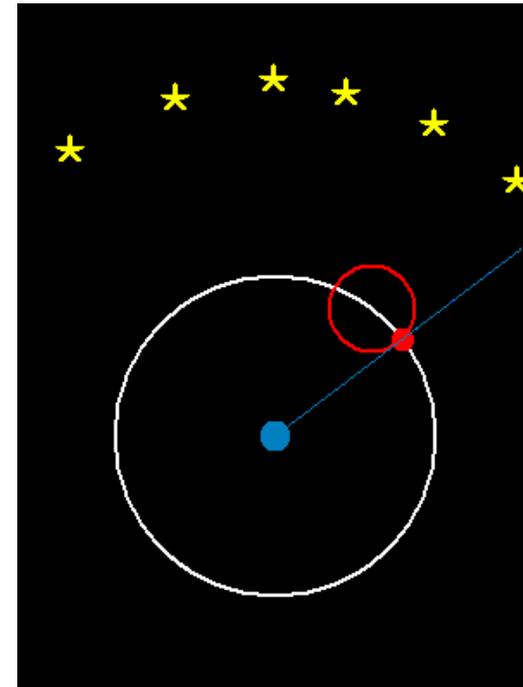
Epicycles et excentriques

Pour expliquer l'irrégularité du mouvement du Soleil et de la Lune, Hipparque propose deux solutions :

1. **Les excentriques** : le centre de l'orbite est décalé par rapport à la Terre
2. **Les épicycles** : la Terre est au centre d'un cercle nommé **déférent** (du latin deferens, portant). Le centre C de l'épicycle se meut sur le déférent autour de la Terre tandis que la planète parcourt son épicycle.

Hipparque démontre que ces deux mouvements sont identiques si la révolution de l'épicycle s'effectue dans le même temps que la révolution autour du déférent.

Hipparque choisit la méthode des épicycles qui permet de rendre compte de la rétrogradation des planètes.



Ptolémée ou le triomphe du géocentrisme

Claude Ptolémée (89 - 168) astronome, astrologue, géographe et mathématicien d'Alexandrie.

Il est l'auteur de la **Composition mathématique** (*Mathēmatikē súntaxis*) qui deviendra en arabe *al-Mijisti* (la très grande), puis reviendra en occident sous le nom de l'**Almageste**.



Ptolémée ou le triomphe du géocentrisme

Claude Ptolémée (89 - 168) astronome, astrologue, géographe et mathématicien d'Alexandrie.

Il est l'auteur de la **Composition mathématique** (*Mathēmatikē súntaxis*) qui deviendra en arabe *al-Mijisti* (la très grande), puis reviendra en occident sous le nom de l'**Almageste**.

L'*Almageste* constitue la somme des connaissances les plus avancées de l'antiquité en mathématiques et en astronomie.

On y trouve :

- un catalogue de 1022 étoiles et 48 constellations ;
- une amélioration du modèle de système solaire d'Hipparque ;
- des tables permettant le calcul de la position du Soleil, de la Lune et des 5 planètes.



Ptolémée ou le triomphe du géocentrisme

Claude Ptolémée (89 - 168) astronome, astrologue, géographe et mathématicien d'Alexandrie.

Il est l'auteur de la **Composition mathématique** (*Mathēmatikē súntaxis*) qui deviendra en arabe *al-Mijisti* (la très grande), puis reviendra en occident sous le nom de l'**Almageste**.

L'*Almageste* constitue la somme des connaissances les plus avancées de l'antiquité en mathématiques et en astronomie.

On y trouve :

- un catalogue de 1022 étoiles et 48 constellations ;
- une amélioration du modèle de système solaire d'Hipparque ;
- des tables permettant le calcul de la position du Soleil, de la Lune et des 5 planètes.



L' *Almageste* est resté la référence pendant 15 siècles.

Le plan de l'*Almageste*

Livre I. Exposé du système géocentrique ; trigonométrie ; mesure de l'obliquité de l'écliptique ; tables.

Livre II. Théorie des climats, définis par la durée du plus long jour de l'année.

Le plan de l'*Almageste*

Livre I. Exposé du système géocentrique ; trigonométrie ; mesure de l'obliquité de l'écliptique ; tables.

Livre II. Théorie des climats, définis par la durée du plus long jour de l'année.

Livre III. De la grandeur de l'année. Table du mouvement moyen du Soleil.

Livre IV. Théorie de la Lune. Périodes lunaires, détermination des mouvements moyens de longitude, d'anomalie et de latitude pour la Lune, et du mouvement des nœuds. Tables. Anomalie d'excentricité.

Livre V. De la construction de l'astrolabe. Seconde anomalie de la Lune. Correction de la de parallaxe pour le Soleil et la Lune. Tables.

Livre VI. Diamètres apparents du Soleil et de la Lune. Prédiction des éclipses. Tables.

Le plan de l'*Almageste*

Livre I. Exposé du système géocentrique ; trigonométrie ; mesure de l'obliquité de l'écliptique ; tables.

Livre II. Théorie des climats, définis par la durée du plus long jour de l'année.

Livre III. De la grandeur de l'année. Table du mouvement moyen du Soleil.

Livre IV. Théorie de la Lune. Périodes lunaires, détermination des mouvements moyens de longitude, d'anomalie et de latitude pour la Lune, et du mouvement des nœuds. Tables. Anomalie d'excentricité.

Livre V. De la construction de l'astrolabe. Seconde anomalie de la Lune. Correction de la de parallaxe pour le Soleil et la Lune. Tables.

Livre VI. Diamètres apparents du Soleil et de la Lune. Prédiction des éclipses. Tables.

Livre VII. Précession des équinoxes. Catalogue des étoiles de l'hémisphère boréal.

Livre VIII. Catalogue des étoiles de l'hémisphère austral. Levers et couchers des fixes.

Le plan de l'*Almageste*

Livre I. Exposé du système géocentrique ; trigonométrie ; mesure de l'obliquité de l'écliptique ; tables.

Livre II. Théorie des climats, définis par la durée du plus long jour de l'année.

Livre III. De la grandeur de l'année. Table du mouvement moyen du Soleil.

Livre IV. Théorie de la Lune. Périodes lunaires, détermination des mouvements moyens de longitude, d'anomalie et de latitude pour la Lune, et du mouvement des nœuds. Tables. Anomalie d'excentricité.

Livre V. De la construction de l'astrolabe. Seconde anomalie de la Lune. Correction de la de parallaxe pour le Soleil et la Lune. Tables.

Livre VI. Diamètres apparents du Soleil et de la Lune. Prédiction des éclipses. Tables.

Livre VII. Précession des équinoxes. Catalogue des étoiles de l'hémisphère boréal.

Livre VIII. Catalogue des étoiles de l'hémisphère austral. Levers et couchers des fixes.

Livre IX. Préliminaires de la théorie des planètes et théorie de Mercure.

Livre X. Théorie de Vénus et de Mars.

Livre XI. Théorie de Jupiter et Saturne. Tables d'équations des planètes en longitude.

Livre XII. Calcul des rétrogradations, stations et digressions.

Livre XIII. Mouvement des planètes en latitude ; prévision de leurs phases d'apparition et disparition. Tables

Le système de Ptolémée

Ptolémée combine **épicycles** et **excentriques**.

Ptolémée introduit la notion de point **équiant**.

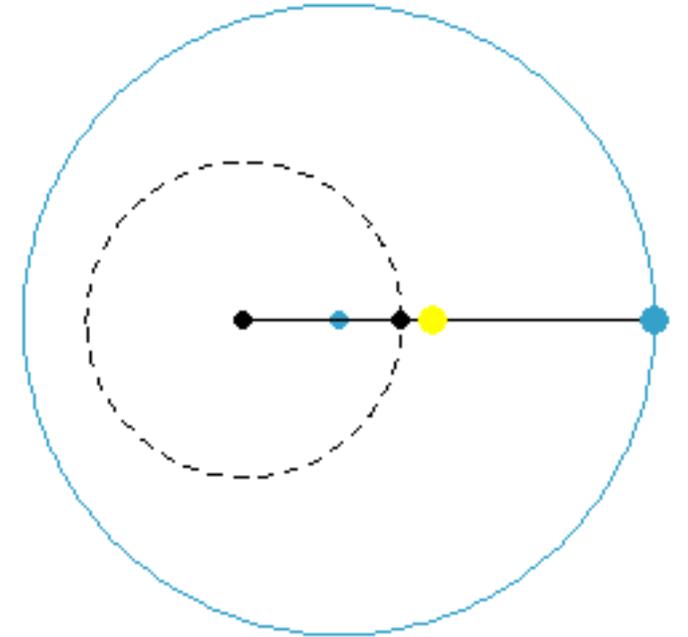
La Terre est le point jaune immobile.

La planète est le point bleu mobile.

Le centre de l'excentrique est le point bleu immobile.

L'équiant est le point noir immobile d'où on voit la planète décrire une trajectoire avec une vitesse angulaire constante.

Au total, Ptolémée utilise 40 cercles !

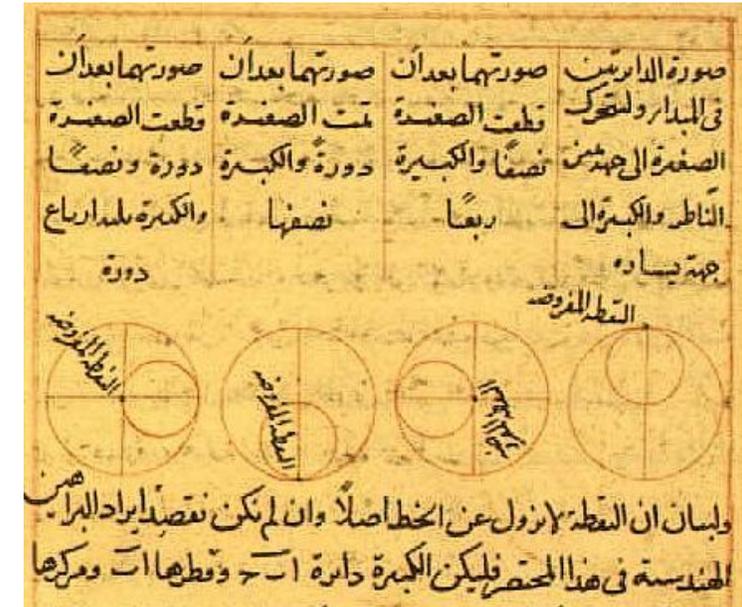


Très compliqué mais les apparences sont sauvées. . . pour 15 siècles !

L'héritage d'Aristote et de Ptolémée

Du IX^e au XI^e s., un bilan critique du système de Ptolémée est fait. Il devient difficile de concilier les principes d'Aristote et les mouvements observés.

Dans le monde arabe, l'appropriation du modèle géocentrique sera très tôt suivi de critiques puis de tentatives d'amélioration.



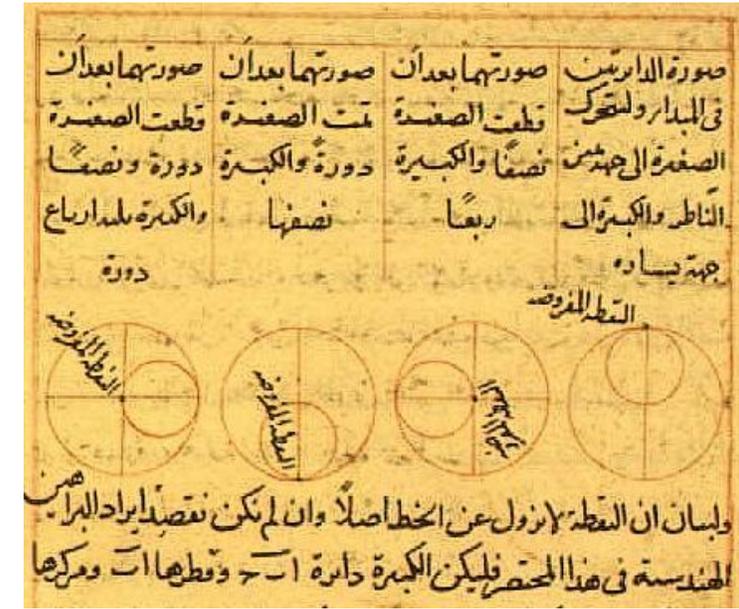
L'héritage d'Aristote et de Ptolémée

Du IX^e au XI^e s., un bilan critique du système de Ptolémée est fait. Il devient difficile de concilier les principes d'Aristote et les mouvements observés.

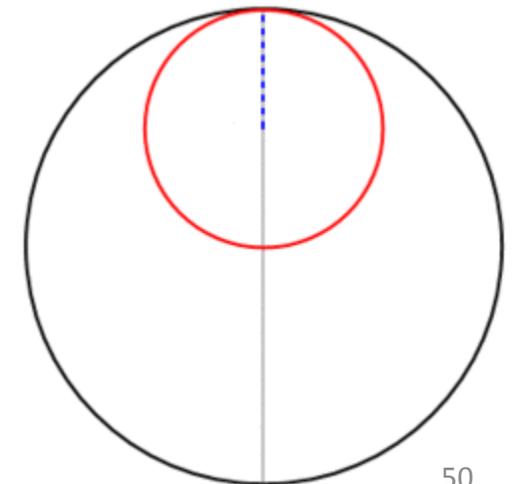
Dans le monde arabe, l'appropriation du modèle géocentrique sera très tôt suivi de critiques puis de tentatives d'amélioration.

À l'observatoire de Maragha (Perse), al-Tusi (1201-1274) et ses disciples mettent au point de nouveaux modèles planétaires dont les résultats sont plus précis.

Dans la même lignée, Ibn al-Shatir (1304-1375) parvient à un modèle géocentrique presque parfait par un système de mouvements circulaires uniformes.



Couple d'al-Tusi



Le monde héliocentrique

La Renaissance

Sclérose scholastique

- Les universités diffusent un enseignement très figé
dans les contenus (arts, médecine, droit, théologie)
dans les méthodes (*lectio, quaestio, disputatio*)
- Le dogme aristotélicien est omniprésent.

La Renaissance

Sclérose scholastique

- Les universités diffusent un enseignement très figé dans les contenus (arts, médecine, droit, théologie)
dans les méthodes (*lectio, quaestio, disputatio*)
- Le dogme aristotélicien est omniprésent.

L'humanisme succède à la philosophie scholastique

- Explosion artistique en Italie au XIV^e siècle.
- De nouvelles universités sont créées.
- Invention de l'imprimerie en 1451.

Le contexte religieux



Réforme ...

- 1517 Luther dénonce les abus de l'Église catholique.
- 1521 Luther est excommunié.
- 1540 L'Europe du Nord-Ouest est acquise à la réforme.
- 1545 Concile de Trente : l'Église catholique réaffirme sa discipline et ses dogmes.

Le contexte religieux



Réforme ...

- 1517 Luther dénonce les abus de l'Église catholique.
- 1521 Luther est excommunié.
- 1540 L'Europe du Nord-Ouest est acquise à la réforme.
- 1545 Concile de Trente : l'Église catholique réaffirme sa discipline et ses dogmes.

... et contre-réforme

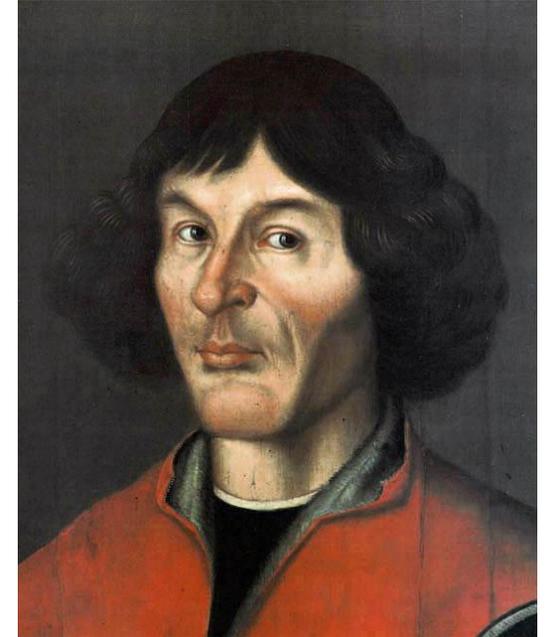
- Les guerres de religion ensanglantent l'Europe.
- Persécution des protestants dans les pays catholiques et des catholiques en pays protestants.
- L'inquisition démasque les protestants et brûle les livres *mis à l'index*

Copernic (1473 – 1543)

Nicolas Copernic après des études de philosophie et médecine à Cracovie, suit des leçons d'astronomie ce qui déclenche sa vocation.

En 1497, il voyage en Italie où il complète sa formation, en particulier auprès de l'astronome Novara.

En 1503, il rentre définitivement en Pologne en tant que chanoine de la paroisse de Frauenburg.



Copernic (1473 – 1543)

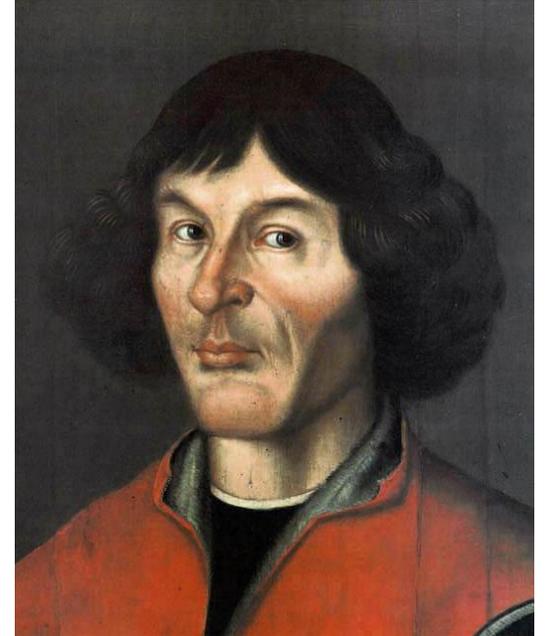
Nicolas Copernic après des études de philosophie et médecine à Cracovie, suit des leçons d'astronomie ce qui déclenche sa vocation.

En 1497, il voyage en Italie où il complète sa formation, en particulier auprès de l'astronome Novara.

En 1503, il rentre définitivement en Pologne en tant que chanoine de la paroisse de Frauenburg.

Dans son *Commentariolus* écrit au début des années 1510, il indique son désaccord avec le système de Ptolémée et énonce pour la première fois ses principes de l'astronomie héliocentrique. Ce mémoire n'est pas publié mais circule sous forme de manuscrit.

Son œuvre majeure, *De revolutionibus orbium coelestium*, ne sera publiée qu'une trentaine d'années plus tard en 1543, l'année de sa mort.



De revolutionibus orbium coelestium (1543)

NICOLAI COPERNICI PERNICI TORINENSIS DE REVOLUTIONIBVS ORBI- um coelestium, Libri VI.

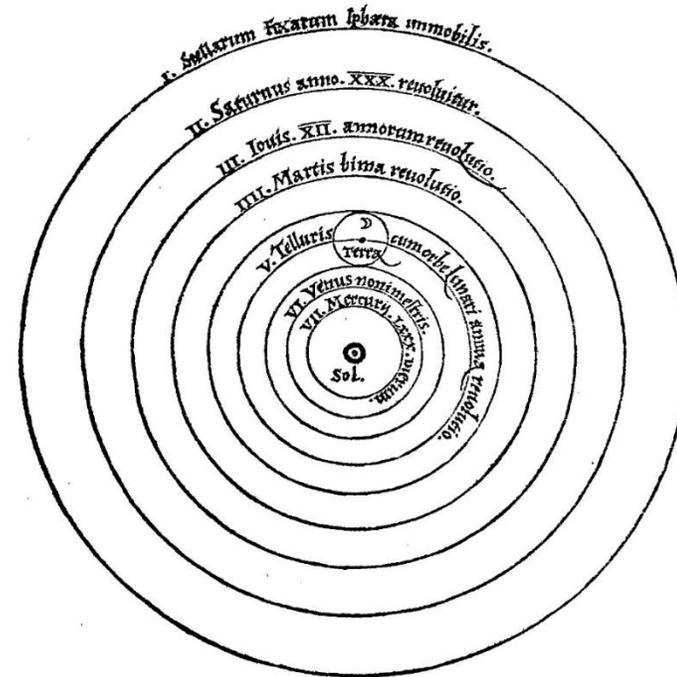
Habes in hoc opere iam recens nato, & ædito, studiose lector, Motus stellarum, tam fixarum, quàm erraticarum, cum ex ueteribus, tum etiam ex recentibus obseruationibus restitutos: & nouis insuper ac admirabilibus hypothefibus ornatos. Habes etiam Tabulas expeditissimas, ex quibus eisdem ad quoduis tempus quàm facillime calculare poteris. Igitur eme, lege, frue.

Ἀγαμέμνων ἰδέει εἰσαίτω.

Norimbergæ apud Ioh. Petreium,
Anno M. D. XLIII.

NICOLAI COPERNICI

net, in quo terram cum orbe lunari tanquam epicyclo contineri diximus. Quinto loco Venus nono mense reducitur. Sextum deniq; locum Mercurius tenet, octuaginta dierum spacio circū currens. In medio uero omnium residet Sol. Quis enim in hoc



pulcherimo templo lampadem hanc in alio uel meliori loco poneret, quàm unde totum simul possit illuminare: Siquidem non incepte quidam lucernam mundi, alij mentem, alij rectorem uocant. Trimegistus uisibilem Deum, Sophoclis Electra intuentē omnia. Ita profecto tanquam in solio re galis Sol residens circum agentem gubernat Astrorum familiam. Tellus quoq; minime fraudatur lunari ministerio, sed ut Aristoteles de animalibus ait, maximā Luna cū terra cognatio nē habet. Concipit interea à Sole terra, & impregnatur annuo partu. Inuenimus igitur sub hac

De revolutionibus orbium coelestium (1543)

L'ouvrage est organisé comme l'*Almageste*. Il comporte six livres.

Le livre I présente l'organisation générale du monde et les fondements physiques sur lesquels Copernic s'appuie.

Le livre II porte sur l'astronomie sphérique. Il présente, en outre, un catalogue d'étoiles, corrigeant les observations de Ptolémée.

Le livre III aborde la question du mouvement apparent du Soleil.

Le livre IV expose le mouvement de la Lune et le mécanisme des éclipses.

Les livres V et VI sont consacrés aux mouvements des planètes, en longitude et en latitude.

Le système de Copernic



Pas si simplificateur, finalement :
7 mouvements circulaires uniformes
2 rotations (Terre et Lune)
39 épicycles !

48 mouvements contre 40 pour
Ptolémée !

Tycho Brahe (1546 – 1610)

Issu de la haute noblesse danoise, c'est un homme ombrageux, têtu, autoritaire.

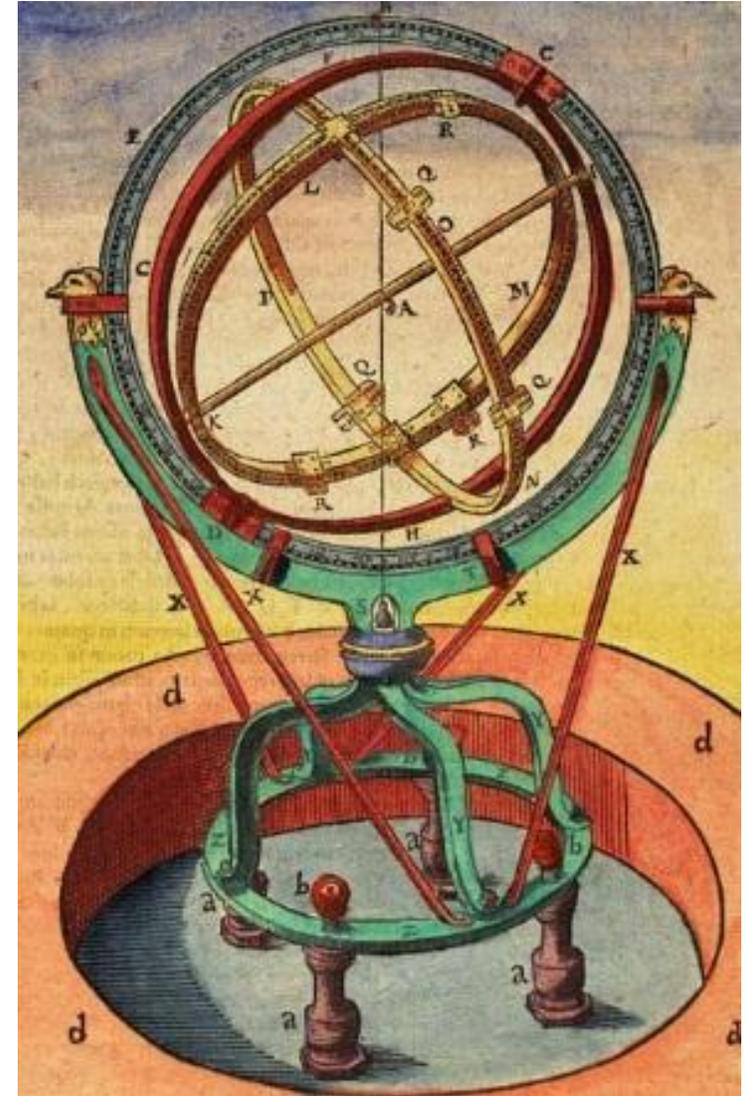
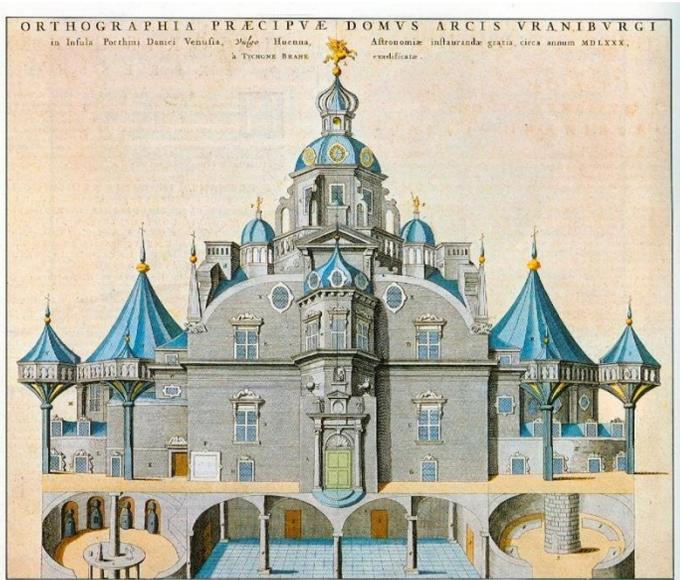
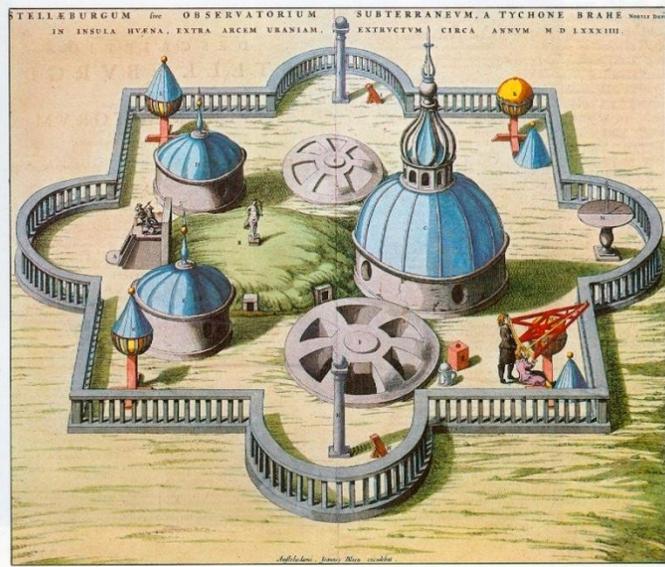
Il est passionné d'**astronomie** mais aussi de géographie, d'alchimie et d'astrologie.

Il fonde un grand observatoire astronomique moderne Uraniborg sur son île (Hven).

Il réalise des observations très précises portant leur résolution à 2' d'angle.



Tycho Brahe, le plus grand observateur à l'œil nu



Les observations de Tycho Brahe

Tycho Brahe fait 2 observations importantes :

- **la supernova de 1572**

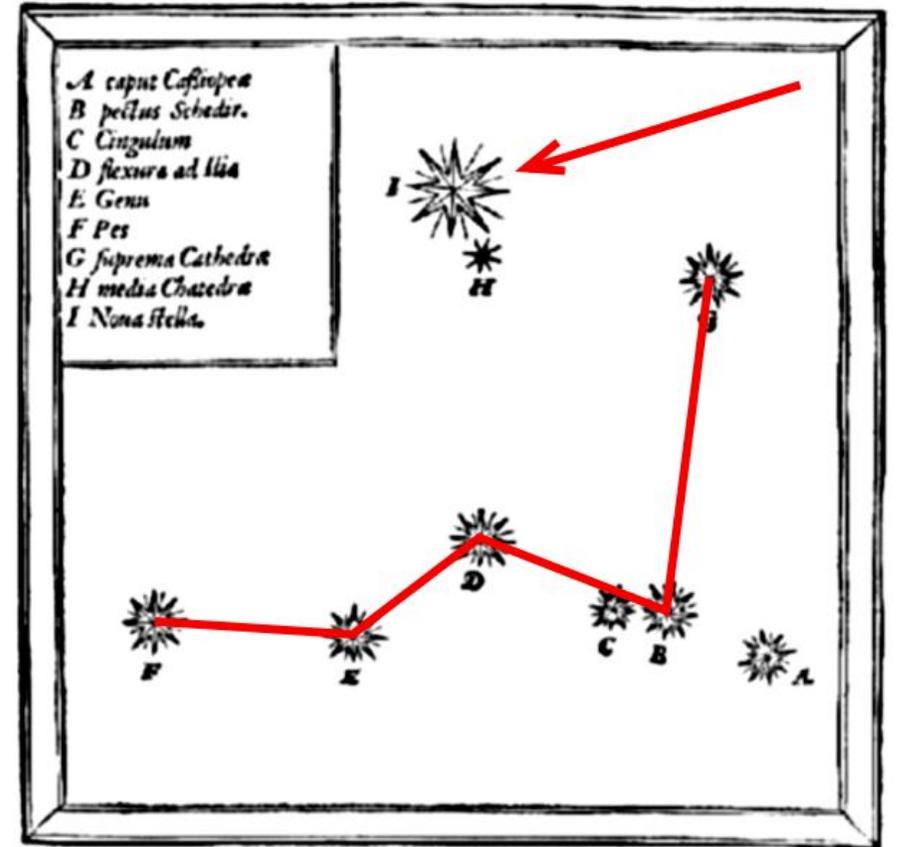
Le 11 novembre, Tycho Brahe voit apparaître une étoile très brillante dans Cassiopée, qui disparaîtra progressivement jusqu'en 1574

Il arrive donc que de nouvelles étoiles (nova stella) apparaissent.

- **la grande comète de 1577**

Sa parallaxe diurne est trop faible pour être mesurée.

La comète est bien plus éloignée que la Lune.



Le système du monde de Tycho Brahe

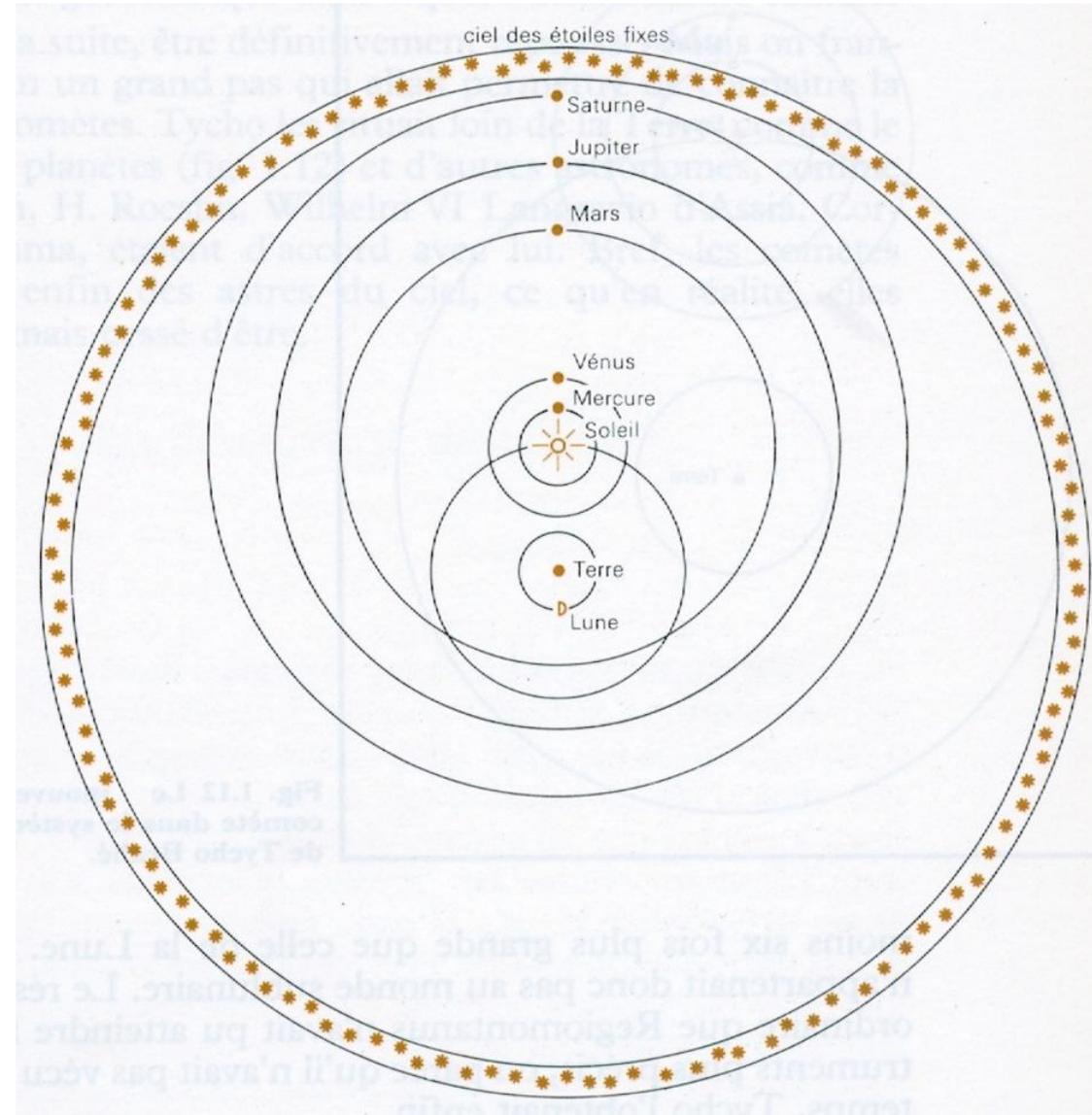
La sphère des fixes est toujours à la même distance de la Terre.

La Terre est au centre de l'Univers.

La Lune tourne autour de la Terre.

Le Soleil tourne autour de la Terre.

Les planètes tournent autour du Soleil.



Johannes Kepler (1571 – 1630)

Johannes Kepler est issu d'une famille très modeste. C'est un personnage austère.

Il est protestant, prône l'œcuménisme et est rejeté par les partisans de la réforme comme ceux de la contre-réforme.

Affligé d'une mauvaise vue, il ne sera jamais un observateur de la trempe de Tycho Brahe.



Le secret du monde (*Mysterium Cosmographicum*)

Kepler est convaincu :

- par le système héliocentrique de Copernic
- que les mouvements des planètes constituent un message divin adressé à l'Homme
- qu'il doit trouver l'harmonie du monde

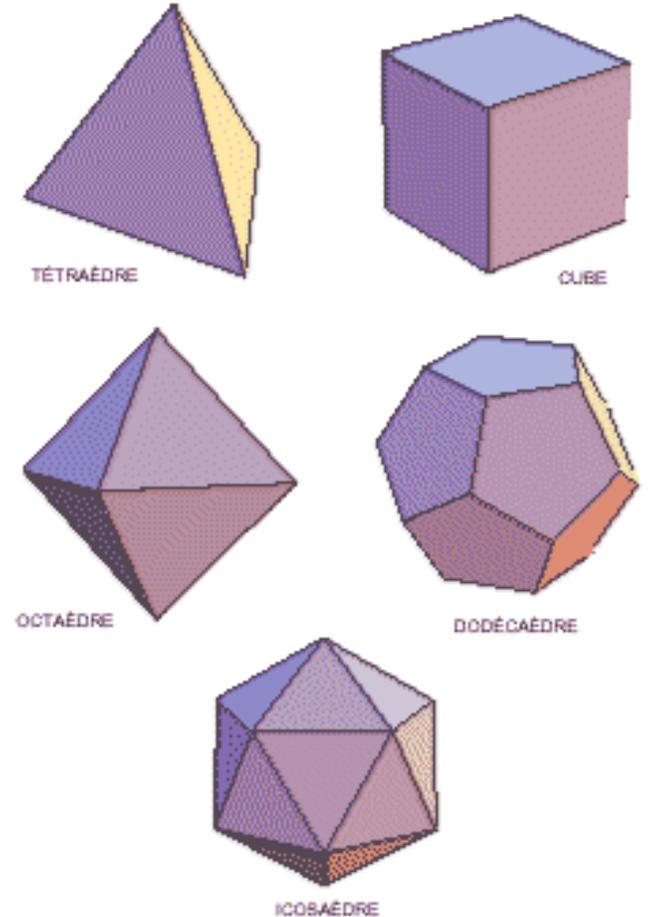
Le secret du monde (*Mysterium Cosmographicum*)

Kepler est convaincu :

- par le système héliocentrique de Copernic
- que les mouvements des planètes constituent un message divin adressé à l'Homme
- qu'il doit trouver l'harmonie du monde

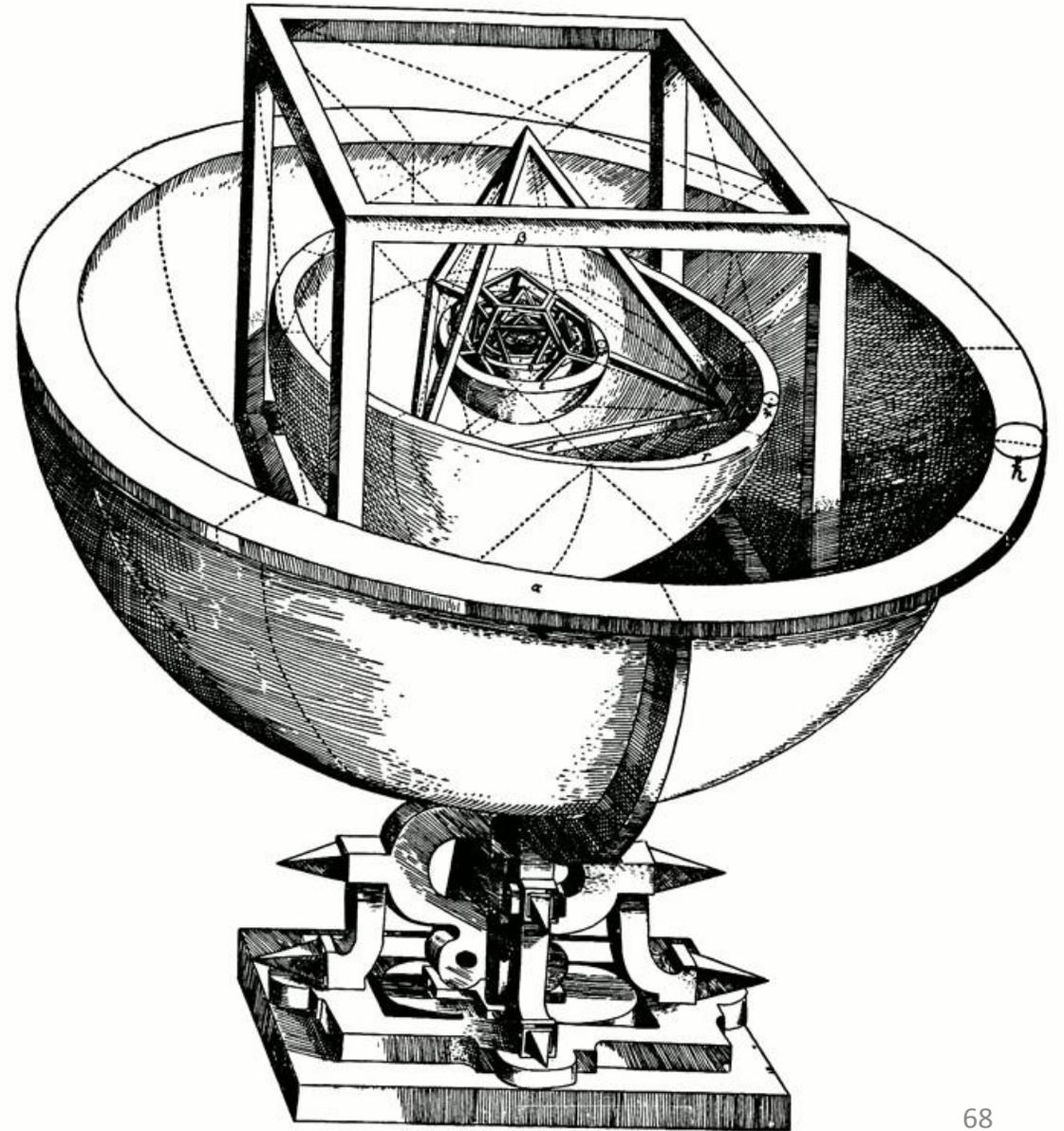
- 5 solides de Platon = 5 intervalles entre les 6 planètes
- chaque solide est circonscrit à l'orbe de la planète immédiatement inférieure
- chaque solide est inscrit dans l'orbe de la planète immédiatement supérieure

Les Solides de Platon



Le secret du monde (*Mysterium Cosmographicum*)

La sphère de Saturne inscrit
un cube qui inscrit
la sphère de Jupiter qui inscrit
un tétraèdre qui inscrit
la sphère de Mars qui inscrit
un dodécaèdre qui inscrit
la sphère de la Terre qui inscrit
un icosaèdre qui inscrit
la sphère de Vénus qui inscrit
un octaèdre qui inscrit
la sphère de Mercure.



La rencontre Tycho Brahe - Kepler

Tycho Brahe ne partage pas les idées de Kepler (ni l'héliocentrisme, ni son goût pour les spéculations) mais reconnaît ses talents de mathématicien.

Il invite Kepler à Prague en 1600. Kepler, chassé de Gratz par la contre-réforme, devient assistant de Tycho Brahe.

Tycho Brahe apprécie le travail de Kepler mais se méfie : il lui délivre ses observations au compte-goutte . . .

À la mort de Tycho Brahe, en 1601, Kepler hérite de ses fonctions, de ses observations.

La période 1601-1612 sera la plus productive de Kepler

Kepler (*L'Astronomie nouvelle*, 1609)

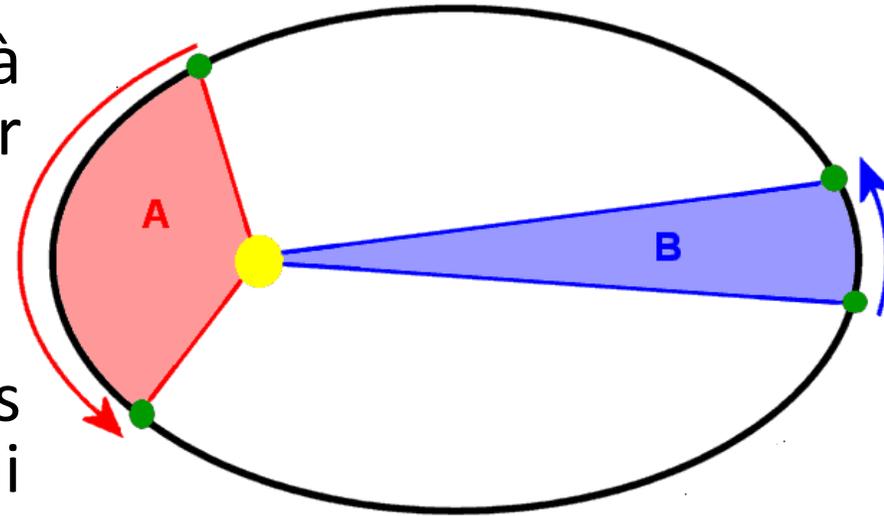
Plus les observations sont précises (Tycho Brahe : 2'), plus il est difficile de "sauver les apparences" !

Huit années de travail intense seront nécessaires à Kepler pour élaborer la théorie de Mars et publier l'« *Astronomia Nova* » (1609).

Kepler trouve sa 2^e loi (loi des aires).

Il doit se résigner, on ne peut rendre compte des observations de Tycho Brahe ni avec les épicycles ni avec les excentriques

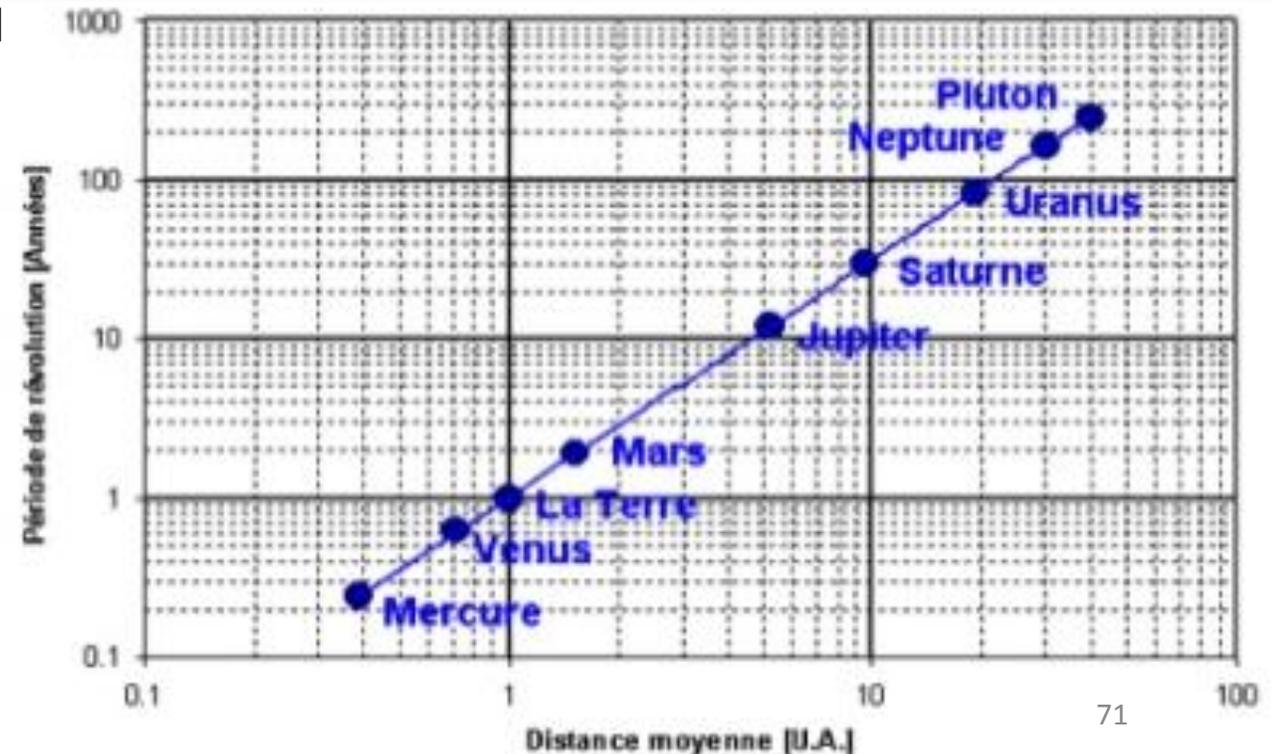
L'orbite de Mars n'est pas un cercle parfait : **c'est une ellipse** (1^{re} loi) !



Kepler (*L'Harmonie du monde*, 1609)

En 1619, Kepler publie « *Harmonices Mundi* », ouvrage mêlant des considérations esthétiques et des éléments essentiels de la physique comme :

- la responsabilité du Soleil dans l'attraction des planètes (cause magnétique)
- la 3^e loi de Kepler : $a^3/T^2 = \text{cte}$, où
 - a est le demi grand-axe de l'orbite de la planète relativement au demi grand-axe de l'orbite terrestre
 - T est la période de révolution de la planète autour du Soleil en années.



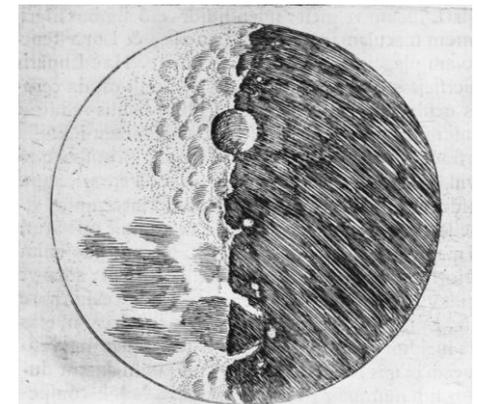
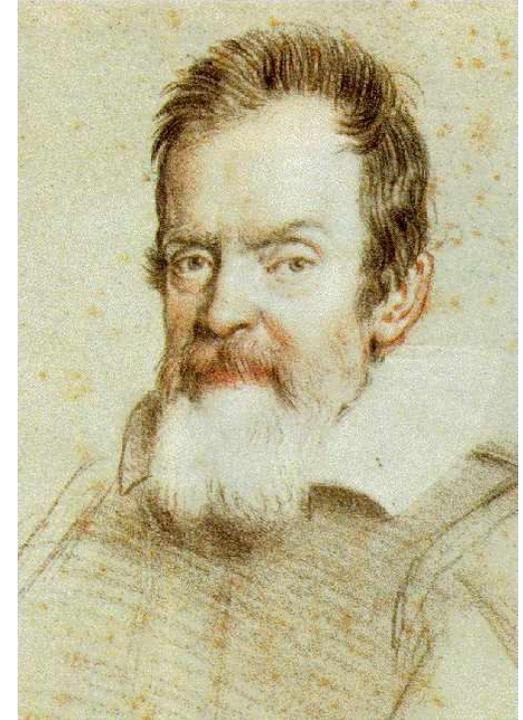
Galilée (1564 – 1642)

Galileo Galilei dit Galilée, est issu d'une famille peu fortunée de la noblesse italienne.

Il apprend l'existence de la lunette en Hollande. Il en construit et les perfectionne pour observer le ciel.

Il découvre :

- des montagnes et des cratères sur la Lune
- des taches solaires
- les phases de Vénus
- les satellites de Jupiter



Galilée (1564 – 1642)

Galileo Galilei dit Galilée, est issu d'une famille peu fortunée de la noblesse italienne.

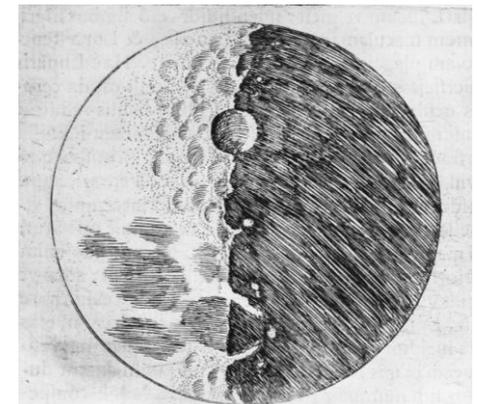
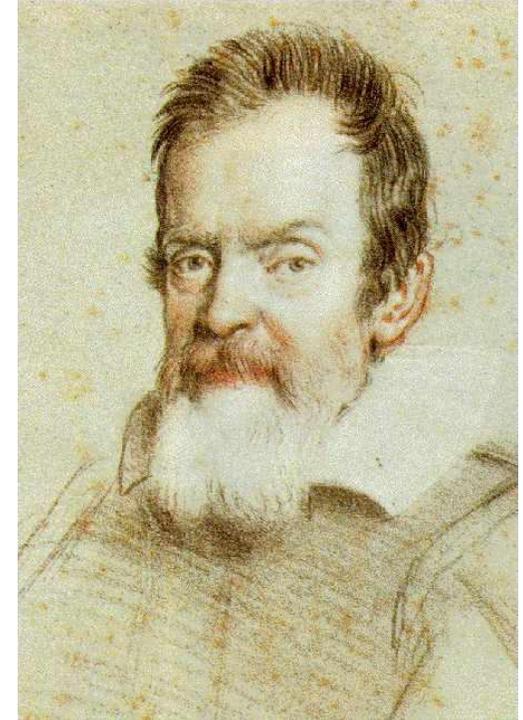
Il apprend l'existence de la lunette en Hollande. Il en construit et les perfectionne pour observer le ciel.

Il découvre :

- des montagnes et des cratères sur la Lune
- des taches solaires
- les phases de Vénus
- les satellites de Jupiter

En mars 1610, il publie dans le *Sidereus Nuncius*, ces découvertes qui remettent en cause la vision platonicienne et géocentrique de l'Univers.

Dès lors, Galilée se fait l'avocat inconditionnel du système héliocentrique.



Les démêlés de Galilée avec l'Église (1616)

Le cardinal Bellarmin reconnaît l'intérêt pratique de l'héliocentrisme pour les calculs astronomiques mais il demande une réfutation concluante du géocentrisme faute de quoi il condamnera l'héliocentrisme en tant que vérité physique.

Les démêlés de Galilée avec l'Église (1616)

Le cardinal Bellarmin reconnaît l'intérêt pratique de l'héliocentrisme pour les calculs astronomiques mais il demande une réfutation concluante du géocentrisme faute de quoi il condamnera l'héliocentrisme en tant que vérité physique.

Galilée échoue à démontrer le mouvement de la Terre par les marées et il refuse de considérer l'héliocentrisme comme une hypothèse.

La thèse copernicienne est condamnée mais Galilée n'est pas inquiété. Il lui est simplement notifié que l'héliocentrisme, étant contraire aux Saintes-Écritures, ne peut, à ce stade, être défendu ou enseigné.

Les démêlés de Galilée avec l'Église (1633)

Le pape Urbain VIII (Barberini) lui commande un ouvrage qui présenterait de façon impartiale le système ptoléméen et le système copernicien.

En 1632, il publie le *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* où interviennent *Salviati* (partisan du système copernicien), *Simplicio* (partisan du système ptoléméen) et *Sagredo* (qui cherche la vérité).

Les aristotéliens se sentent ridiculisés.

Les démêlés de Galilée avec l'Église (1633)

Le pape Urbain VIII (Barberini) lui commande un ouvrage qui présenterait de façon impartiale le système ptoléméen et le système copernicien.

En 1632, il publie le *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* où interviennent *Salviati* (partisan du système copernicien), *Simplicio* (partisan du système ptoléméen) et *Sagredo* (qui cherche la vérité).

Les aristotéliens se sentent ridiculisés.

Galilée est convoqué par le Saint-Office en 1632 pour avoir tenu et cru à une doctrine contraire aux Saintes-Écritures (l'héliocentrisme) et avoir défendu qu'elle était prouvable.

En 1633, il est condamné à la prison à vie (commué immédiatement par le pape en assignation à résidence) pour hérésies, il doit prononcer une formule d'abjuration et le *Dialogue* est interdit.