

# Astrophysique

## 4 – À la découverte du système solaire



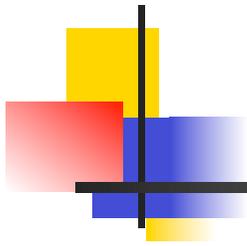
Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA



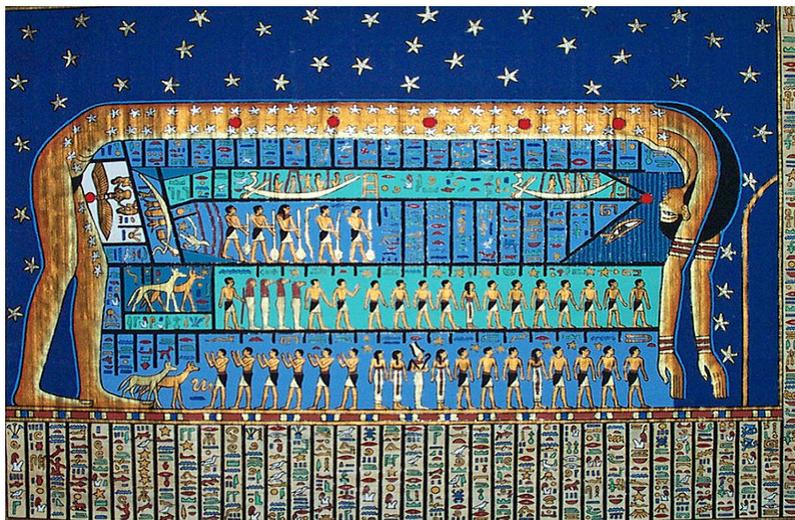




# SE REPÉRER DANS LE CIEL

# La voûte céleste

- Une voûte ? Pas pour les Égyptiens du temps des Pharaons



- Proche-Orient
- Afrique
- Mexique
- Inde



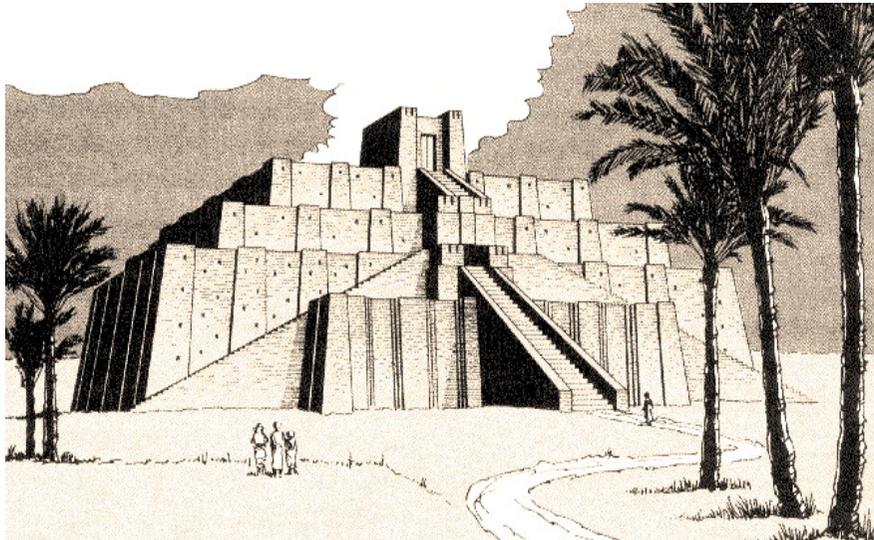
- En Chine, le Ciel est rond et la Terre carrée



Temple à Chang-an (Xi'an) ©F. Guerry

## C'était à Ur en Chaldée...

- Du haut de la ziggourat



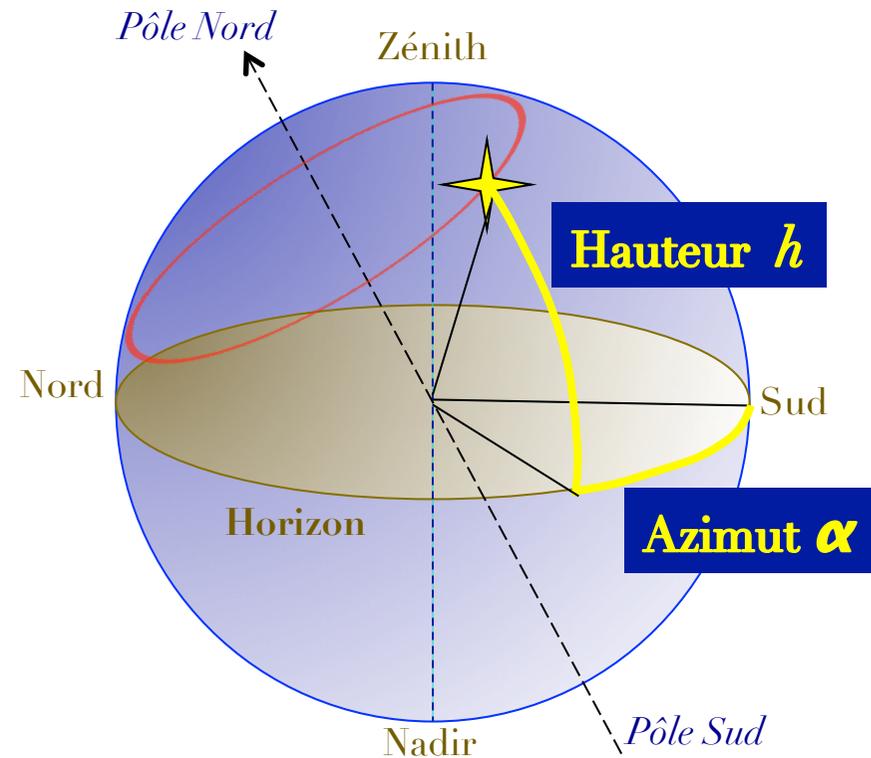
- Le soleil se lève tous les jours à *peu près* dans la même direction, l'Est
- Il passe au plus haut du ciel *toujours* dans la même direction, le Sud
- Il se couche tous les jours à *peu près* dans la même direction, l'Ouest

- Observations

- En été le Soleil se lève plus à l'Est qu'en hiver, monte plus haut dans le ciel au Sud, et se couche plus à l'Ouest
- La nuit apparaissent des centaines d'étoiles
- Celles qui sont du côté du Sud se lèvent vers l'Est, montent dans le ciel et disparaissent vers l'Ouest
- Celles qui sont du côté du Nord sont toujours présentes
- L'ensemble des étoiles tourne *en bloc* au cours de la nuit, autour d'un point dans la direction du Nord,  $33^\circ$  au-dessus de l'horizon (à Ur)
- Cinq ont un mouvement différent

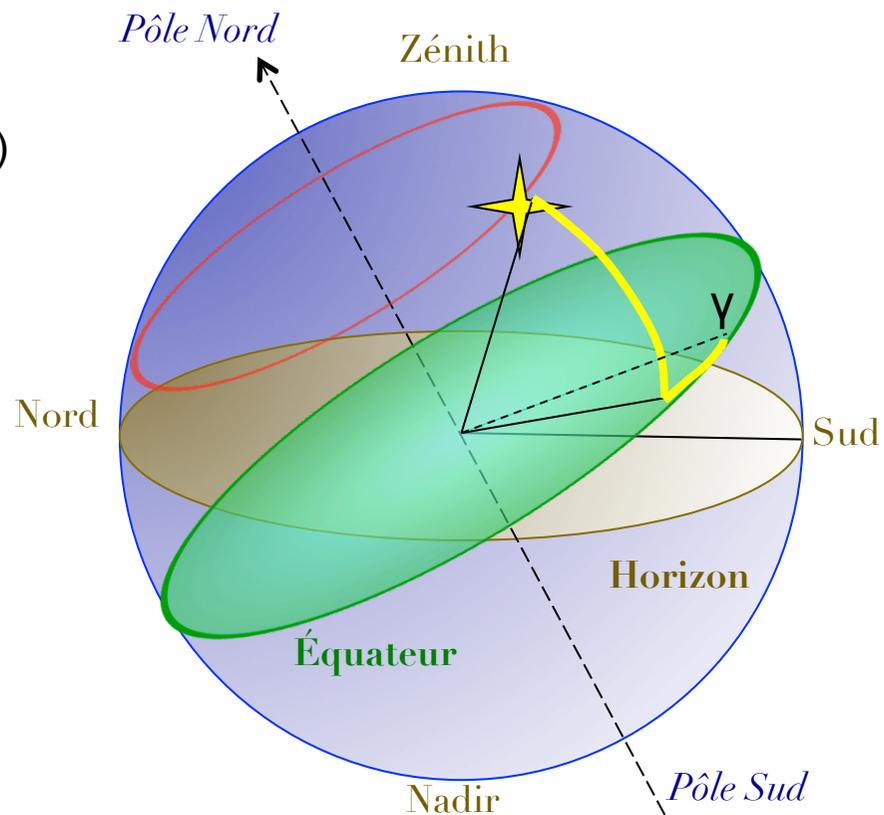
# Coordonnées horizontales (ou altazimutales)

- Par rapport à l'horizon du lieu d'observation
  - À un instant donné, on mesure
    - la hauteur  $h$  (en degrés) de l'étoile au-dessus de l'horizon
    - l'azimut  $\alpha$  qui est l'angle (en degrés) entre la direction du Sud et l'intersection de la hauteur avec l'horizon
- Inconvénients
  - Varie au cours de la nuit et de l'année
  - Varie d'un lieu d'observation à un autre

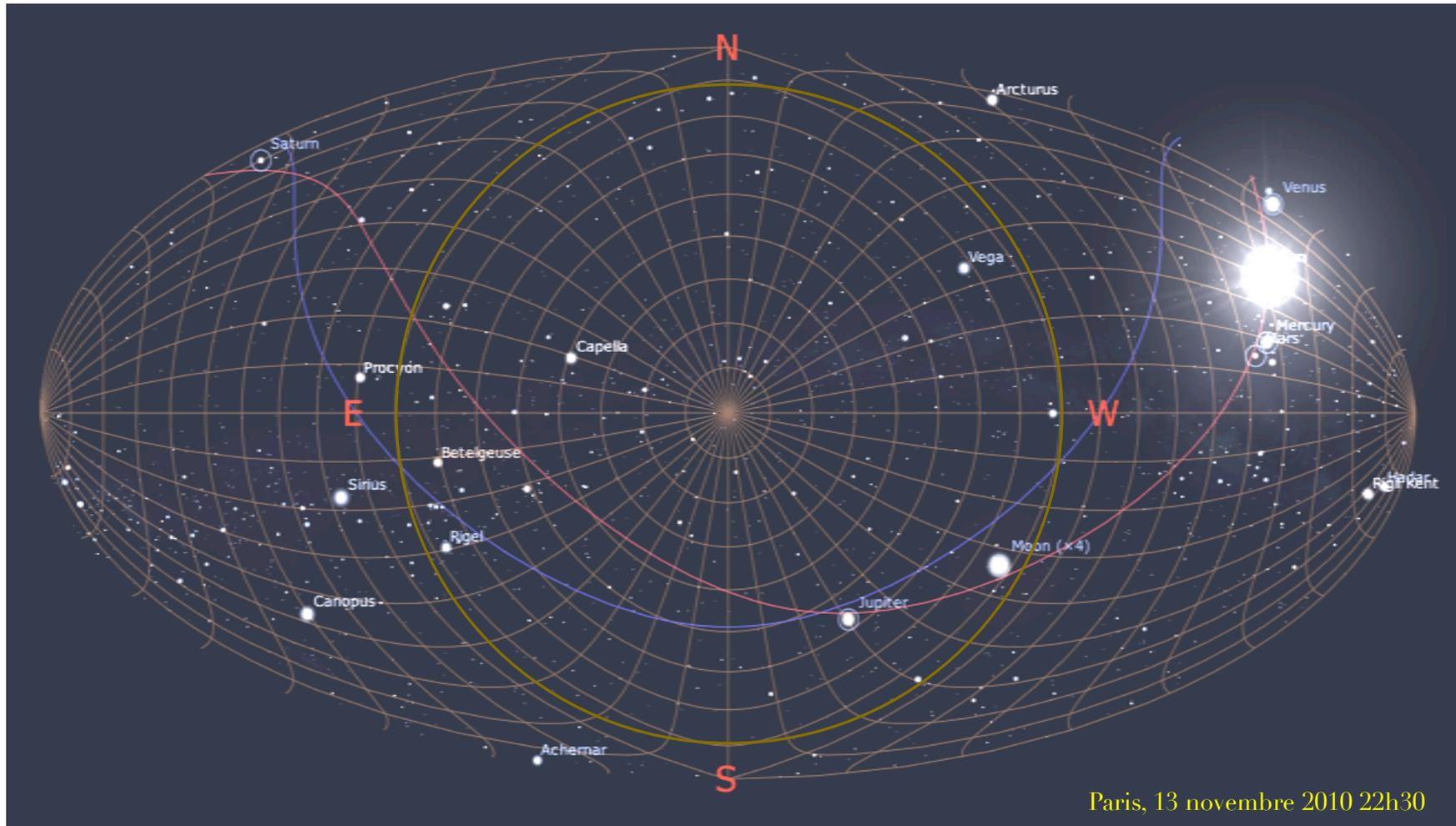


# Coordonnées équatoriales

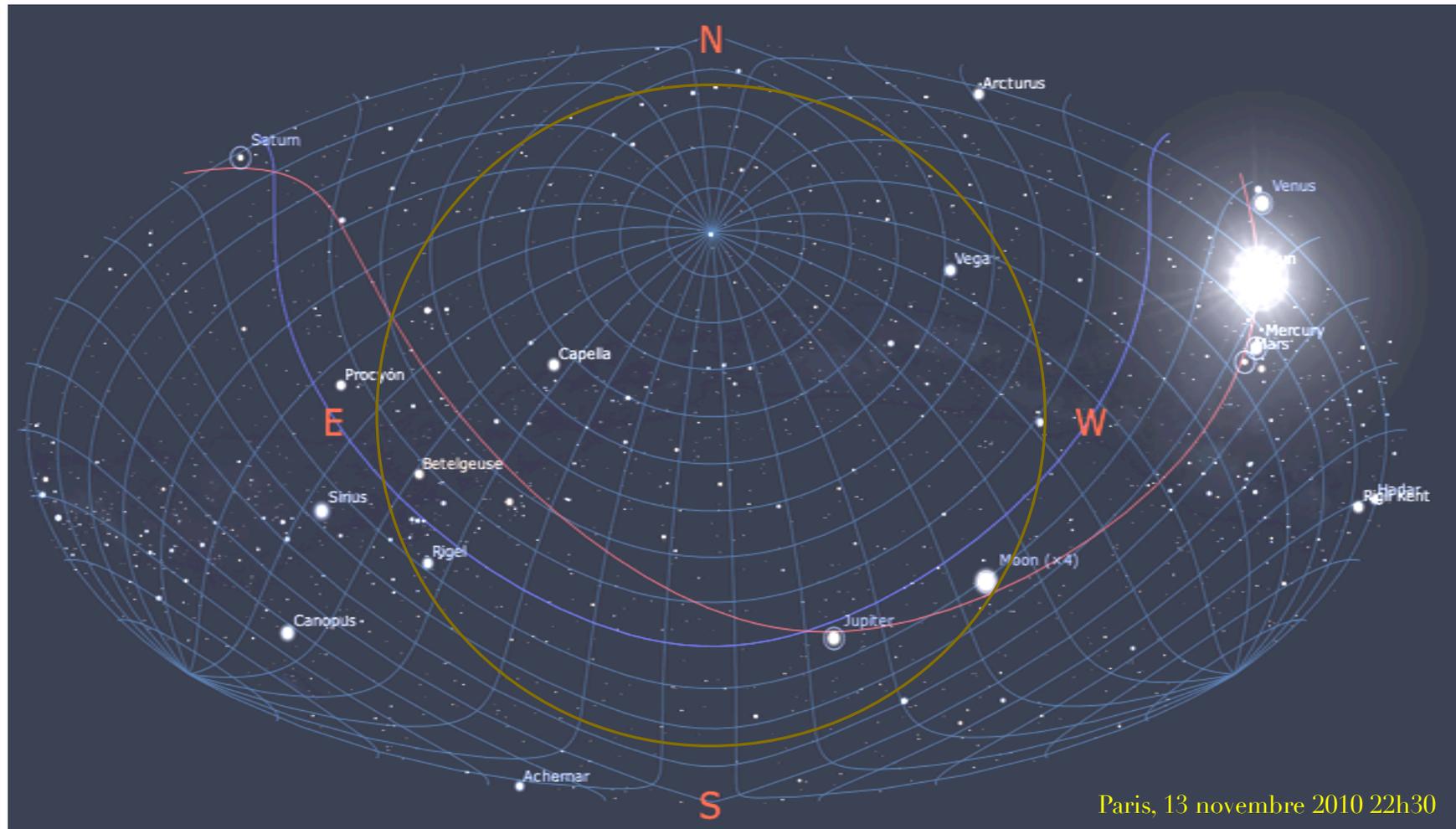
- Plus pratique pour un astronome
- Analogue au système de coordonnées terrestres
- Parallèles → **déclinaison** (en degrés)
  - Comptés en + ou – à partir de l'équateur
- Méridiens → **ascension droite** (en heures)
  - Comptées à partir du point vernal  $\gamma$  (croisement de l'équateur avec l'écliptique)
  - Deux étoiles différant de 1h d'ascension droite passent à 1h d'intervalle au méridien du lieu d'observation
- Coordonnées indépendantes du lieu et de l'heure d'observation

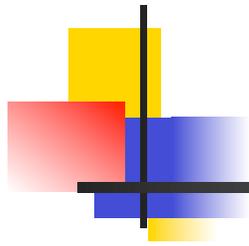


# Coordonnées altazimutales



# Coordonnées équatoriales





# À LA DÉCOUVERTE DU SYSTÈME SOLAIRE

# Le Soleil

- Divinité ?



- Sans lui la vie est impossible
- Mais il peut aussi apporter la mort

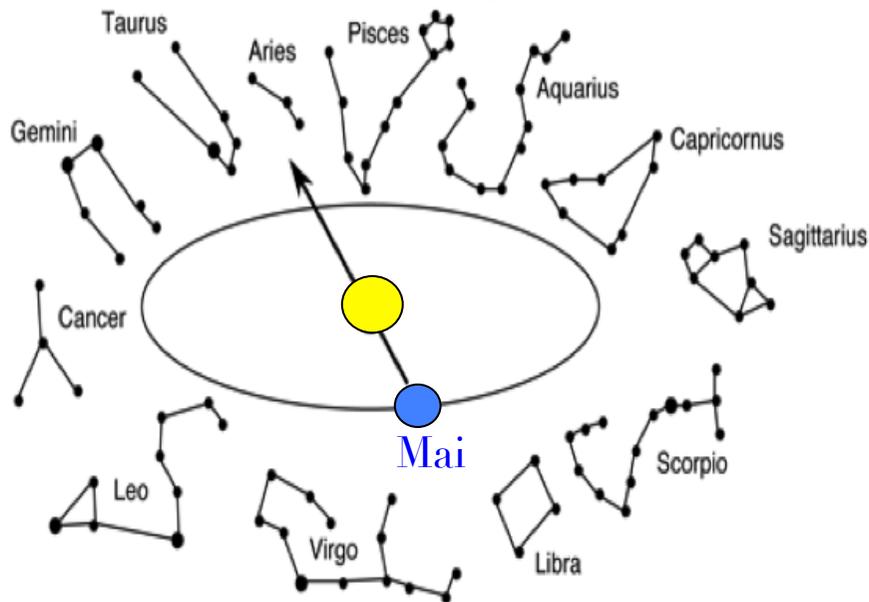
- Saisons

- En été, le Soleil monte plus haut dans le ciel et il fait plus chaud
- En hiver, il monte moins haut et il fait plus froid



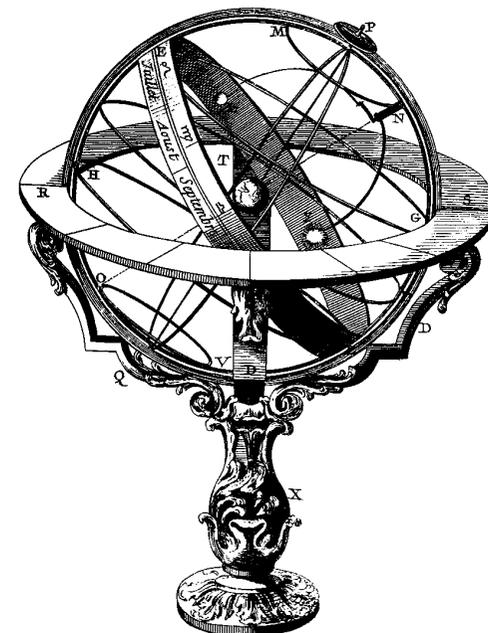
# Zodiaque

- Par rapport aux étoiles, le point où se lève le Soleil se décale de  $1^\circ$  chaque jour
- Au cours d'une année, le Soleil se déplace d'une constellation à une autre, parcourant les 12 (ou 18?) constellations du **zodiaque**



# Écliptique

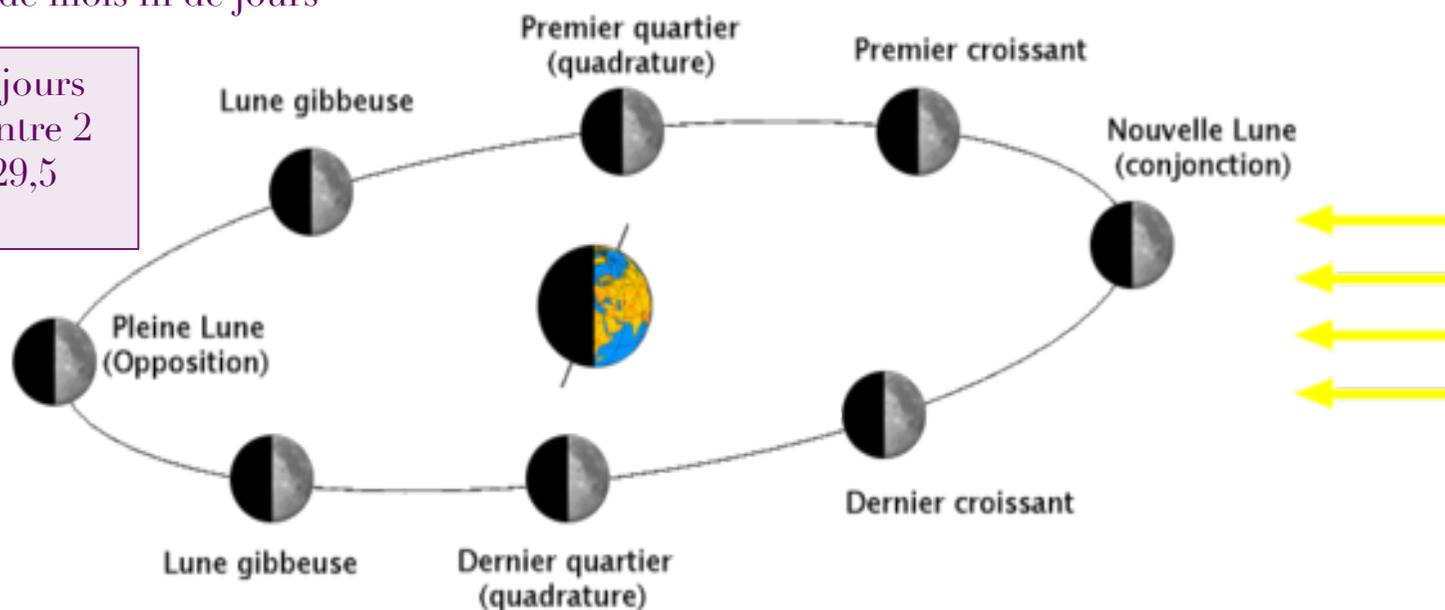
- Le trajet que parcourt ainsi le Soleil en un an sur le fond des étoiles définit l'**écliptique**
- C'est une **courbe plane**
- Les planètes se déplacent toutes dans des plans très proches de l'écliptique



# La Lune

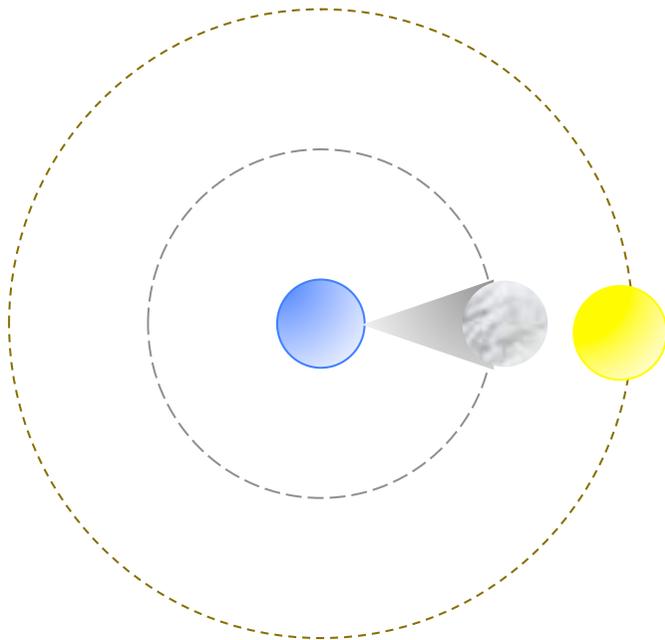
- L'objet le plus brillant du ciel, à part le Soleil
- Les mêmes *phases* se reproduisent tous les 28 jours à peu près → définit le mois
  - Complication : le mois n'a pas un nombre entier de jours, et l'année n'a un nombre entier ni de mois ni de jours
- Cycle divisé en 4 quartiers
  - → la semaine de 7 jours
  - dont les noms reprennent ceux des 7 planètes (Lune, Mars, Mercure, Jupiter, Vénus, Saturne [sabbat] et le Soleil)

Mois sidéral : 27,3 jours  
Mois synodique (entre 2 nouvelles lunes) : 29,5 jours

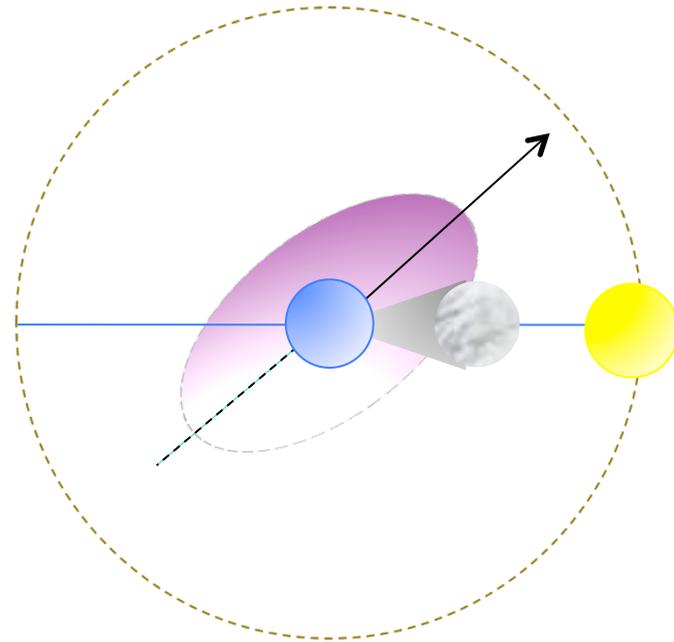


# Éclipses de Soleil

- Dues au passage de la Lune devant le Soleil
- → la Lune est plus proche de la Terre que le Soleil
- Mais il n'y a pas une éclipse de Soleil à chaque nouvelle Lune



- → les deux orbites ne sont pas dans le même plan (écart de  $5^\circ$ )
- → les éclipses ne sont possibles qu'à de rares occasions



- qui se reproduisent à peu près tous les 223 mois (*saros*)

# Les astres errants: les planètes

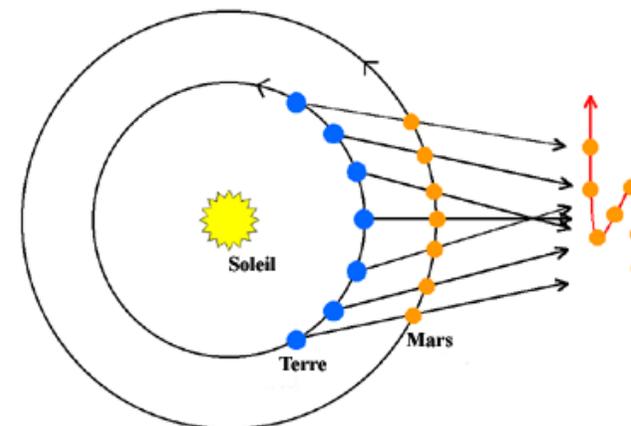
## ■ Vénus

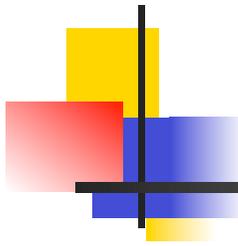
- Les Babyloniens découvrirent l'identité de « l'étoile du soir » avec « l'étoile du matin » et ils la nommèrent Ishtar

## ■ Et les autres?

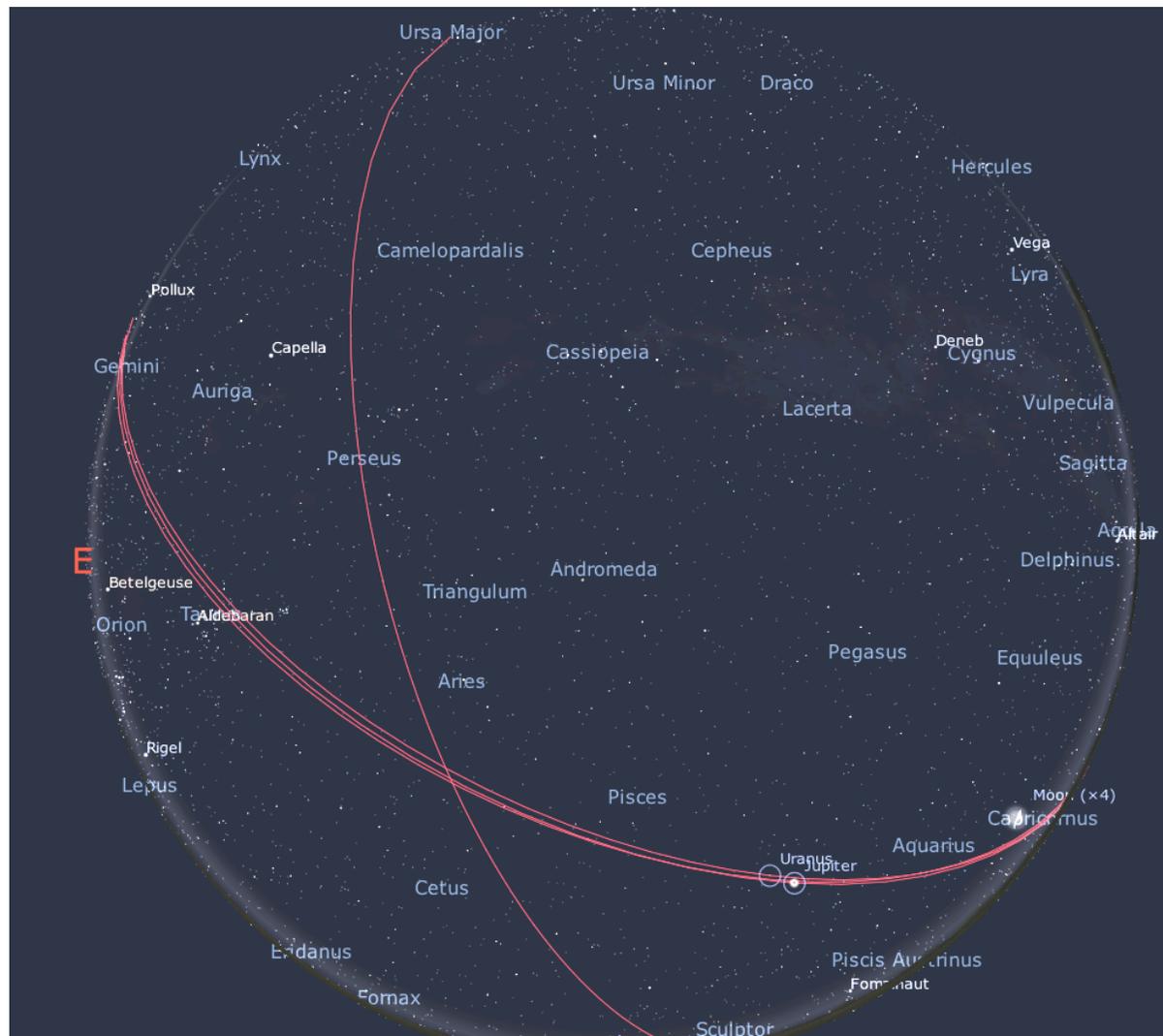
- Les Babyloniens nommèrent les 7 astres mobiles du nom de leurs principales divinités
  - Samash le Soleil
  - Nin la Lune
  - Ishtar Vénus
  - Nergal Mars
  - Mardouk Jupiter
  - Ninurta Saturne
  - mais pas le dieu du ciel An, celui de l'eau, Enki/Ea, ni la déesse des Enfers, Ereshkigal (→ Uranus, Neptune, Pluton)
- Les Grecs, puis les Romains et nous les avons repris

## ■ La rétrogradation





# Les planètes ont toutes des trajectoires voisines



## Les astres errants: les comètes

- Kometes = astre chevelu

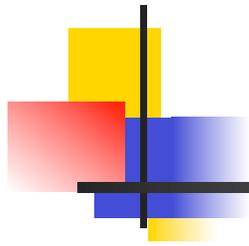


- Certains Babyloniens pensent que les comètes sont périodiques comme les planètes
- Aristote y voit un simple phénomène **atmosphérique**, parce qu'il varie avec le temps, comme les météores ou les aurores boréales

- La majorité des gens voient cependant dans l'apparition des comètes l'annonce de graves calamités
- Guerres, épidémies, famines, voire même le Déluge ou l'Apocalypse



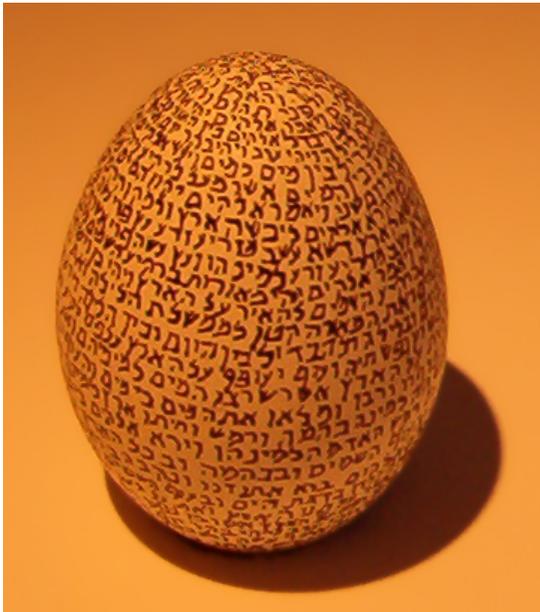
- et on « tire des plans sur la comète »



# **COMMENT METTRE UN PEU D'ORDRE DANS TOUT CELA ?**

# Cosmogonies

- L'être et le néant
- Le chaos primordial
- L'œuf primordial
- L'eau primordiale
- L'arbre de vie
- La parole créatrice (*logos*)



17 novembre 2010

## ■ Mythes de la Création

- «Lorsqu'en haut le ciel n'était pas encore nommé, qu'en bas la terre n'avait pas de nom, que le primordial Apsû, de qui naîtront les dieux, et Tiamat la génitrice qui les enfantera tous, mêlaient ensemble leurs eaux...»

*Enuma Elish* 𒂗 𒂗 𒂗 𒂗 𒂗

- «Au commencement, Dieu créa le ciel et la terre. Or la terre n'était que solitude et chaos; des ténèbres couvraient la face de l'abîme, et le souffle de Dieu planait à la surface des eaux. Dieu dit: "Que la lumière soit!" Et la lumière fut. Dieu considéra que la lumière était bonne, et il établit une distinction entre la lumière et les ténèbres.»

בְּרֵאשִׁית

*Bible, Genèse*



Alain Bouquet - Astrophysique 4

19

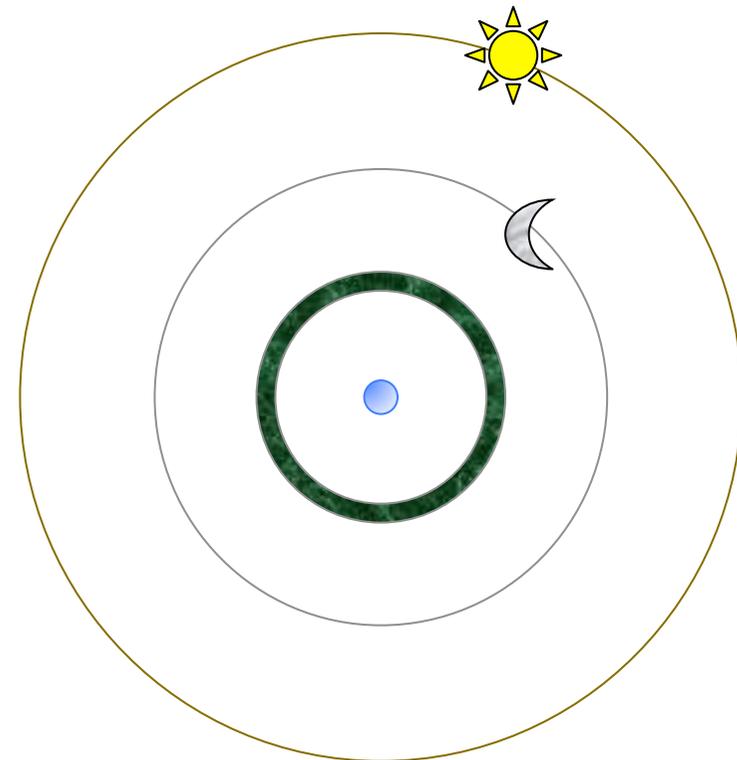
# Anaximandre de Milet (-610 -546)

- **Thalès de Milet : le monde est soumis à des lois**

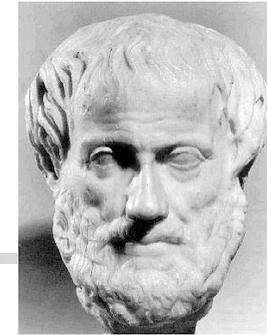
- **Anaximandre**

- Tout vient de l'*apeiron*, substance originelle, et y retourne
- Quatre éléments
- La Terre est **sphérique**, et centrale
- Les astres sont du feu
- Ils ne sont pas tous à la même distance de nous
  - Les étoiles et les planètes sont les plus proches, à ~9 rayons terrestres
  - La Lune est à ~18 rayons terrestres
  - Le Soleil est à ~27 rayons terrestres

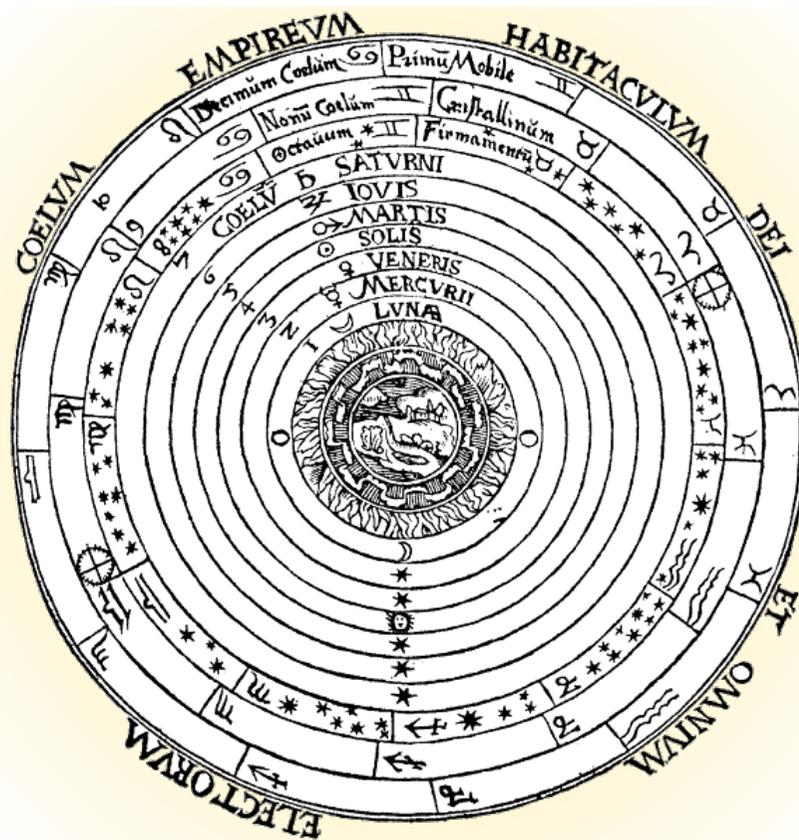
- La Lune passe devant le Soleil → éclipse



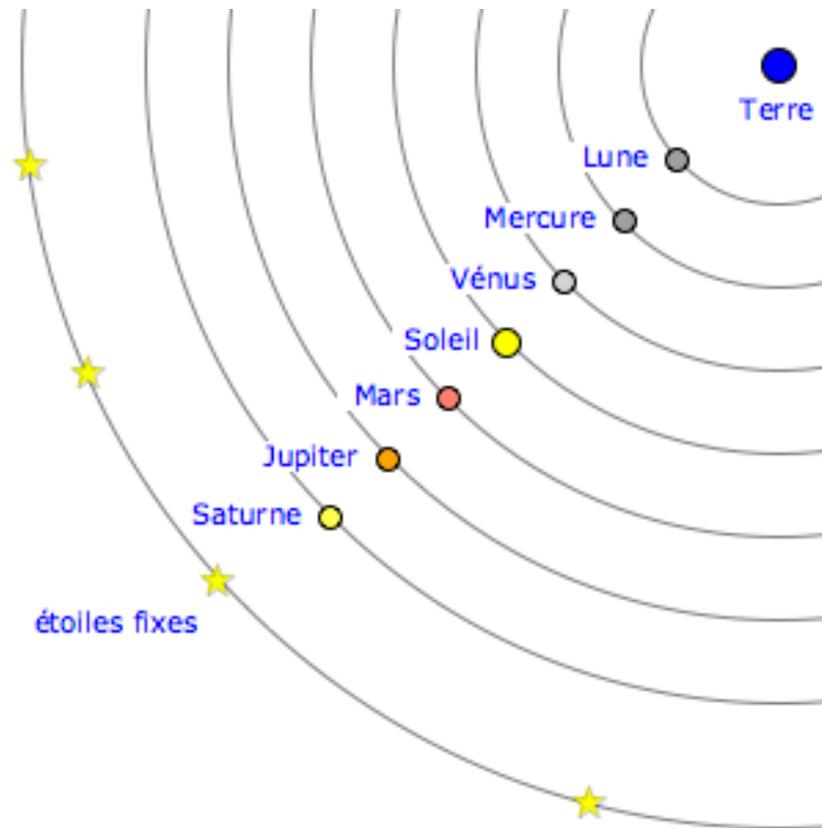
# Aristote (-384 -322)



- Modèle d'Eudoxe de sphères concentriques en rotation uniforme

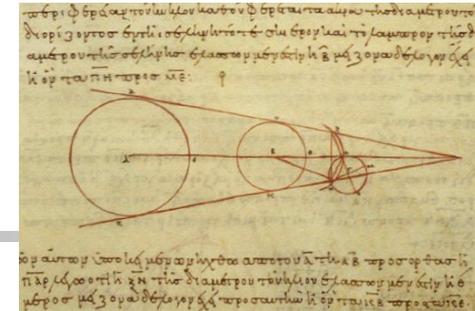


- Plus clairement



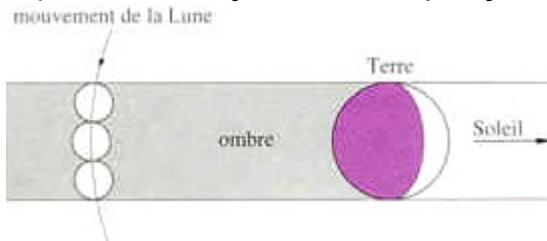
© Observatoire de Paris

# Aristarque de Samos (-310 -230)



## ■ Distance de la Lune

- Le diamètre angulaire de la Lune est de 30' d'arc ( $\frac{1}{2}^\circ$ )
- Sa distance est donc égale à ~120 fois son diamètre
- Elle se déplace de son diamètre en 1h ( $360^\circ$  en 29 jours =  $12^\circ$  par jour)



- Une éclipse totale de Lune dure ~ 2h  
→ le diamètre de la Lune est  $\frac{1}{3}$  de celui de la Terre
- → Sa distance est de  $120 \times \frac{1}{3} = 40$  diamètres terrestres (29 en fait)

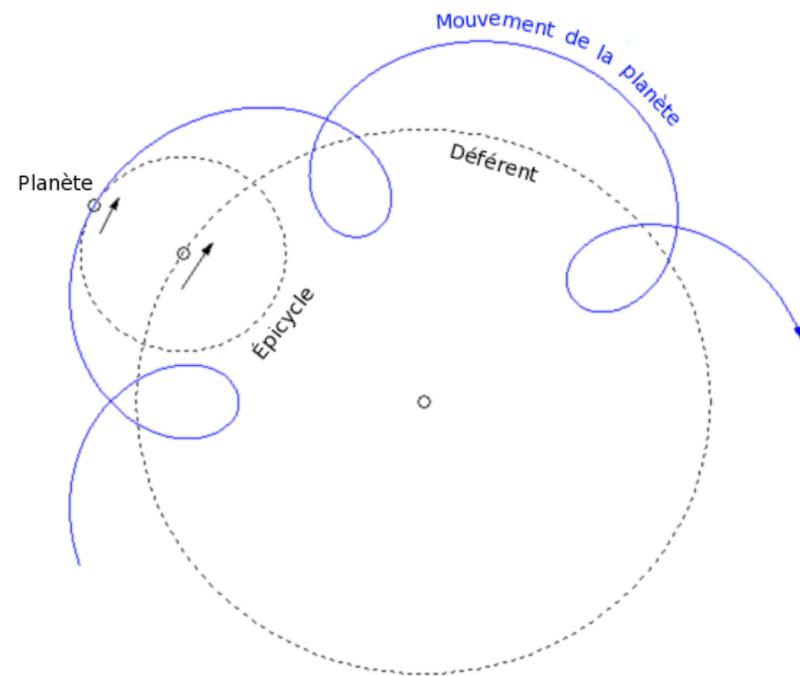
## ■ Distance du Soleil

- Diamètre angulaire 30' → diamètre ~ 1/120 de sa distance
- « *Gros comme le Péloponnèse?* »
- Aristarque mesure l'angle entre le Soleil et le Lune lors du premier quartier, et le trouve  $> 87^\circ$
- Trigonométrie → distance du Soleil  $> 20$  fois la distance de la Lune
- Soit  $> 800$  diamètres terrestres
- → diamètre du Soleil  $> 800/120 = 7$

Le Soleil est beaucoup plus gros que la Terre  
C'est lui qui est au centre du monde  
→ *héliocentrisme*

# Appolonios de Perga (-270 -190)

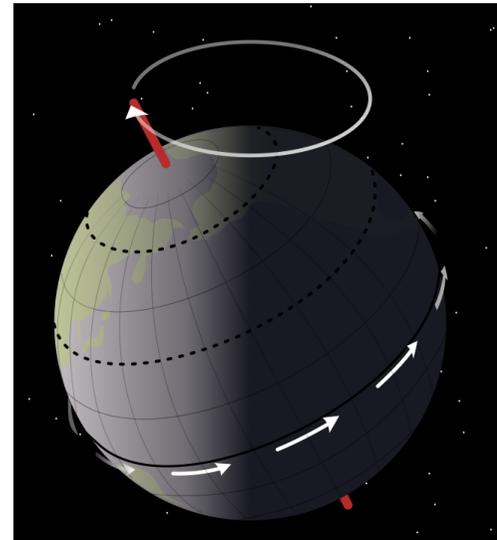
- Mathématicien (*Traité des coniques*)
- Principe des épicycles
- Difficultés du modèle d'Eudoxe
  - Mouvements rétrogrades des planètes plus complexes
  - Leur brillance varie périodiquement
  - Leurs positions calculées dévient de leurs positions observées
- Épicycles
  - Les planètes suivent un cercle, l'épicycle
  - dont le centre suit lui-même un autre cercle, le déférent



# Hipparque de Nicée (-190 -120)

- Remarquable observateur
- Mathématicien, fait progresser la trigonométrie
- Rassemble les connaissances astronomiques de Babylone et les compare aux siennes
  - Précession des équinoxes
  - Catalogue de plus de 850 étoiles
  - Classement en magnitudes (de 1 à 6)
- Prédiction des éclipses de Lune et de Soleil

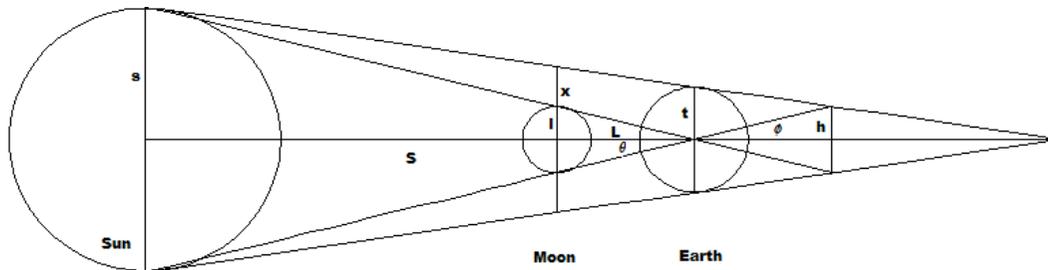
- Précession des équinoxes
  - décalage du point vernal  $1^\circ$  par siècle



- conséquence du déplacement de l'axe de rotation de la Terre (balaie un cône en 25 800 ans) et donc de l'équateur qui coupe l'écliptique au point vernal

# Hipparque

- Améliore les estimations d'Aristarque pour les distances de la Lune et du Soleil
  - Lune 34 diamètres terrestres (29)
  - Soleil > 245 diamètres terrestres (11700)
- Reprend la théorie d'Apollonios des épicycles
  - mais, plutôt que de multiplier les épicycles, décale le centre de rotation du déférent en-dehors de la Terre (**excentrique**)

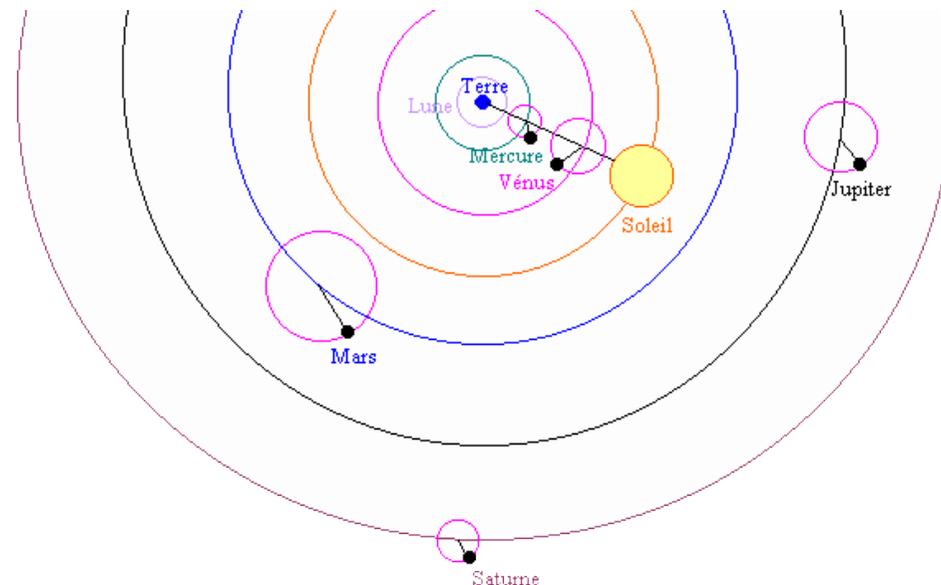


- Invente l'astrolabe (mesure de la hauteur d'un astre et calcul de l'heure)
  - Développé par Ptolémée puis les Arabes (al Kwarizmi, al Biruni...)



# Claude Ptolémée (90-168)

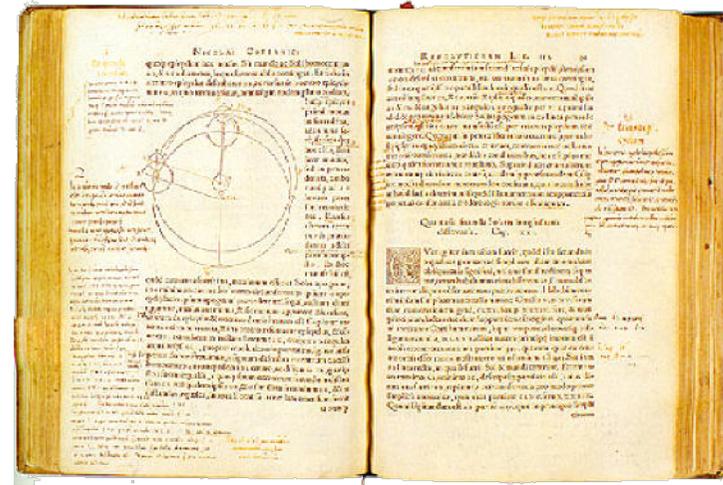
- Rassemble les travaux de ses prédécesseurs et va plus loin
- Son traité, la *Grande composition* (μεγίστη σύνταξις), ou *Almageste* dans sa traduction arabe, fut la base de l'astronomie pendant 15 siècles
- Pour chaque planète, cercle déférent excentrique (+ **équant**) + épicycle permettent de reproduire avec précision
  - Le mouvement complexe des planètes
  - Les variations d'éclat
- Version (très simplifiée) du modèle



# Nicolas Copernic (1473-1543)

- Copernic remplace l'équant par un second épicycle pour n'avoir que des rotations uniformes autour du centre
- Et surtout il fait
  1. tourner la Terre sur elle-même (idée déjà ancienne, défendue en détail par Nicole Oresme en 1377)
  2. et tourner toutes les planètes autour du Soleil
- Simplifie le calcul des tables de position
  - Remplacement des *Tables alphonsines* (1270) par les *Tables pruteniques* (1551) → réforme grégorienne du calendrier (1582) par Clavius

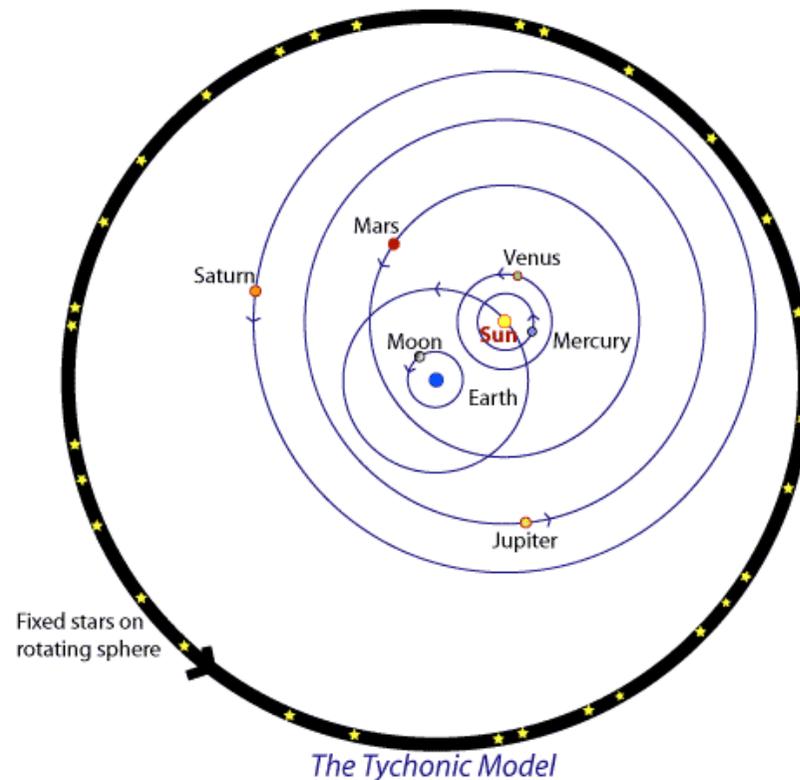
- *Commentariolus* (1514)
- *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (1543)



- Réception favorable à ses idées de la part des astronomes
  - moins des théologiens, comme Luther dès 1539, et le livre fut mis à l'Index en 1616

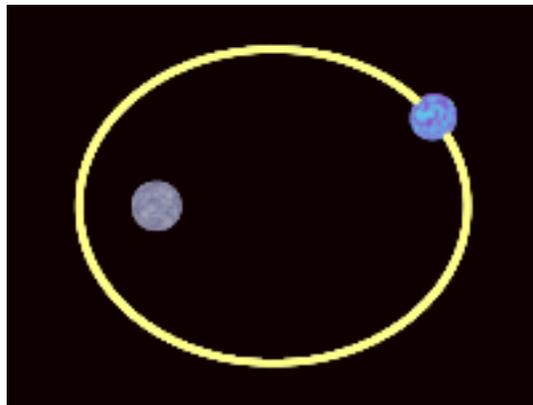
# Tycho Brahé

- Observateur hors pair d'une précision alors inégalée
  - Observation de la supernova de 1572
  - → Modèle mixte
- Le grand quadrant à Uraniborg

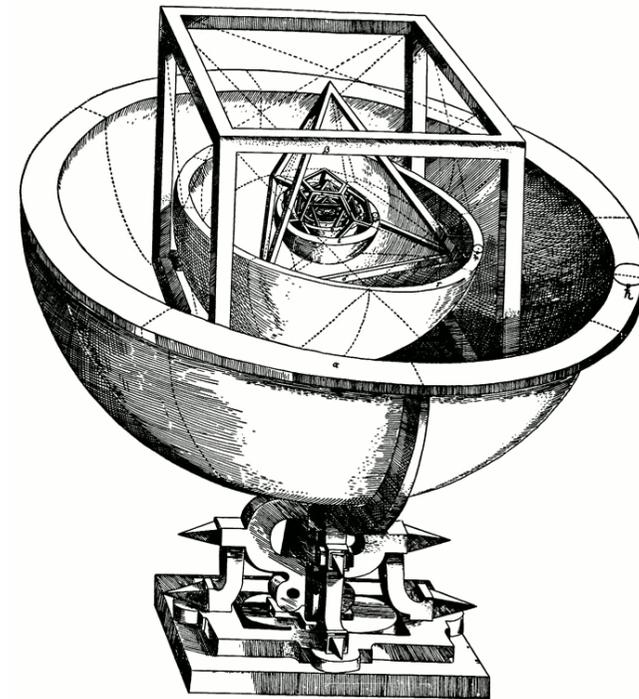


# Johannes Kepler (1571-1630)

- Les 3 lois du mouvement des planètes
  - Les planètes suivent des ellipses à l'un des foyers desquelles se trouve le Soleil
  - Des aires égales sont balayées en des temps égaux
- Astronome et astrologue
- Solides platoniciens  $\leftrightarrow$  espacement des planètes ?



- Le carré de la période de révolution est proportionnelle au cube du grand axe de l'ellipse



# Galileo Galilei (1564-1642)

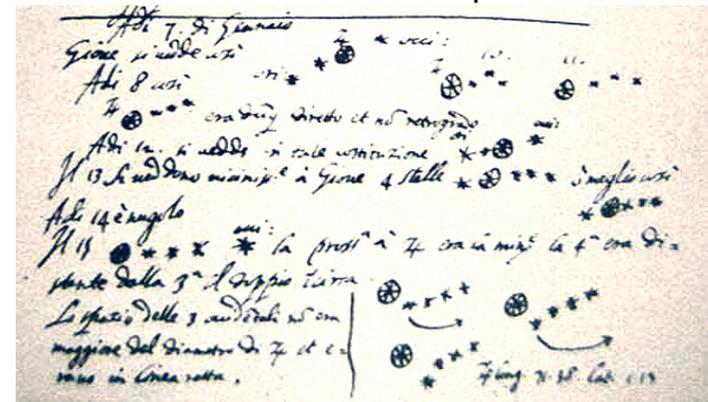
- La lunette de Galilée



- Les planètes apparaissent comme de petits disques, les étoiles demeurent ponctuelles
- Découverte de beaucoup d'étoiles nouvelles, et d'étoiles doubles
- La Voie lactée apparaît comme formée d'une multitude de petites étoiles

- Jupiter a des satellites

- → Il existe des corps qui orbitent autour d'autre chose que la Terre



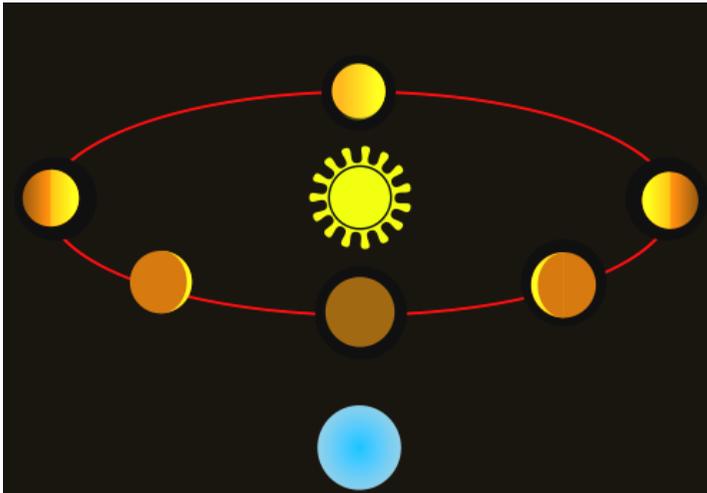
- Saturne a des « oreilles »

- Huygens montrera que ce sont en fait des anneaux très fins



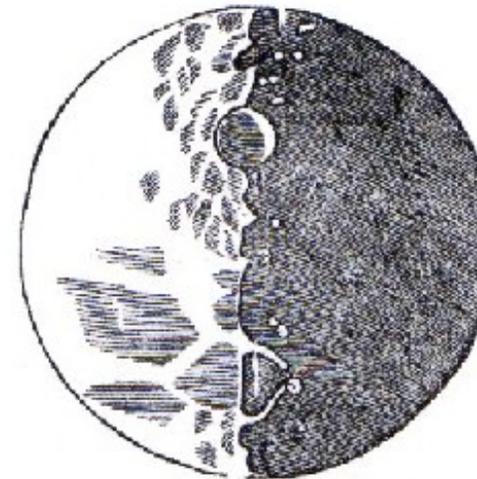
# Galilée

- Vénus montre des phases
  - « Les formes de Vénus rivalisent avec celles de Diane »

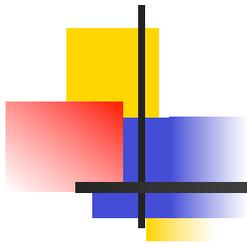


- Impossible d'observer *toutes* les phases dans un modèle géocentrique où Vénus est toujours plus près de la Terre que le Soleil
- → modèle héliocentrique

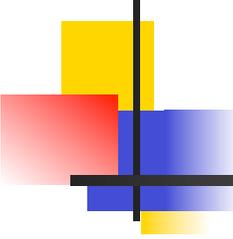
- Le Soleil a des taches, qui se déplacent
- La Lune a des montagnes
  - → le monde supralunaire peut être imparfait



- Refus d'attribuer les marées à la Lune
- Refus des orbites elliptiques



# ENFIN NEWTON VINT



# Isaac Newton (1643-1727)

---

- **Loi de la gravitation**

- Un corps de masse M exerce sur un corps de masse m une force F

- proportionnelle aux masses M et m
- inversement proportionnelle au carré de la distance R entre les masses

- Soit 
$$F = G \frac{M m}{R^2}$$

où G est la constante de Newton

- Lois de la dynamique

- Calcul différentiel et intégral (*calcul des fluxions*)

- → lois de Kepler

- **Mais beaucoup plus général**

- → mouvement des comètes (Edmund Halley 1656-1742)

- → mouvement des satellites

- → détails du mouvement de la Terre (précession des équinoxes, nutation)

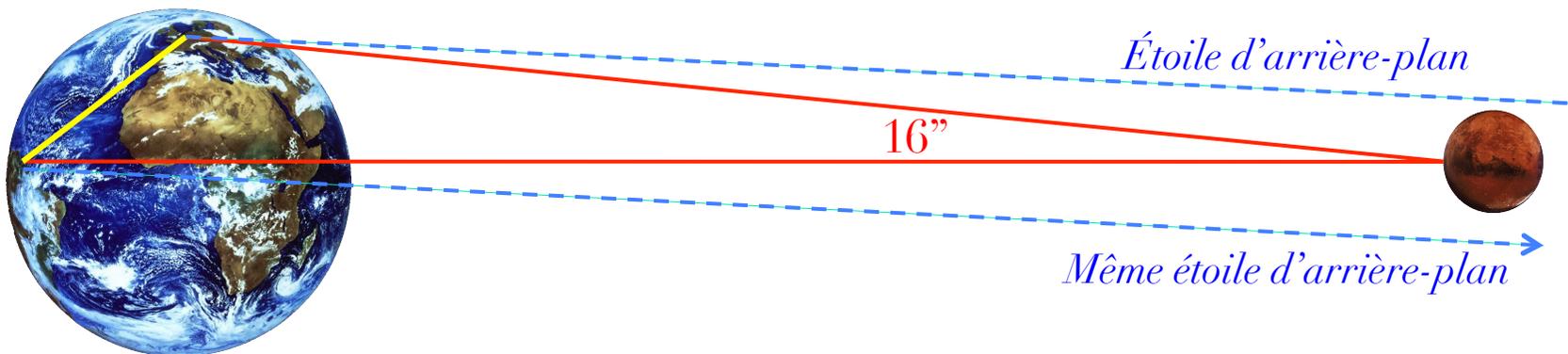
- → détails du mouvement de la Lune

- → marées

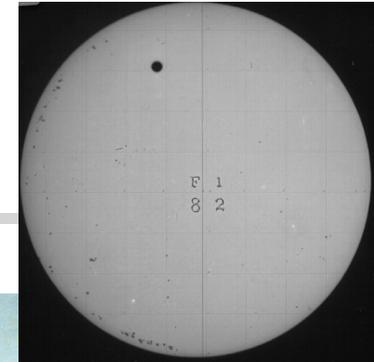
- → déformation de la Terre

## Distances des planètes : parallaxe de Mars

- 3<sup>e</sup> loi de Kepler  $T^2 = R^3$
- → une seule distance entre 2 planètes suffit à donner l'échelle du système solaire
- Mars a une période  $T=687$  jours donc son orbite mesure  $(687/365)^{2/3} = 1.52$  U.A.
- En 1672, Mars est au plus près de la Terre (donc à 0.52 U.A.)
- Picard et Cassini observèrent Mars depuis Paris et Richer depuis Cayenne à 5800 km
- Angle de 16''
- → distance Terre-Mars ~ 75 millions de km
- → distance Terre-Soleil ~ 145 millions de km

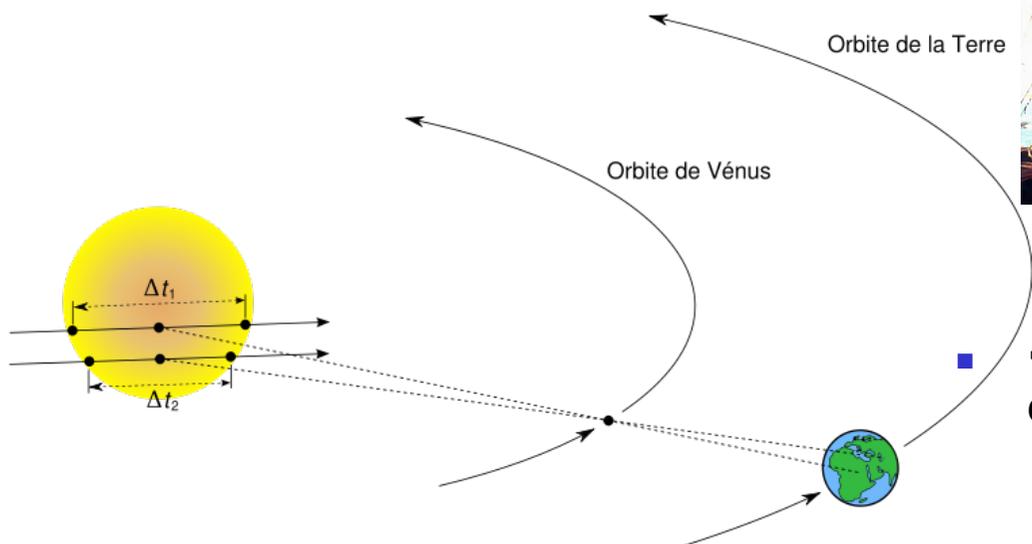


# Distance des planètes : transits de Vénus

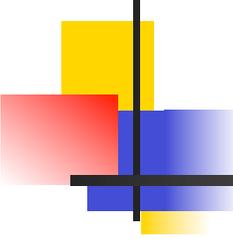


## ■ Transits de Vénus

- Mesure de la parallaxe depuis 2 points sur Terre (heures différentes du début et de la fin du transit selon le point d'observation)
- Transits de 1761 et 1769 observés du Cap, de Norvège, de Sibérie, de Tahiti



- → distance Terre-Soleil = 151 millions de km
  - Valeur exacte  
149 597 870,691 ± 0,030 km



# Nouvelles planètes

- « Loi » de Titius-Bode

- Les rayons des orbites planétaires suivent la loi empirique

$$R_n = (4 + 3 \times 2^n) / 10 \text{ U.A.}$$

■ Mercure	R = 0.39	0.40
■ n=0 Vénus	R = 0.72	0.70
■ n=1 Terre	R = 1.00	1.00
■ n=2 Mars	R = 1.52	1.60
■ n=3 ? Cérés	R = 2.77	2.80
■ n=4 Jupiter	R = 5.20	5.20
■ n=5 Saturne	R = 9.54	10.0
■ n=6 ? Uranus	R = 19.2	10.6
■ n=7 ? Neptune	R = 30.0	38.8

- Cérés

- Découverte par Giuseppe Pazzi en 1801 entre Mars et Jupiter (R=2.77)

- Pallas

- Découverte par Heinrich Olbers en 1802, aussi entre Mars et Jupiter (R=2.77)

- **Uranus**

- Vue plusieurs fois, sans être identifiée comme planète

- Identification progressive

- En 1781, William Herschel pense d'abord voir une nébuleuse, puis une comète car elle s'est déplacée
- Les observations indiquant une orbite quasi-circulaire de très grand rayon, Bode suggère dès 1783 qu'il s'agit d'une planète au-delà de Saturne
- Herschel propose de l'appeler *planète de George*, Lalande de l'appeler *Herschel*, avant que s'impose *Uranus* suggéré par Bode

# Découverte de Neptune

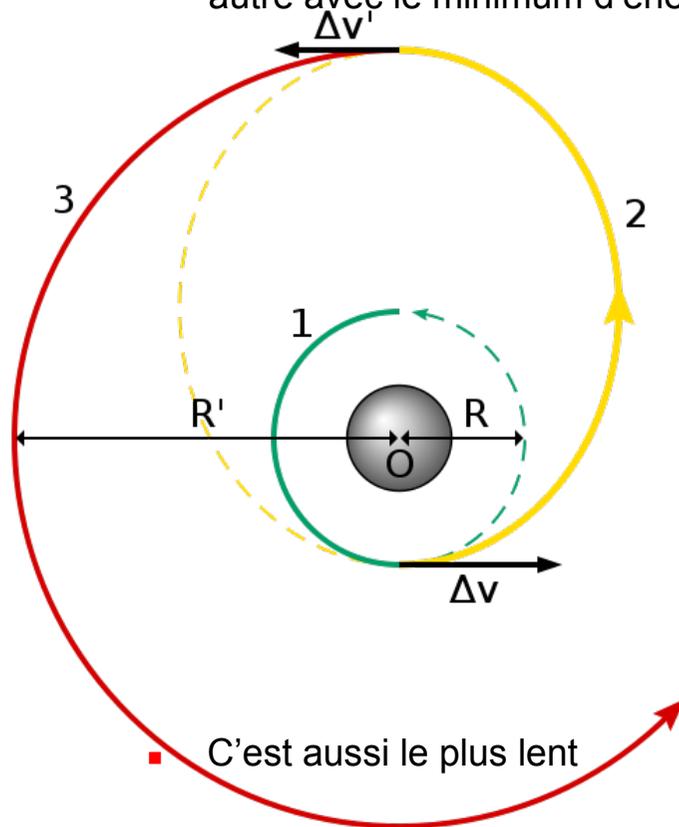
- Neptune a été vue par Galilée, par Lalande, par Herschel, sans qu'aucun réalise que ce n'était pas une étoile
- Bizarries du mouvement d'Uranus
  - Uranus ne suivait pas la trajectoire prédite par la loi de Newton
  - → Loi approximative, ou présence d'un corps perturbateur?
- Par le calcul, prédiction de la position et de la masse de ce corps
  - John Couch Adams (1845), hélas pas pris au sérieux par l'*Astronomer Royal* sir George Airy à Greenwich
  - Urbain Le Verrier (1846), pris au sérieux par Johann Galle à Berlin



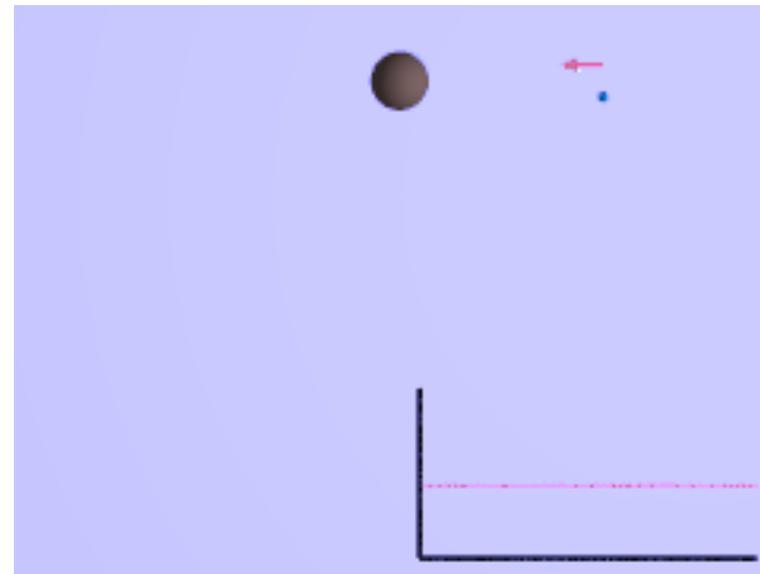
- Vulcain et le périhélie de Mercure
  - Vulcain n'existe pas
  - Mais elle a été observée...

# Navigation gravitationnelle

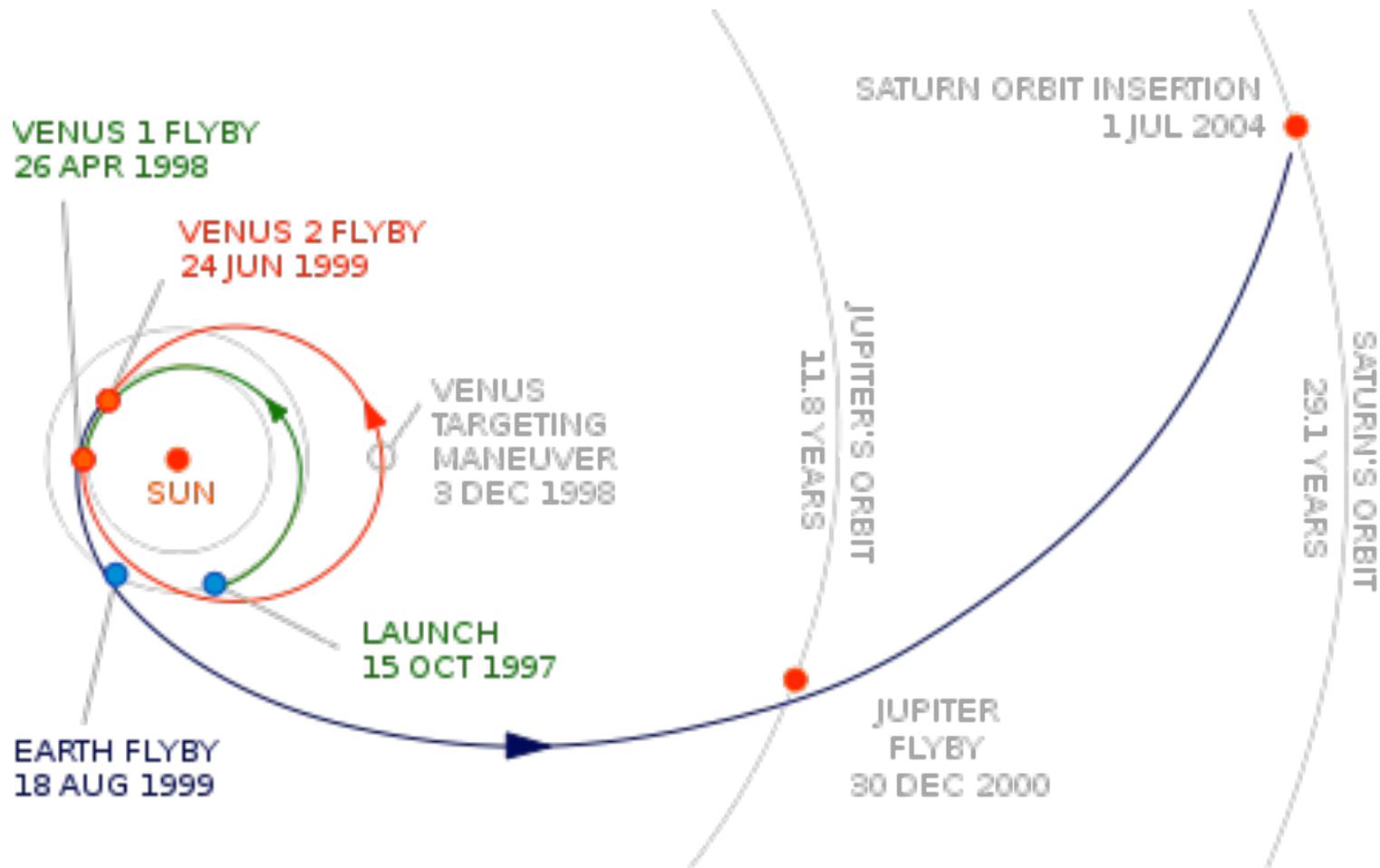
- Ellipse de transfert de Hohmann
  - Passage d'une orbite elliptique à une autre avec le minimum d'énergie



- Effet de fronde (*assistance gravitationnelle*) : passer à proximité d'une planète peut accélérer (ou ralentir) une sonde

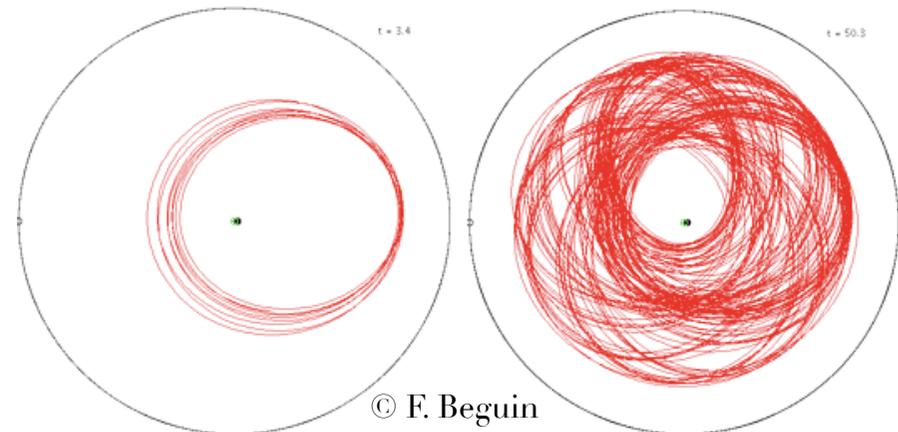


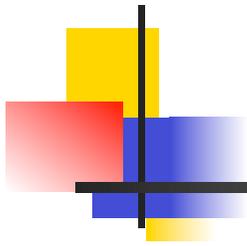
# Exemple de la sonde Cassini-Huyghens



# Stabilité du système solaire ?

- Les orbites planétaires sont-elles stables (sur des échelles de temps de l'ordre de plusieurs millions d'années)?
- Travaux entamés par Newton (système à 3 corps Soleil-Terre-Lune)
- Laplace et Lagrange montrent que le système solaire est stable au 1<sup>er</sup> ordre
  - → stabilité à l'échelle de 100 000 ans
- H. Poincaré : sensibilité des solutions des équations aux conditions initiales
  - → stabilité probable mais pas sûre
- Lien avec la formation du système solaire (planétésimaux → planètes)
- J. Laskar (1989)
  - Impossible de prédire la position d'une planète sur son orbite au-delà de 10 millions d'années
  - Instabilité possible des orbites à long terme
  - Une planète perturbée par une autre plus massive suit un temps la loi de Kepler mais s'en écarte jusqu'à devenir chaotique. Exemple:





Merci de votre attention !

