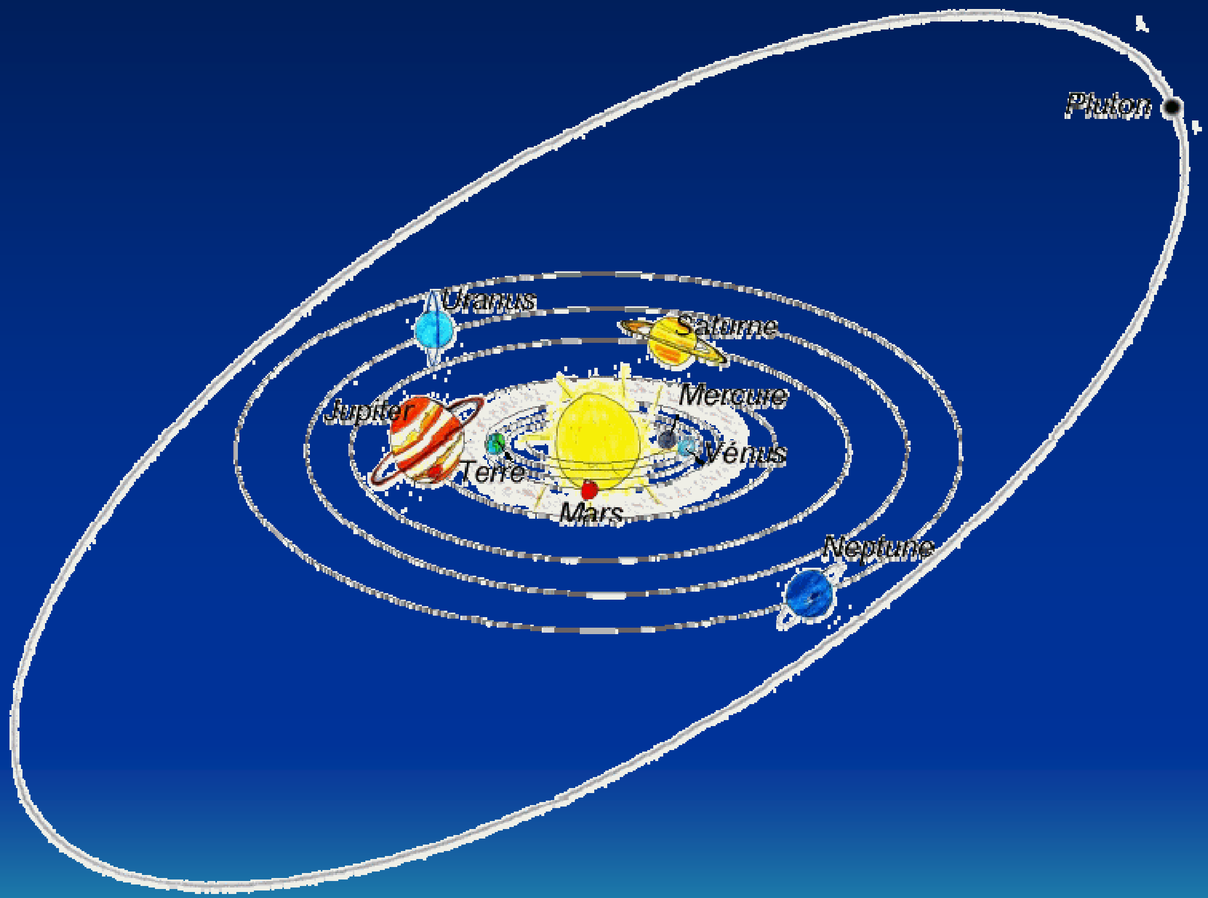
Richard Kerner

Professeur à l'Université Paris-VI

Les débuts de l'Astronomie

Comment les hommes ont pu mesurer la Terre,
la Lune, le Soleil, et les distances
dans le Système Solaire.

Le Système Solaire



La dernière planète, Pluton, dont l'orbite ne se trouve pas dans le plan d'écliptique commun, a perdu son statut de planète en août 2006. Elle appartient désormais à l'anneau de Kuiper, contenant une grande quantité de comètes et d'astéroïdes.

Le Soleil et les planètes

Les caractéristiques des planètes du système solaire

Planète	Diamètre	Masse	Demi-grand Axe	Période de rotation	Période sidérale
Mercure	0,382	0,06	0,39	58,65 j	87,969 j
Vénus	0,949	0,82	0,72	243,02 j	224,701 j
Terre	1	1	1	1,00 j	365,256 j
Mars	0,53	0,11	1,52	1,026 j	686,960 j
Jupiter	11,2	318	5,20	0,414 j	4 335,355 j
Saturne	9,41	95	9,54	0,444 j	10 757,737 j
Uranus	3,98	14,6	19,22	0,718 j	30 708,160 j
Neptune	3,81	17,2	30,06	0,671 j	60 224,904 j

- **Du 18 février 1930 au 24 août 2006, Pluton fut considérée comme une planète.**

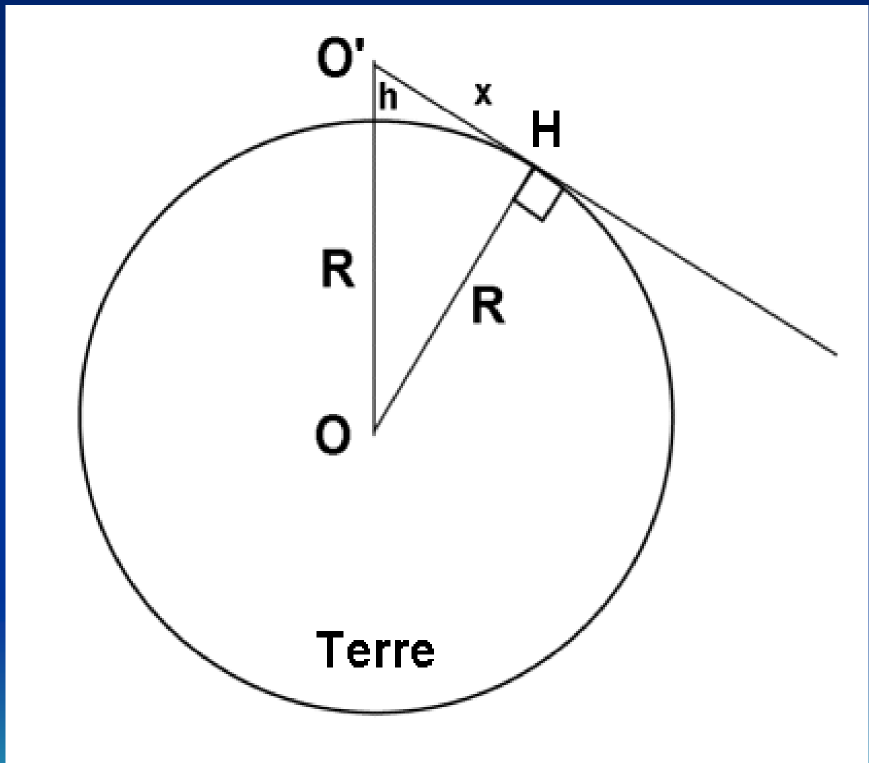
Comment évaluer les distances dans le système solaire et les dimensions de la Lune, du Soleil et des planètes ?
Commençons par la Terre:
L’horizon sur terre et sur mer – première indication que la Terre est ronde.

L'horizon sur la Lune –
La mission Américaine « Apollo », 1969

La distance à l'horizon sur la Lune est nettement plus petite que sur la Terre

Evaluation des distances sur Terre

Distance à l’horizon: un calcul simple



h: **taille de l'homme**

a: **la distance à l'horizon**

$R^2 + a^2 = (R + h)^2$

$a^2 = 2\,Rh + h^2$ (or $h << R$)

$a^2 = 2\,Rh$

Application:

$a^2 = 2 \times 6\ 400\ 10^3 \times 1{,}73$ (yeux)

$a^2 = 22{,}144\ 10^6$

$a = 4,\ 7\ 10^3 = 4{,}7$ km

Quelques exemples de distance à l’horizon:

Pour un homme de 1,73 mètres au bord de la mer,
l'horizon se trouve à 4 700 m ou 4,7 km environ

Yeux de l'observateur(m)	Distance à l'horizon (km)
1	3,5
1,73	4,7
5	8
10	11
20	16
50	25
100	35
500	79
1000	112
10000	355

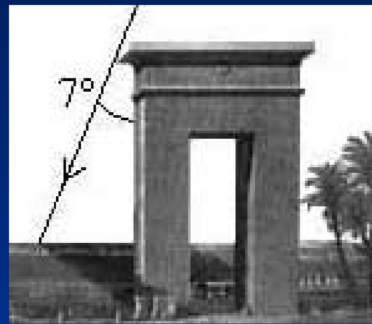
Eratosthène et la mesure du diamètre terrestre

En 205 avant J.C., le grec ÉRATOSTHÈNE, alors Directeur de la Grande Bibliothèque d'Alexandrie en Égypte, propose une méthode purement géométrique pour mesurer la longueur du méridien terrestre (circonférence passant par les pôles). Il va partir de l'observation d'ombres portées faites en deux lieux, Alexandrie et Syène (aujourd'hui Assouan), éloignés d'environ 800 km (distance estimée d'après le temps mis par des caravanes de chameaux pour relier ces deux villes !), au moment du solstice d'été et à l'heure du midi solaire local.

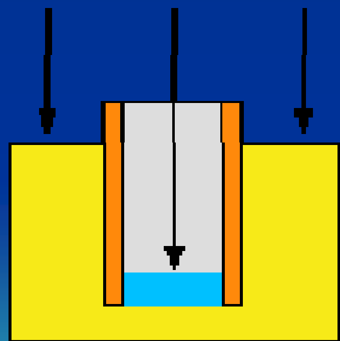
Ce jour-là et à cette heure précise dans l'hémisphère Nord, le Soleil occupe, de tous les jours de l'année, la plus haute position au dessus de l'horizon. Néanmoins, ÉRATOSTHÈNE remarque des différences d'un lieu à l'autre. A Syène (à peu près située sur le tropique du Cancer) le Soleil est à la verticale, si bien que ses rayons pénètrent jusqu'au fond des puits ; quant aux ombres portées des objets verticaux, elles sont parfaitement centrées autour d'eux. Par contre, à Alexandrie, le Soleil n'est plus à la verticale et ces mêmes objets ont une ombre décentrée, très courte.

ÉRATOSTHÈNE va mesurer l'ombre d'un obélisque dont il connaît déjà la hauteur; il va en déduire l'angle que font les rayons solaires avec la verticale : il trouve 7,2°.

Comparaison d'ombres pendant le solstice d'été: Alexandrie et Syène



L'ombre d'obélisque d'Alexandrie

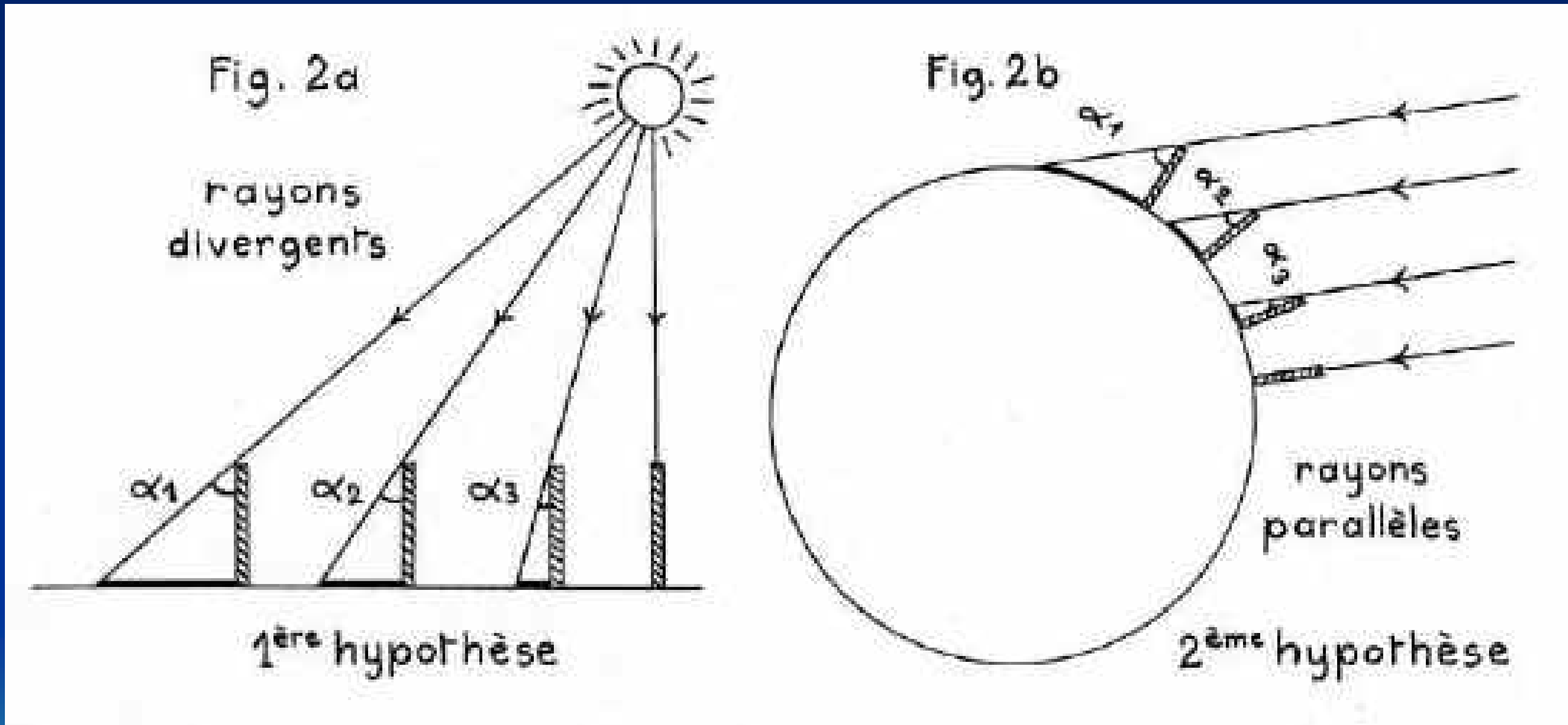


Le fond d'un puits illuminé à Syène
Pendant le solstice d'été (23 juin)

Observations et hypothèses:

- A partir de toutes ces observations, deux hypothèses s'offrent à Eratosthène :
- 1) La Terre est plate (fig. 2a), mais alors, le Soleil serait suffisamment proche pour que la divergence de ses rayons atteignant des objets éloignés soit significative : en effet, les objets de longueur identique ont des ombres de longueurs différentes et pas d'ombre du tout à l'aplomb du Soleil (angle nul).
- 2) La Terre n'est pas plate (fig. 2b), sa surface est courbe, et peut-être même sphérique. Seulement, les même résultats peuvent être obtenus avec des rayons solaires tous parallèles : cela implique que le Soleil soit suffisamment éloigné, très, très éloigné…

Les deux explications possibles:

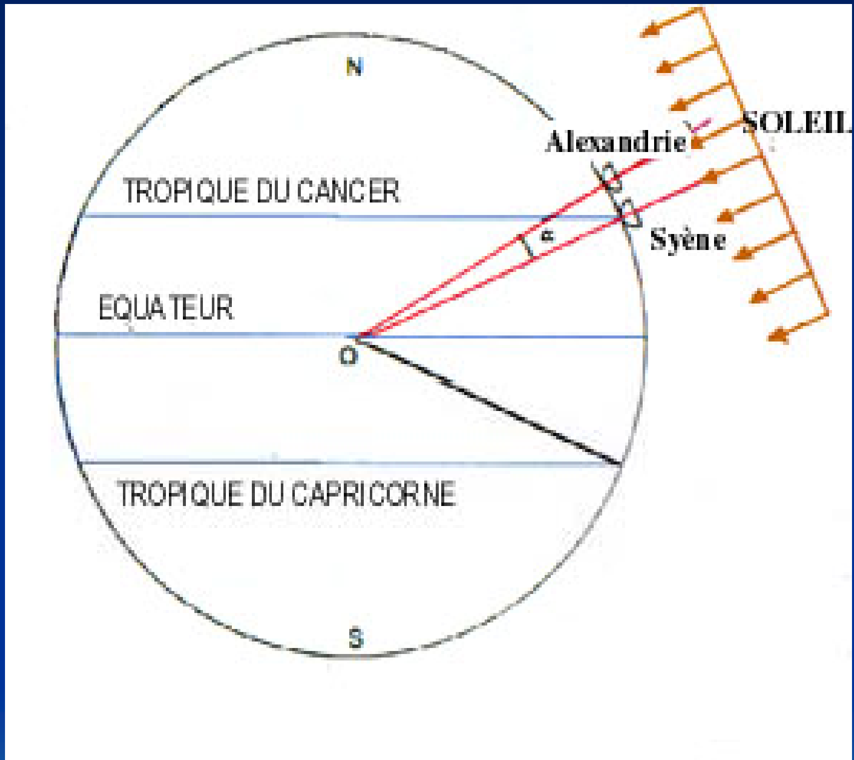


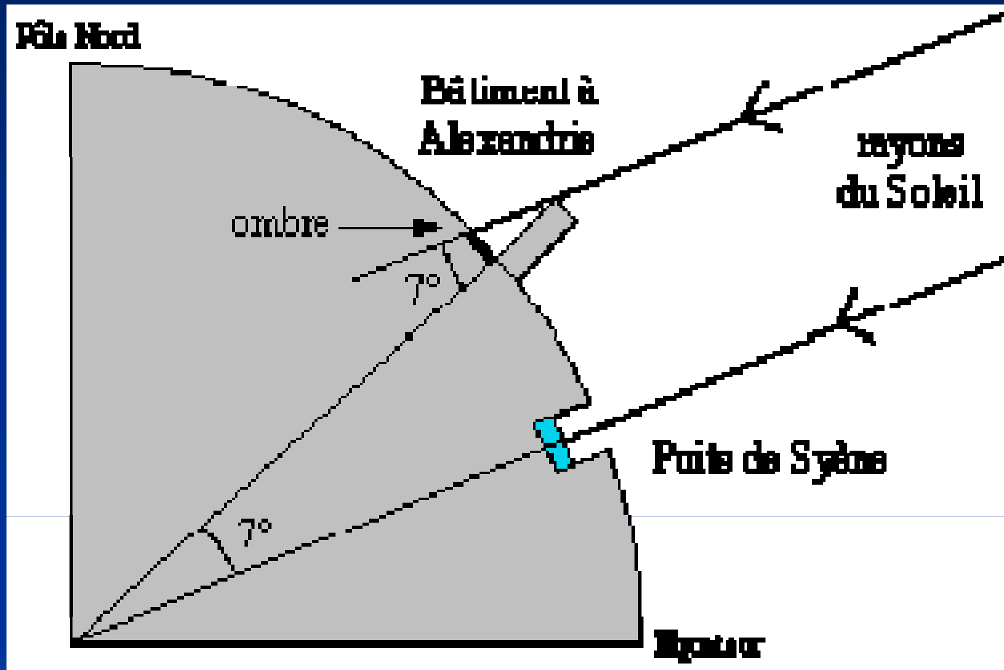
Le calcul d'Eratosthène

Persuadé que la Terre est sphérique, ÉRATOSTHÈNE va tracer sa célèbre figure géométrique " éblouissante de simplicité " , laquelle va lui permettre de calculer facilement la longueur du méridien terrestre ! Voyez plutôt :

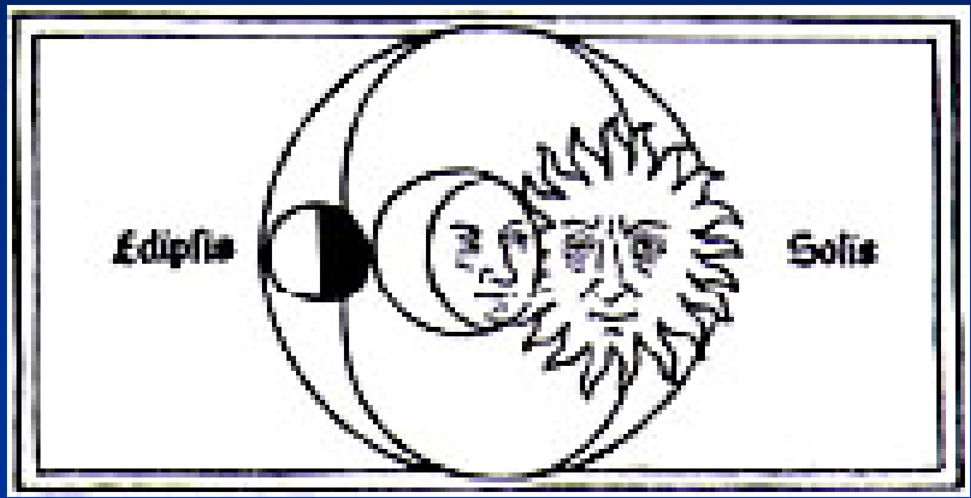
Les deux « verticales » vont se rejoindre par définition au centre de la Terre. D'autre part, ÉRATOSTHÈNE sait que la ville de Syène étant située droit vers le sud par rapport à Alexandrie, les deux villes sont à peu près situées sur le même méridien. Les rayons solaires étant effectivement parallèles, l'angle formé par les deux verticales au centre de la Terre est donc identique à celui qu'il a mesuré grâce à l'ombre de l'obélisque (7,2°). La proportion de cet angle en regard des 360° du cercle est la même que celle de la distance séparant les deux villes (à peu près 800 km) par rapport à la circonférence du cercle (ici, le méridien terrestre). Vous devinez la suite : 360° divisé par 7,2° donne 50, et 800 km que multiplie 50 fait bien 40 000 km (longueur que l'on a retrouvée ultérieurement par d'autres procédés).

Schéma géométrique d'évaluation du rayon terrestre



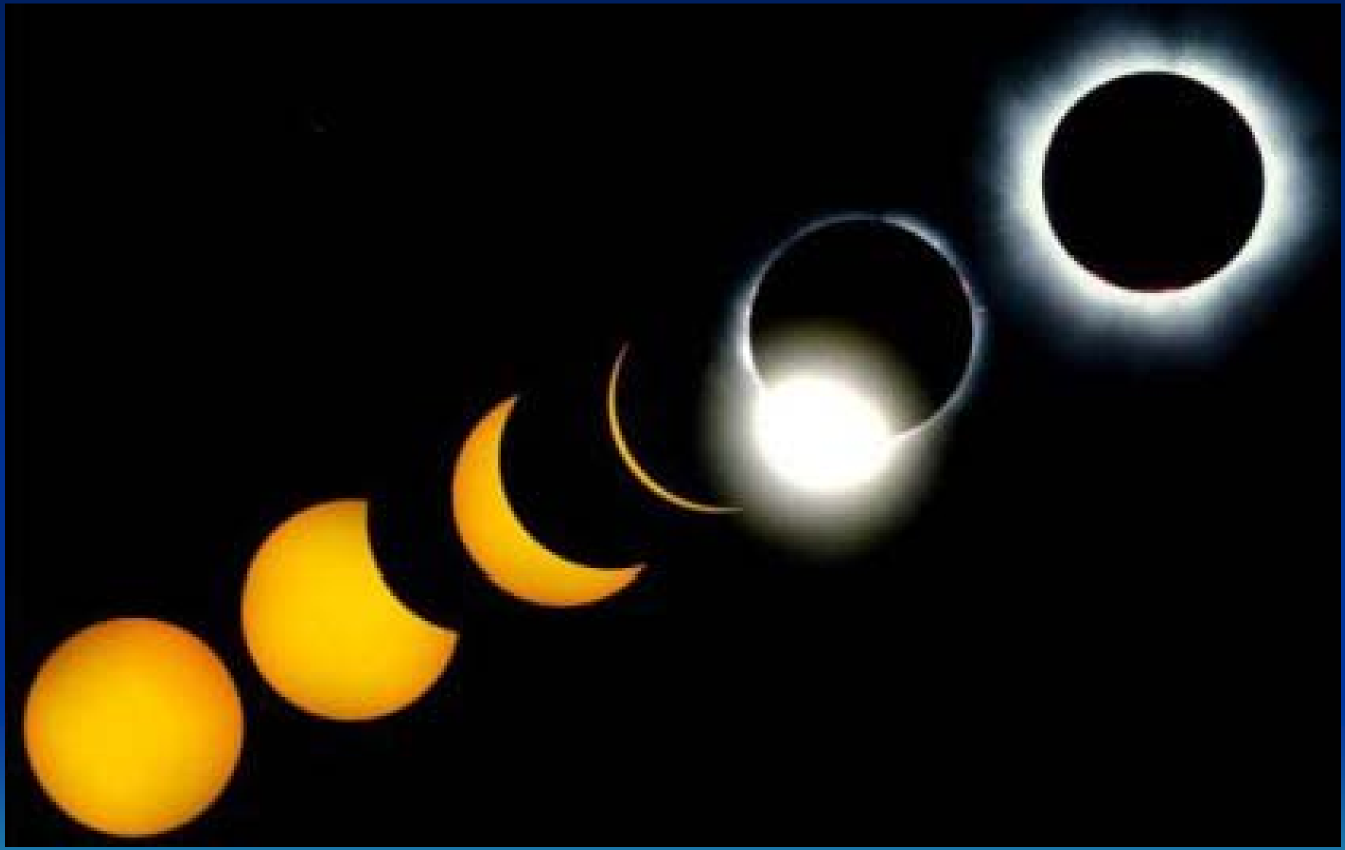


Après la Terre, s'est à la Lune de dévoiler ses mensurations. Une aide précieuse: les éclipses.



Une gravure ancienne expliquant le phénomène d'éclipses

Voici l'éclipse totale du Soleil:



Et une éclipse de la Lune:

Une heureuse coïncidence a permis de mieux comprendre ce qui se passe: les grandeurs apparentes du Soleil et de la Lune sont pratiquement les mêmes, d’environ 30’ angulaires.

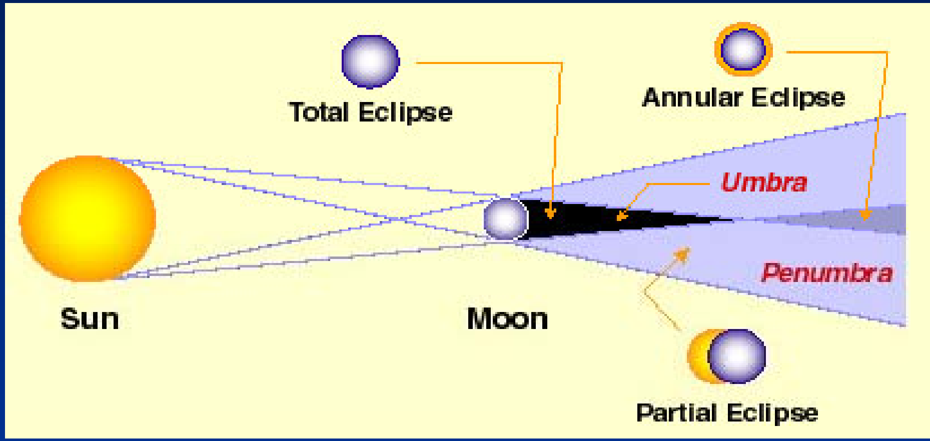
Une éclipse totale de la Lune est bien différente de celle du Soleil.

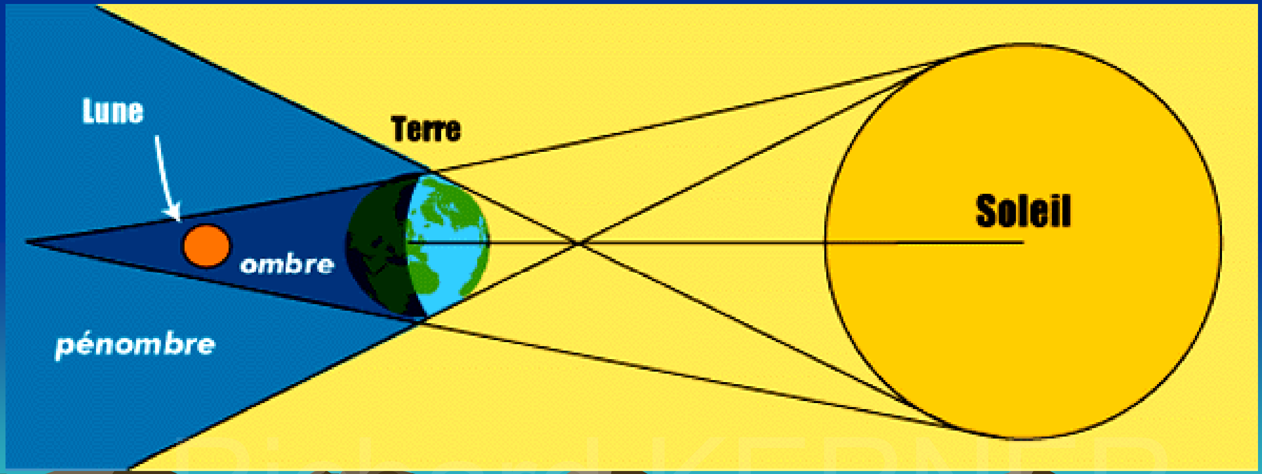
L'ombre de la Lune sur le disque solaire

La Lune illuminée par le Soleil, premier quartier

L'ombre de la Terre sur le disque lunaire en début de l'éclipse totale de la Lune

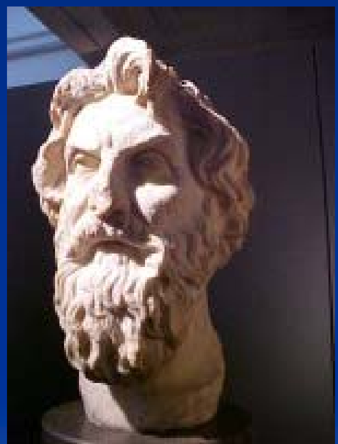
Schémas d'une éclipse du Soleil et d'une éclipse de la Lune établies par Aristarque de Samos:

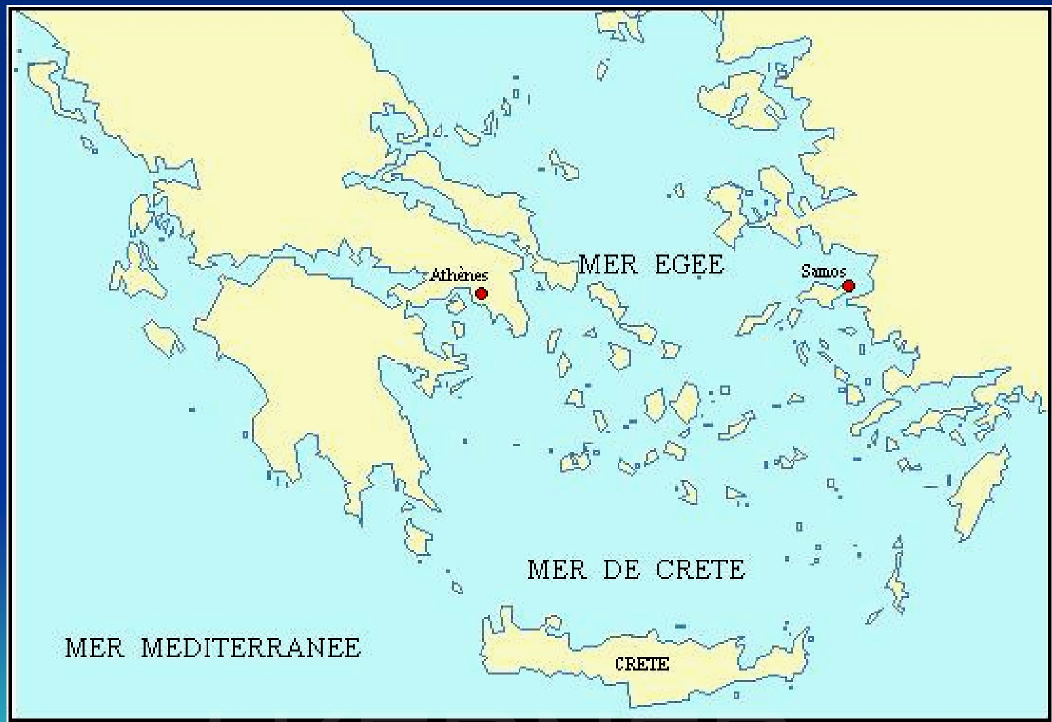




Aristarque de Samos
et l'évaluation de la distance Terre-Lune

Aristarque de Samos (310 - 230 av. J.-C.) fut l'élève de Straton de Lampsaque, Il est l'auteur du premier système héliocentrique, système décrit dans son livre "Les Hypothèses" (disparu) cité par Archimède dans son traité de l'Arénaire. Aristarque est également l'auteur du traité sur la grandeur et la distance du Soleil et de la Lune





Aristarque de Samos
et l’évaluation de la distance Terre-Lune

Pour le calcul des distances Terre-Lune et Terre-Soleil, il fait les hypothèses suivantes :

- **La Lune reçoit la lumière du Soleil.**
- **La Terre peut être considérée comme un point et comme le centre de l'orbite de la Lune.**
- **Lorsque la Lune nous parait dikhotome (coupée en deux portions égales), elle offre à nos regards son grand cercle, qui détermine la partie éclairée et la partie obscure de cet astre.**
- **Lorsque la Lune nous parait dikhotome, sa distance du Soleil est moindre du quart de la circonférence, de la trentième partie de ce quart.**
- **La largeur de l'ombre est de deux Lunes.**
- **L'arc soutendu dans le ciel par la Lune est la quinzième partie d'un signe.**

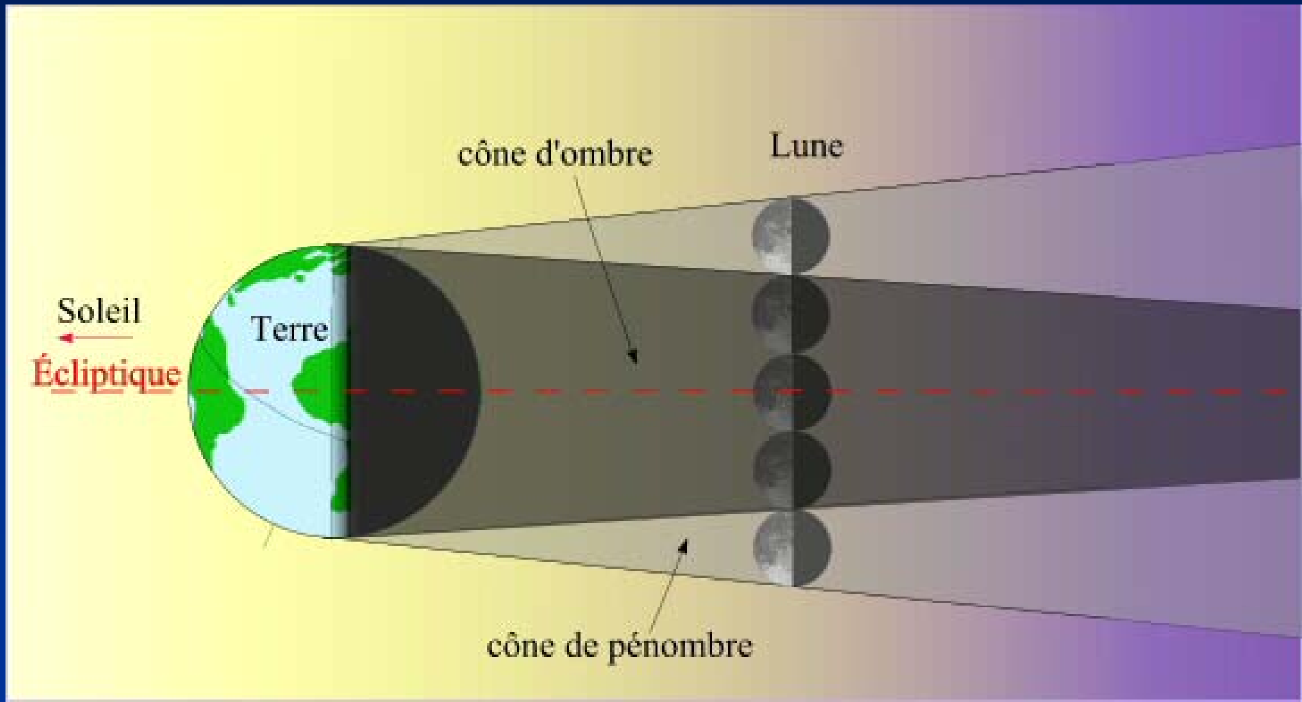
Les calculs d’Aristarque de Samos

Comme on le constate certaines de ces hypothèses sont fausses, l'hypothèse 4 revient à donner à l'angle   la valeur de 87°. Cette erreur explique son l'erreur sur le calcul de la distance Terre-Soleil. L'hypothèse 6 donne à la Lune un diamètre de 2°, valeur quatre fois trop forte.

- À partir de ces hypothèses, Aristarque va déduire que la distance Soleil-Terre est supérieure à 18 fois la distance Terre-Lune et inférieure à 20 fois la distance Terre-Lune. Il déduit de ces proportions les valeurs suivantes :
- le diamètre lunaire est inférieur à 2/45 distance Terre-Lune et supérieur à 1/30 distance Terre-Lune.
- le diamètre solaire est inférieur à 43/6 diamètres terrestres et supérieur à 19/3 diamètres terrestres.
- le diamètre terrestre est inférieur à 60/19 diamètres lunaires et supérieur à 108/43 diamètres lunaires.

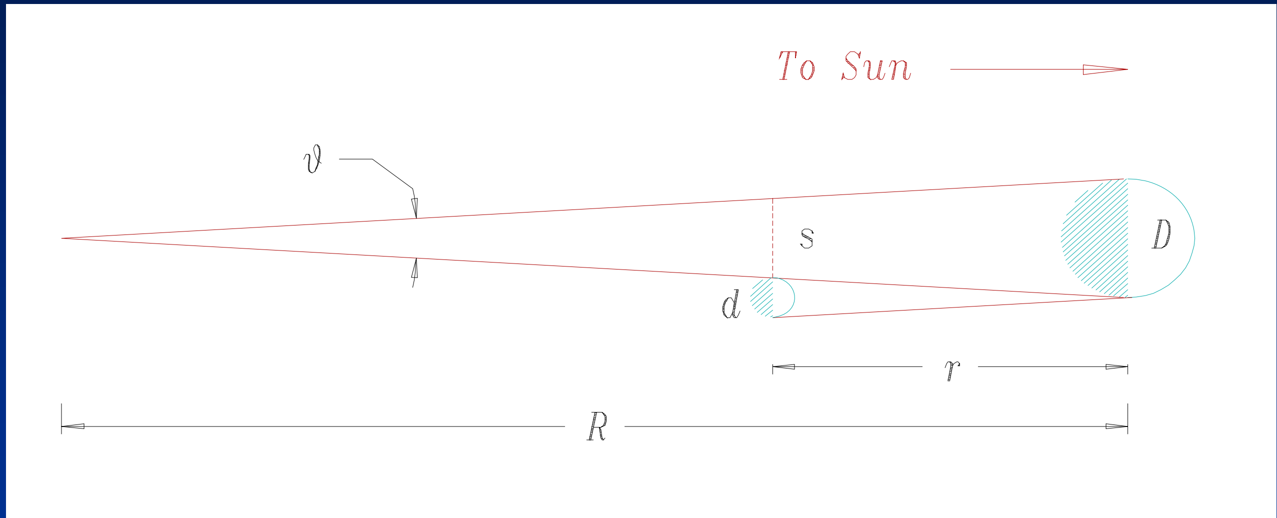
Le croissant de la Lune (à gauche) et l'éclipse partielle de la Lune (à droite)

Le cône d’ombre de la Terre est plus grand que le cône d’ombre de la Lune sur la Terre:



Aristarque a évalué la largeur du cône d’ombre de la Terre au niveau de l’orbite de la Lune comme valant 2 diamètres lunaires. La valeur exacte est 2,67 (en moyenne). Cela conduit à la conclusion que le diamètre de la Lune est 3,67 fois plus petit que le diamètre de la Terre.

Le calcul d'Aristarque exprimé en formules mathématiques modernes



$$\frac{s}{R-r} = \frac{D}{R} = \vartheta$$

$$\frac{d}{r} \approx \vartheta$$

$$\therefore \quad \frac{D-s}{r} = \vartheta$$

$$s = \lambda d$$

$$\Downarrow$$

$$r = \frac{D}{\vartheta(1+\lambda)}$$

λ ~ 2.5

D = 12 800 km

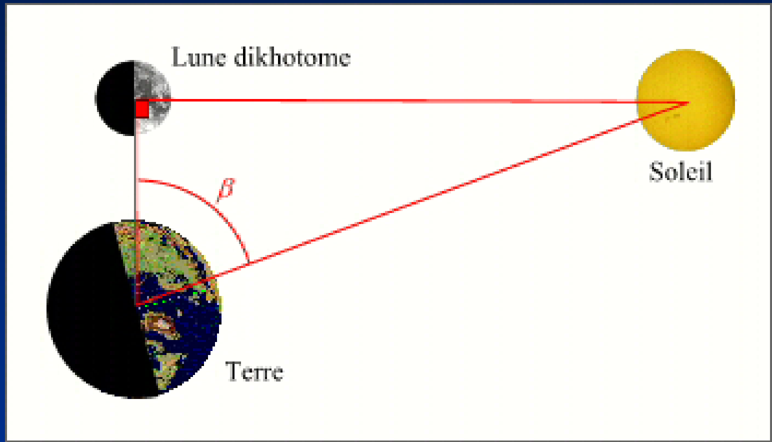
θ ~ 36 min = 0.01 rad

r ~ 12 800 : [0.01 x (1+2.5)] = 366 000 km

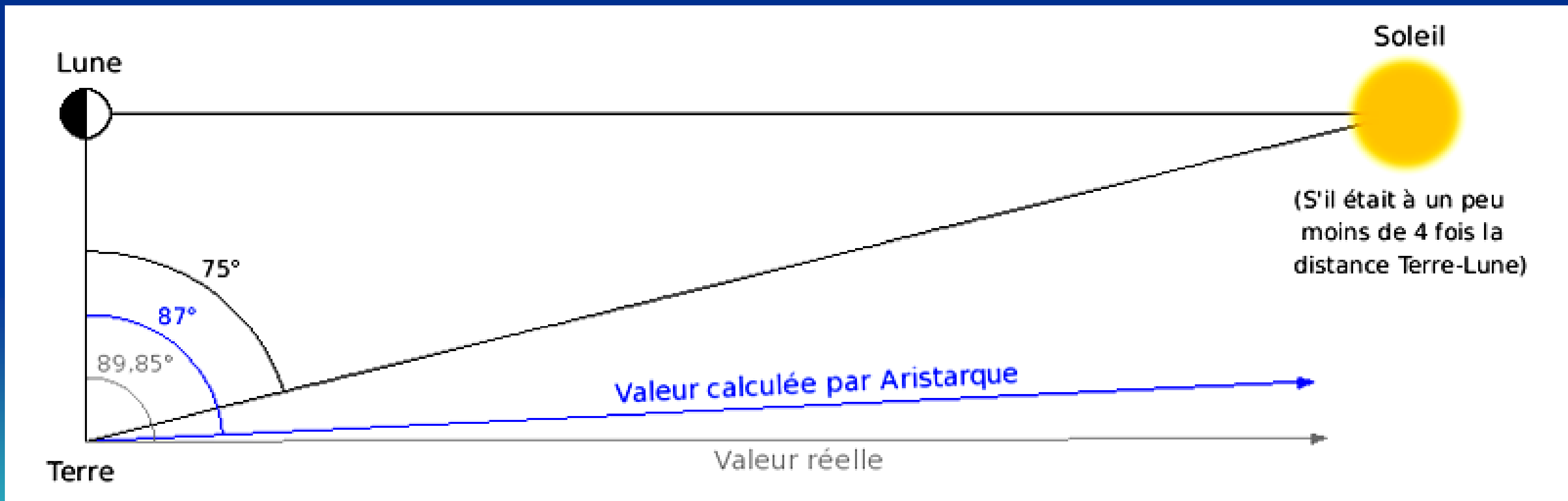
(Il faut ajouter à cela le rayon de la Terre, 6 400 km)

Un autre exploit d'Aristarque:
L'évaluation de la distance Terre-Soleil.

β: l'angle d'Aristarque

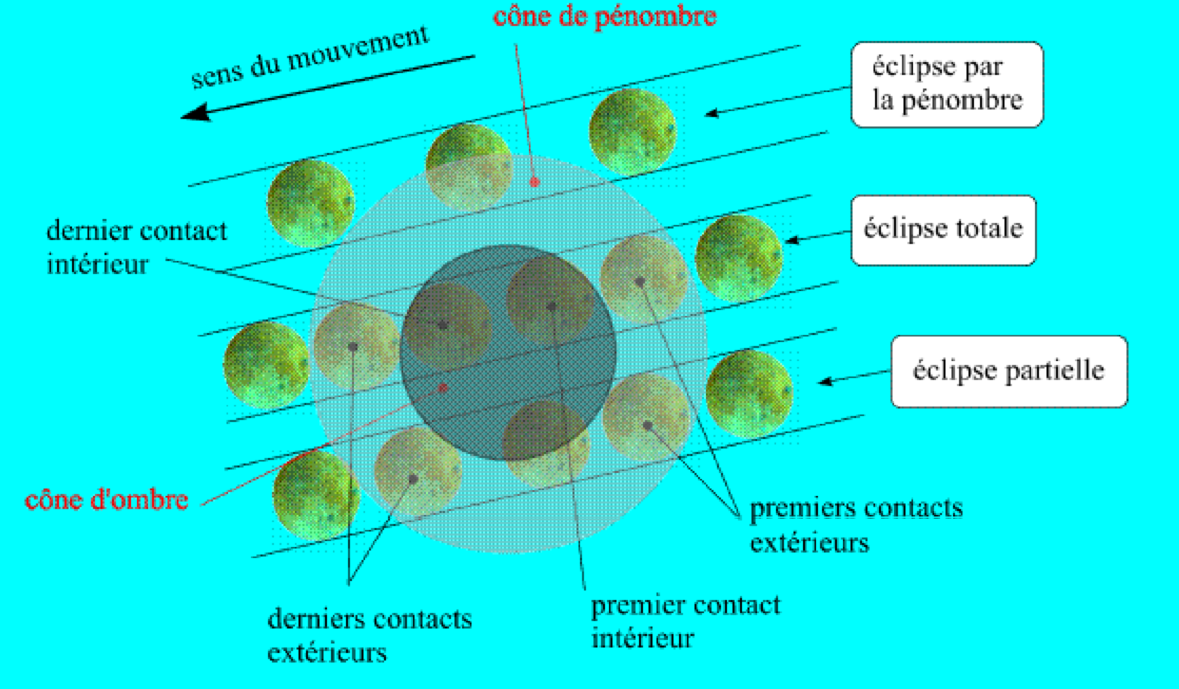


Connaissant la valeur de l'angle β et la distance Terre-Lune, on trouve aisément la distance Terre-Soleil



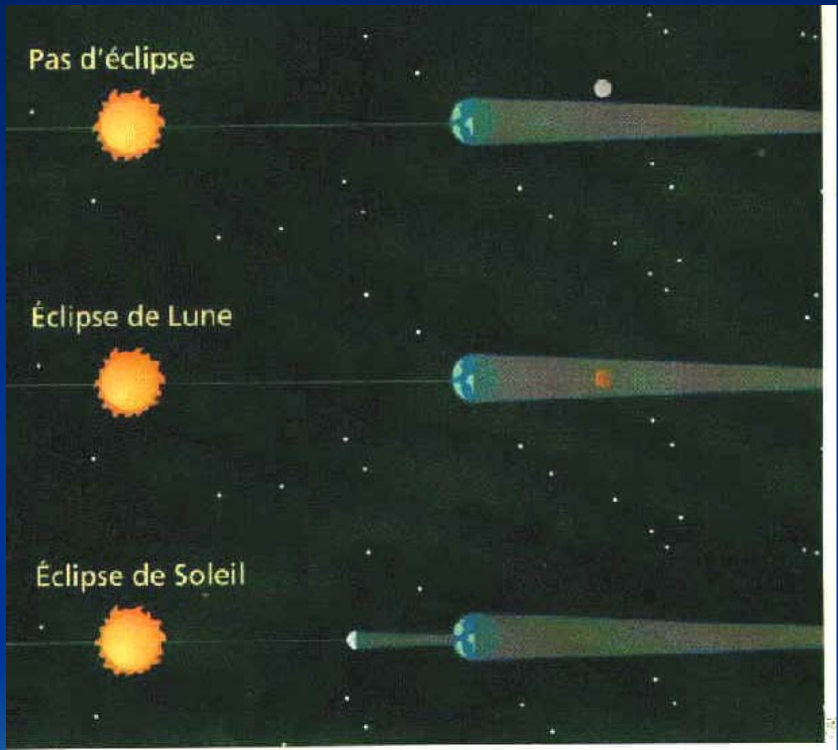
En fait, Aristarque s'est trompé, en surestimant l'angle et, par conséquent, en sous-estimant la distance d'environ 20 fois.

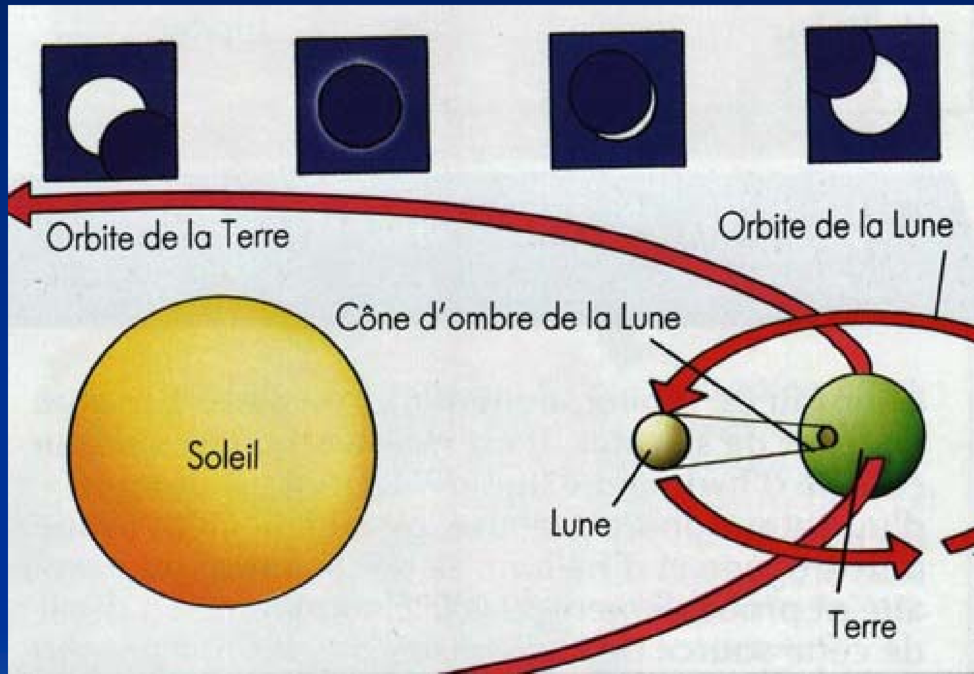
Différentes éclipses de la Lune



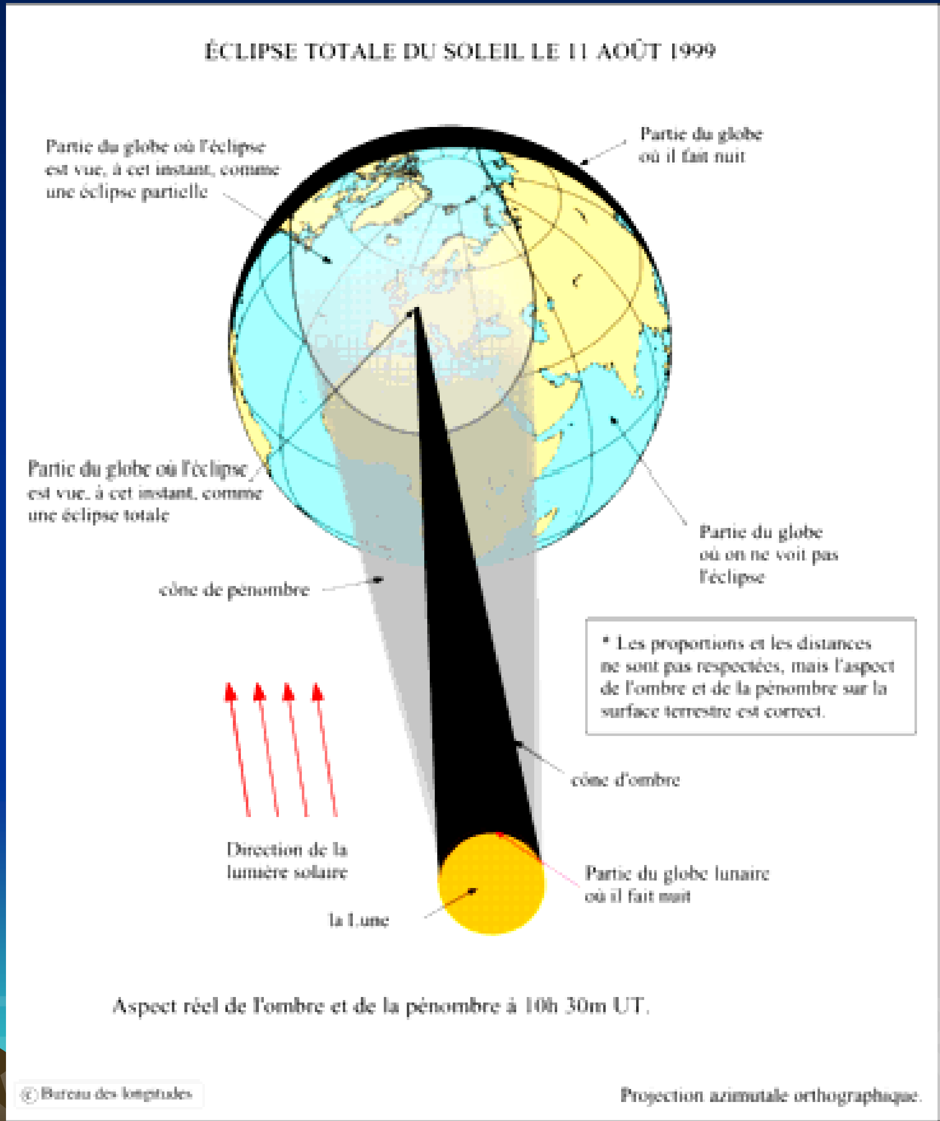
Les différents types d'éclipses de Lune

Le schéma expliquant les éclipses

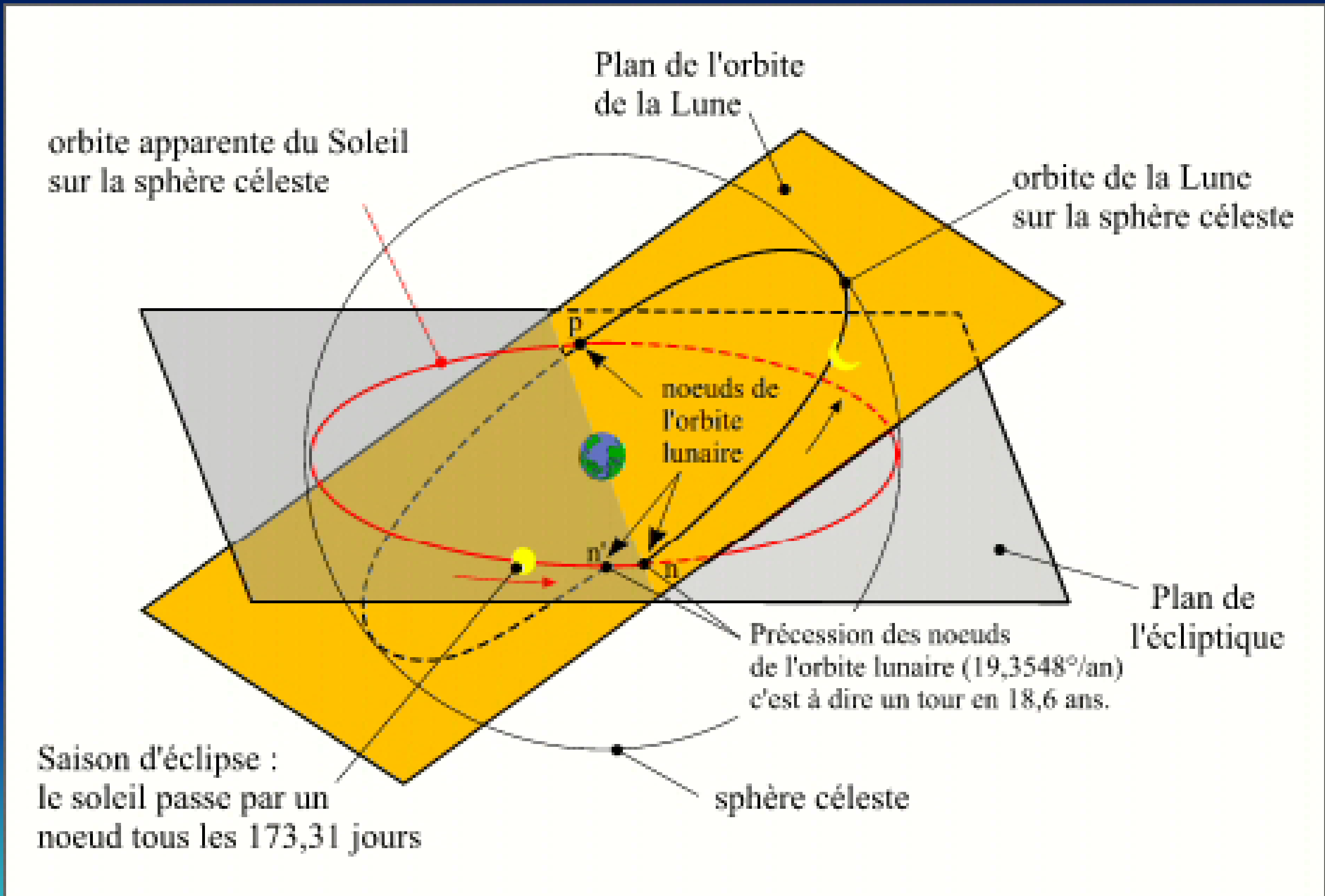




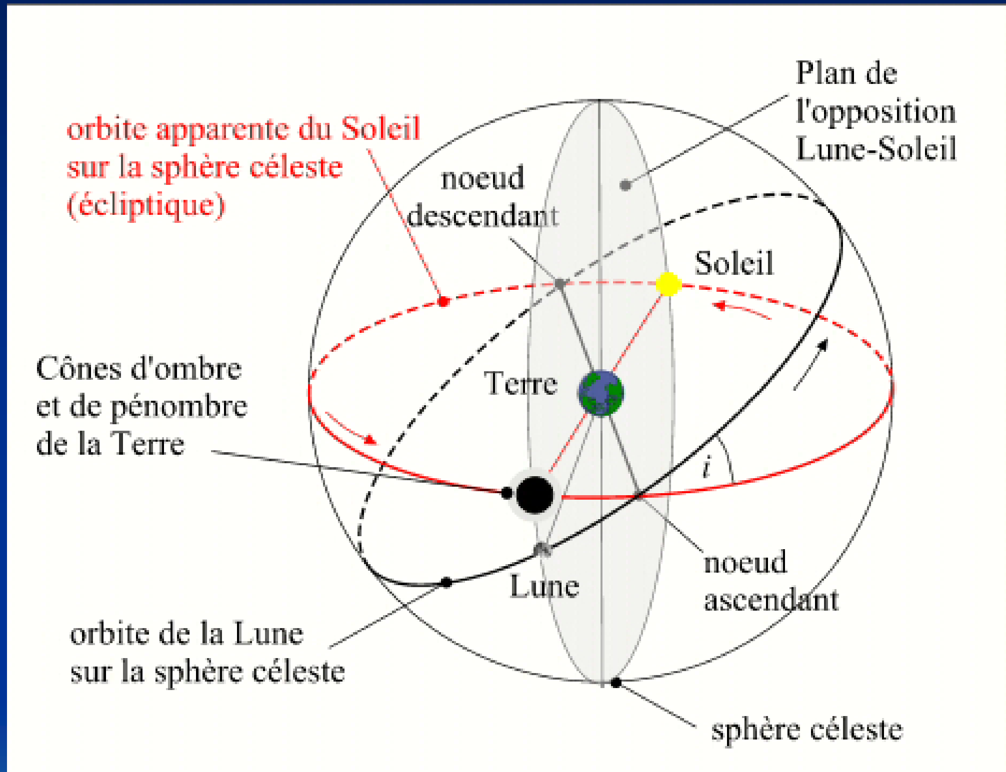
L'éclipse totale du Soleil du 11 août 1999



Pourquoi il n'y a pas d'éclipse une fois tous les mois.

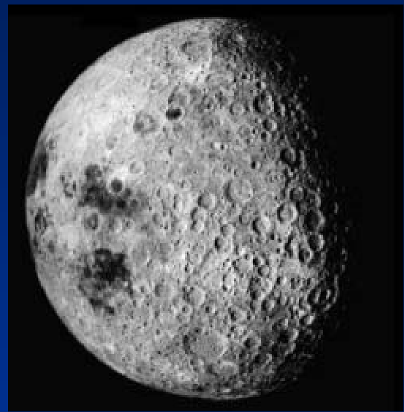


Le plan de l'écliptique, les orbites de la Terre et de la Lune, et les nœuds ascendant et descendant

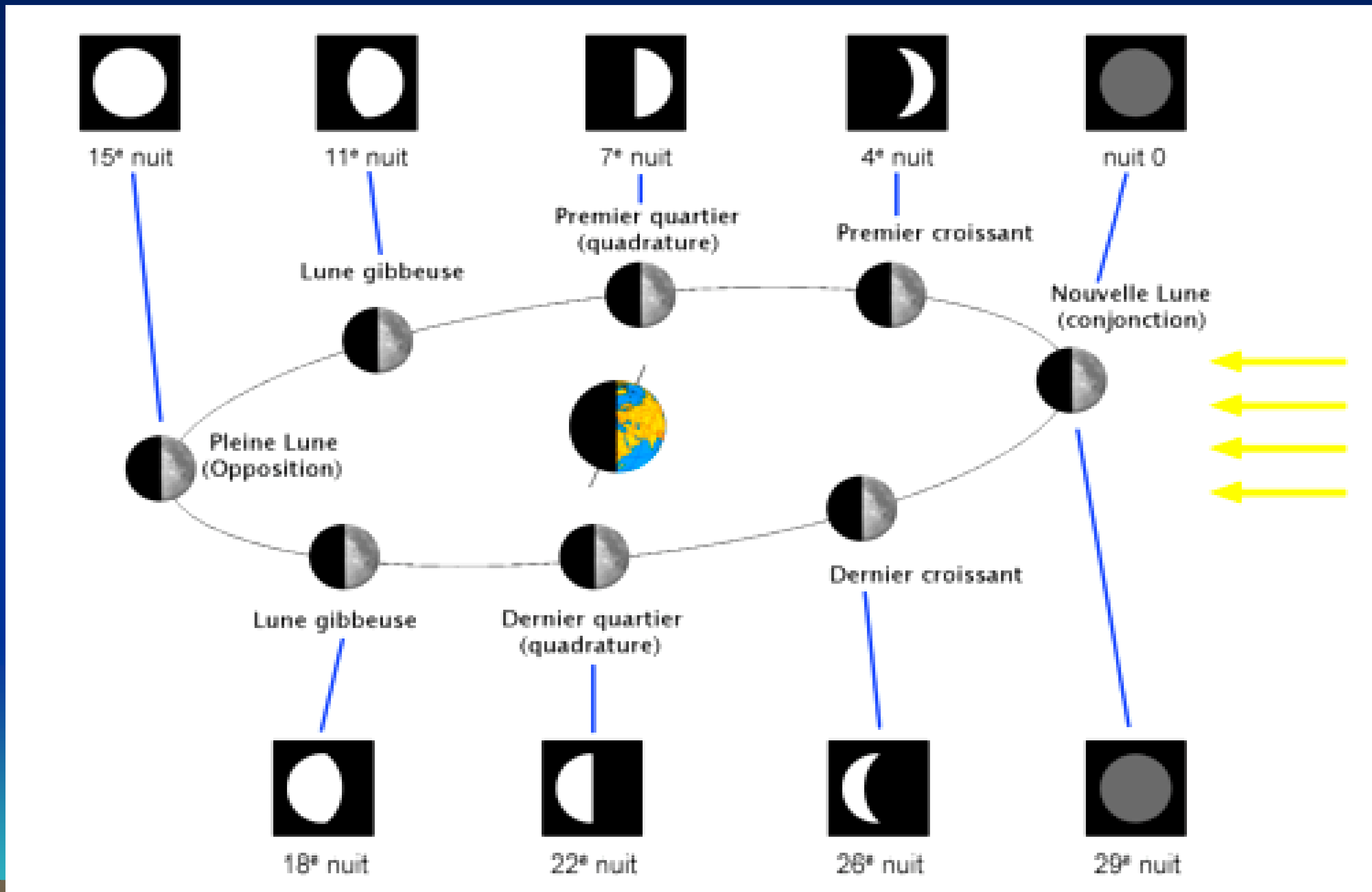


Les éclipses du Soleil se reproduisent au même endroit avec la période approximative de 18 ans (le « saros » connu des anciens Egyptiens)

Pourquoi la semaine de 7 jours ?
La Lune et ses phases.



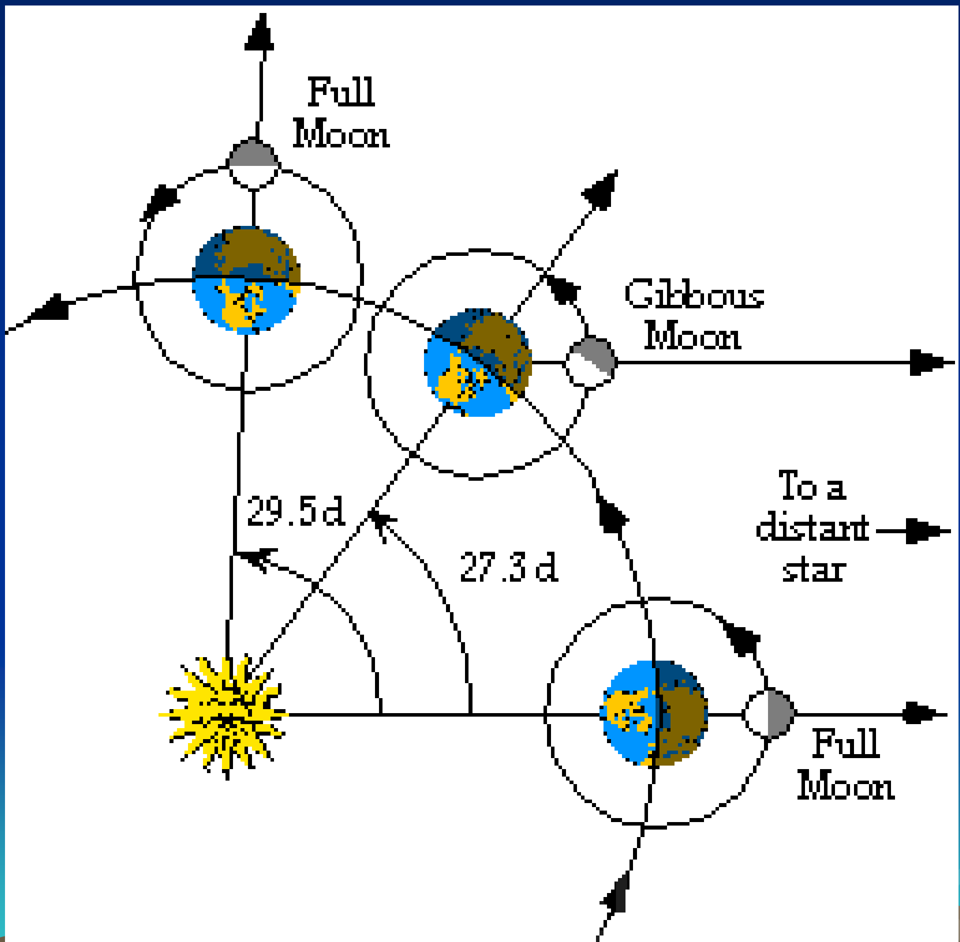
Pourquoi la semaine de 7 jours ?
La Lune et ses phases: un tour complet en 29 jours.

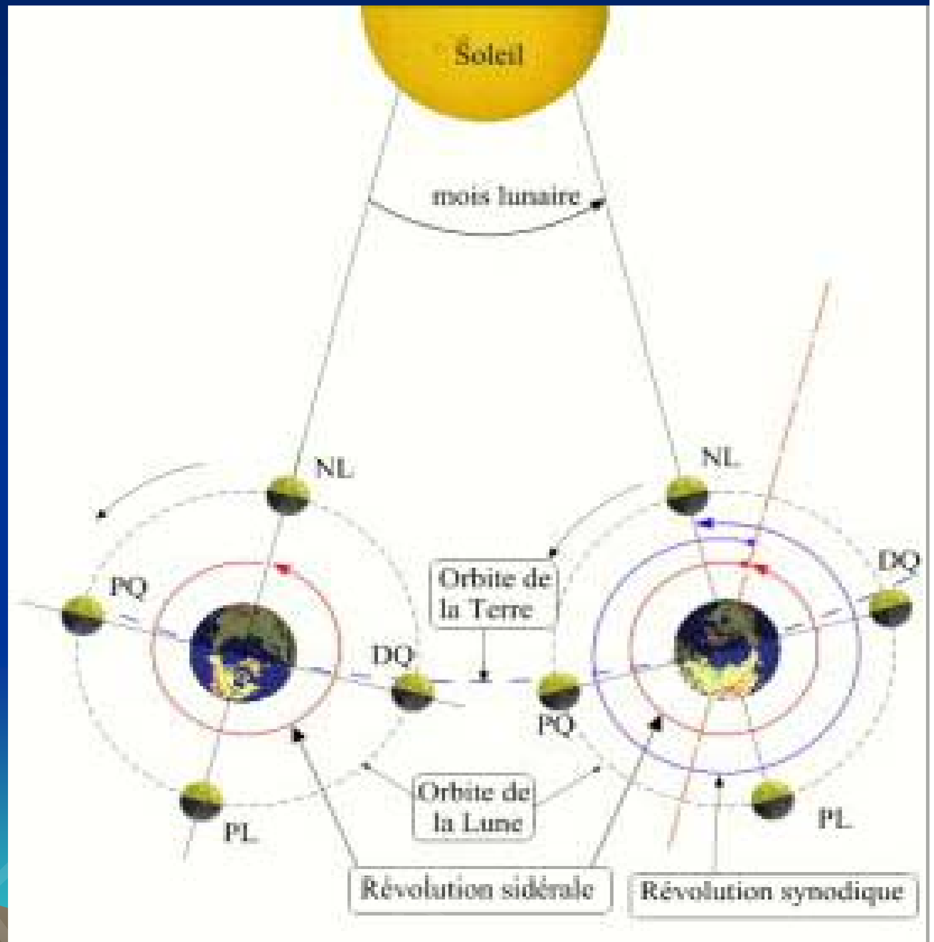


Mois synodique et mois sidéral.

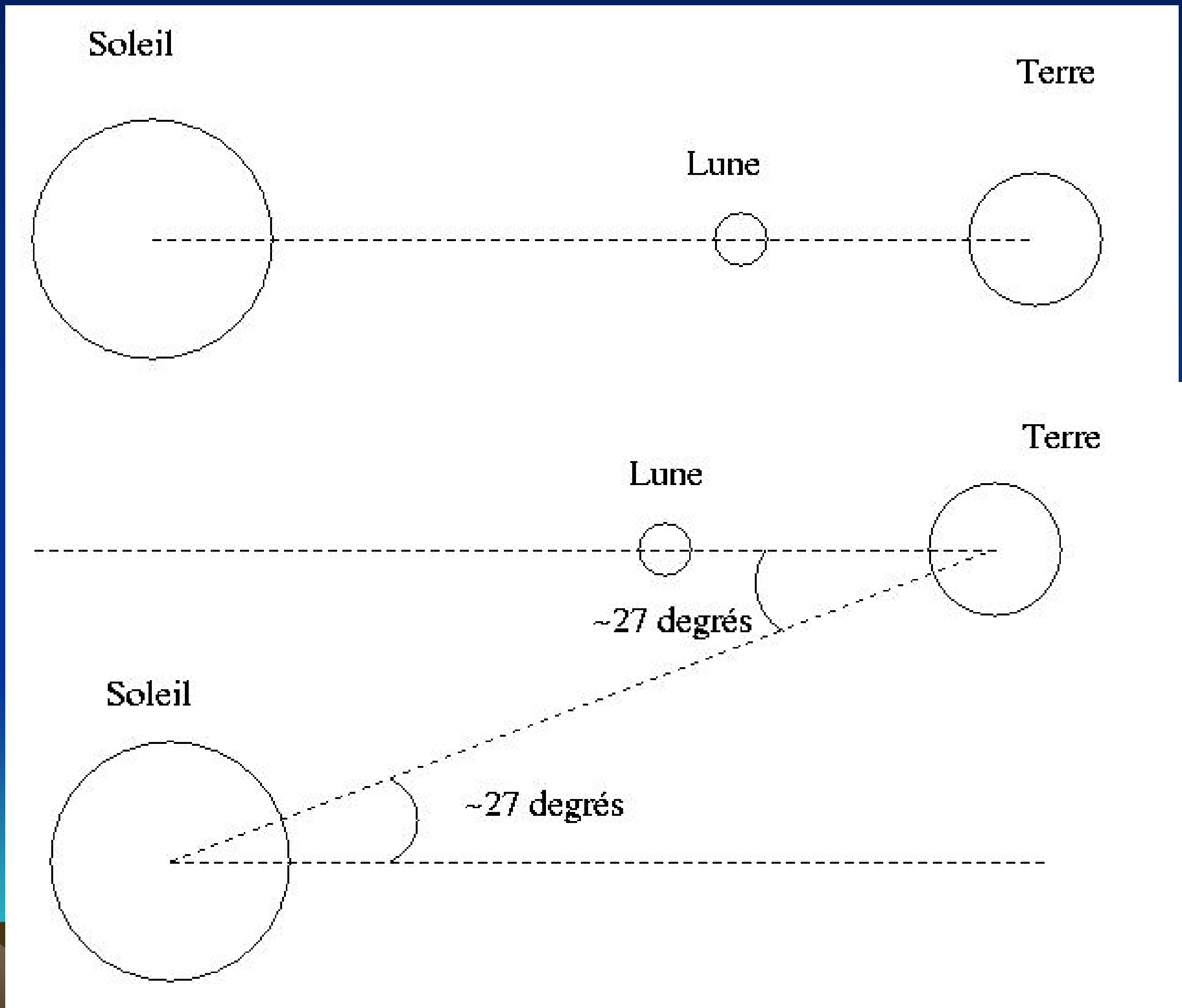
29,53 jours entre deux phases identiques (par rapport au Soleil)

27,36 jours entre deux positions identiques par rapport aux étoiles

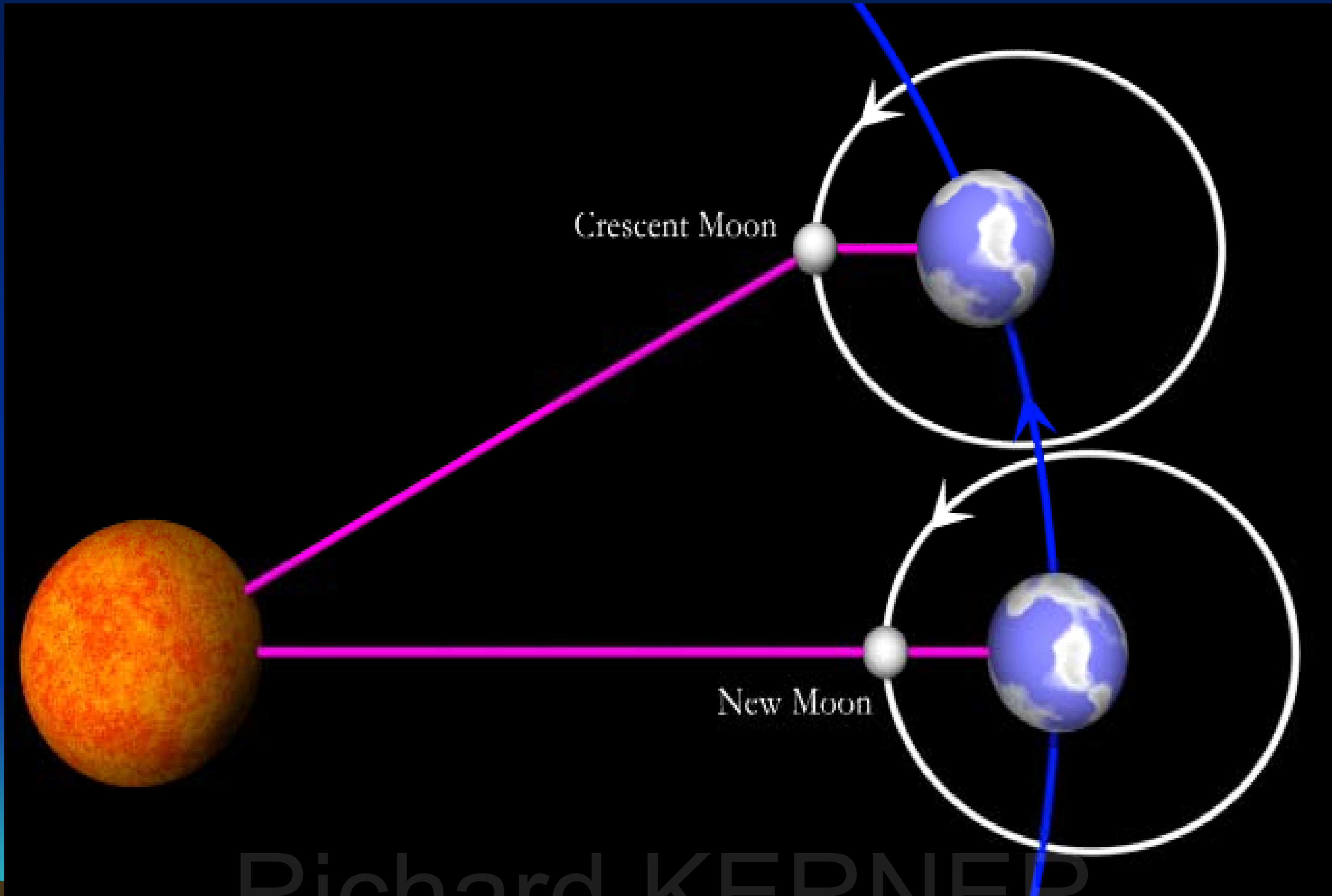




Différence entre les positions consécutives de la Lune par rapport au Soleil après un mois sidéral.

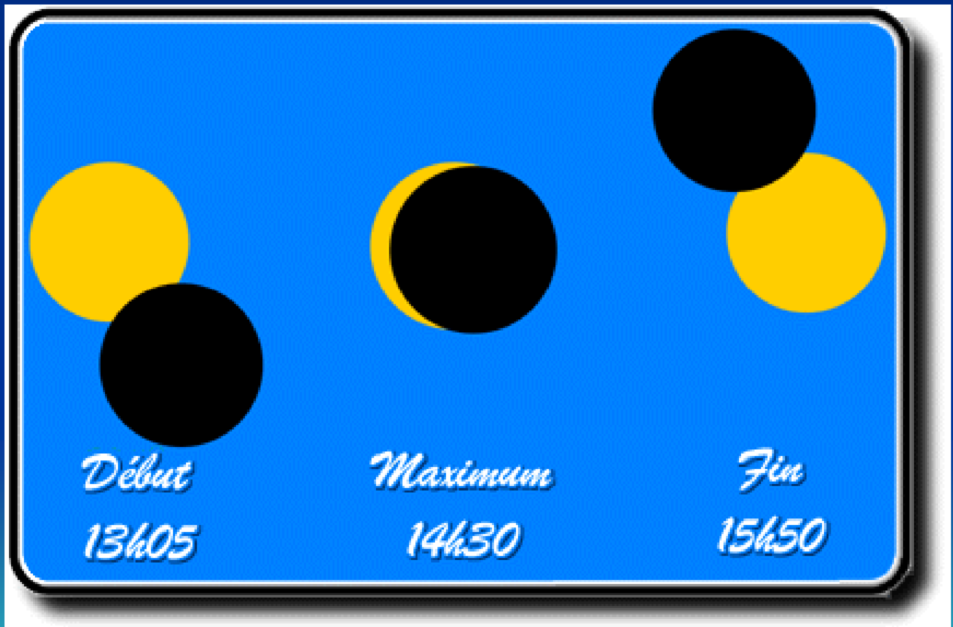


Mois sidéral et mois synodique



Calcul de la durée d’une éclipse solaire totale

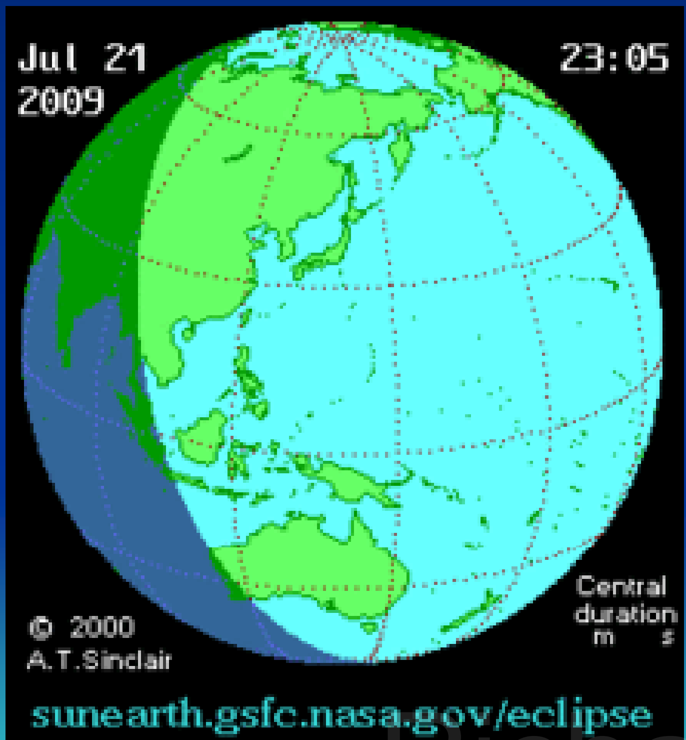
La Lune met 29,53 jours , soit environ 709 heures pour compléter un tour complet (le tour synodique, entre deux phases identiques). La largeur angulaire apparente du Soleil est d’environ 31’ ~0.516 degrés. Entre le début et la fin de l’éclipse totale la Lune doit parcourir 1.03°. Pour évaluer le temps ΔT nécessaire à ce parcours, une simple règle de trois nous suffira: (ΔT):(1,03°) = (709):(360°), ce qui donne le résultat ΔT = 2h03m environ – à peine plus de deux heures. En réalité, le phénomène dure presque trois heures à cause de la rotation propre de la Terre autour de son axe.



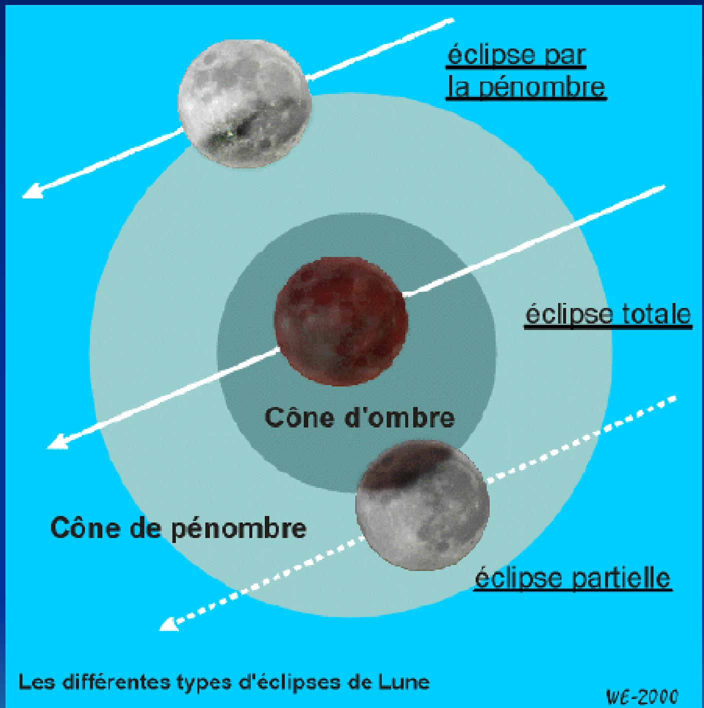
L’ombre de la Lune court de l’Ouest vers l’Est, mais la Terre tourne dans le même sens, la rattrapant, ce qui conduit à la durée plus longue de l’éclipse. Le facteur prongeant la durée dépend de la latitude; à Paris il vaut environ 1,35

Les durées des éclipses

- Passage de l'ombre de la Lune sur la surface de la Terre pendant l'éclipse solaire du 29 mars 2004.



Durée d'une éclipse totale de la Lune:



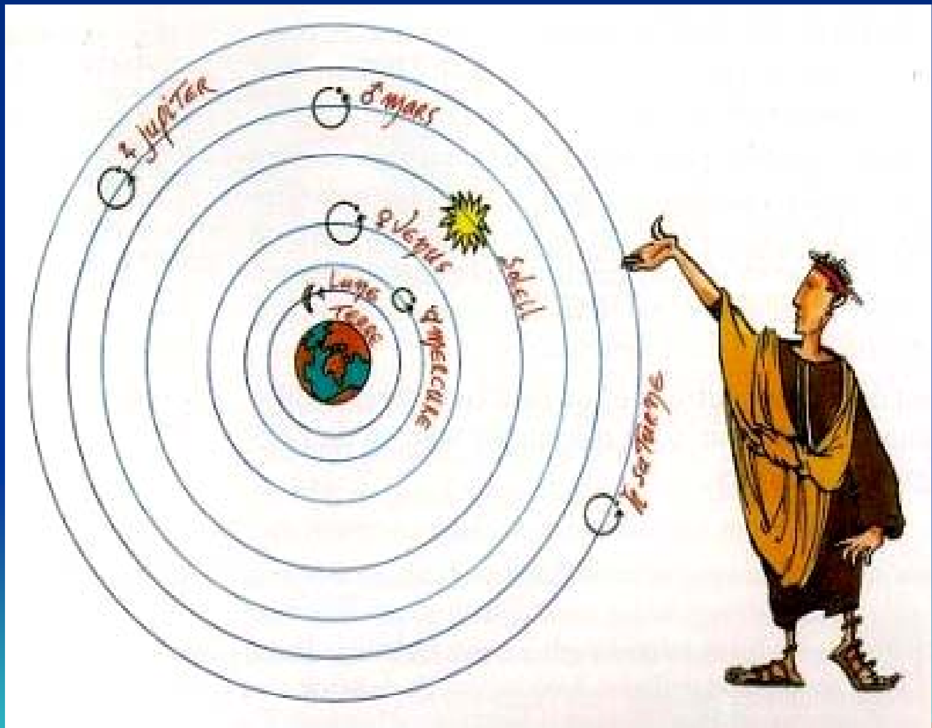
19h 44	Entrée dans la pénombre
20h 42	Entrée dans l'ombre
21h 50	Début de la totalité
22h 20	Maximum de l'éclipse
22h 51	Fin de la totalité
23h 58	Sortie de l'ombre
0h 56	Sortie de la pénombre

A partir du temps de l'éclipse totale de la Lune on peut déduire le diamètre angulaire de l'ombre portée de la Terre, et ensuite, le rapport entre les diamètres de la Terre et de la Lune.

L’ère de l’astronomie nouvelle: la révolution copernicienne

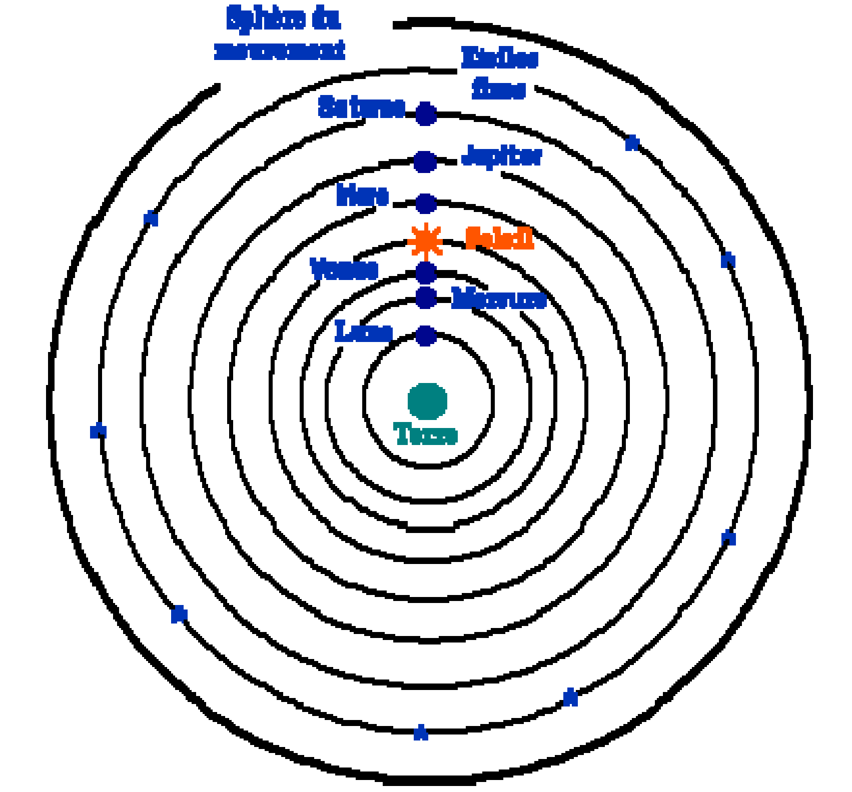
Les deux modèles du système solaire:

Ptolémée | **Copernic**

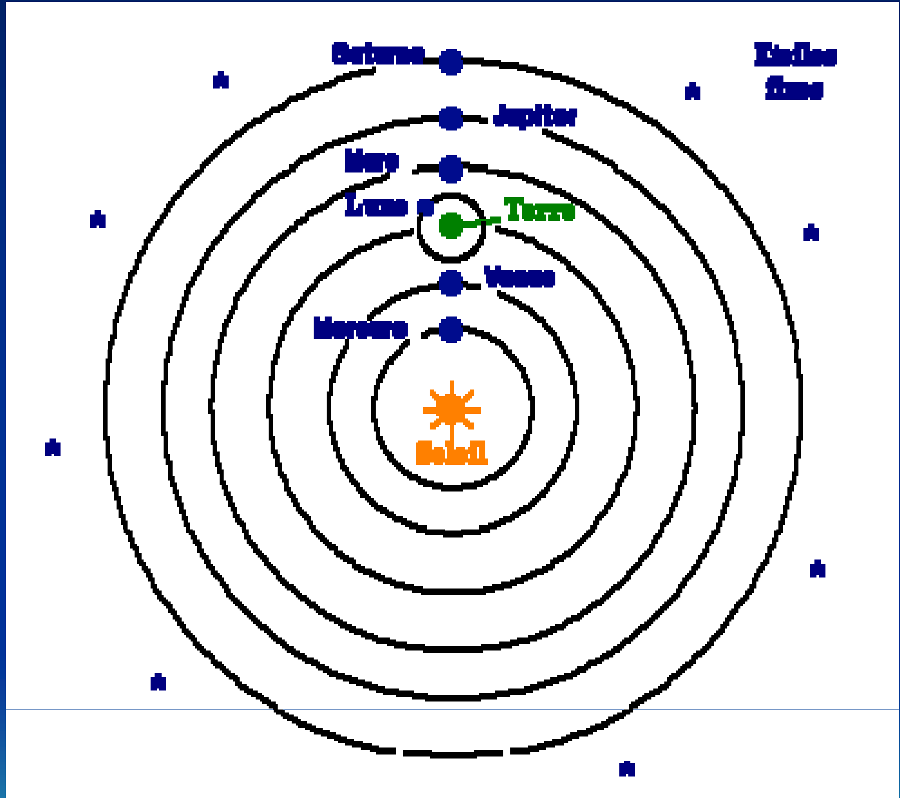


Comparaison entre les deux systèmes:

Le système géocentrique à gauche, le système héliocentrique à droite.



le Système géocentrique



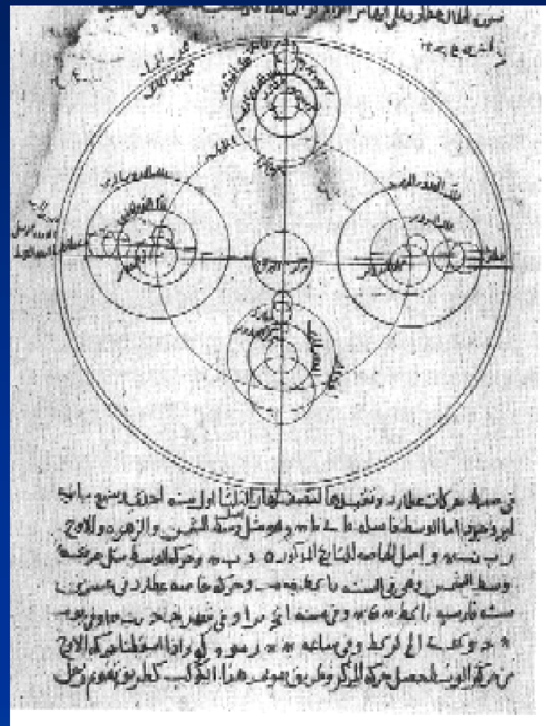
le Système héliocentrique

Ptolémée et son modèle su système solaire.

Claude Ptolémée est né en 11à et mort en ~161 (?) à Alexandrie
L’Egypte hellénistique faisait alors partie de l’Empire Romain.

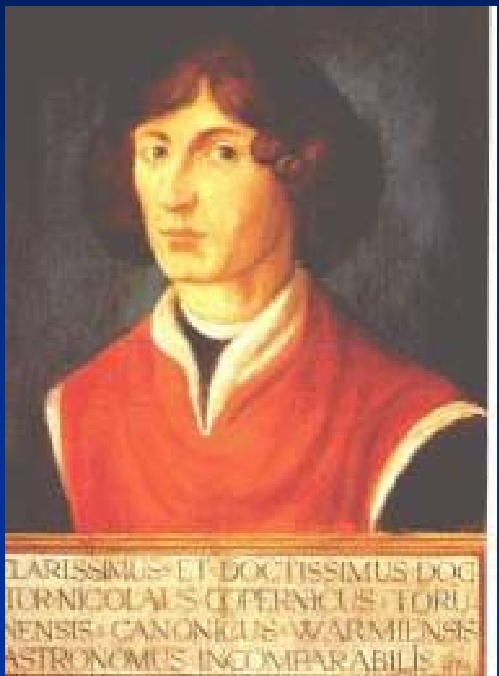
Portrait de Ptolémée sur le portail doré du Baptistère de Florence, XV-ème siècle

Portrait imaginaire de Ptolémée, dans un livre du XVII-ème

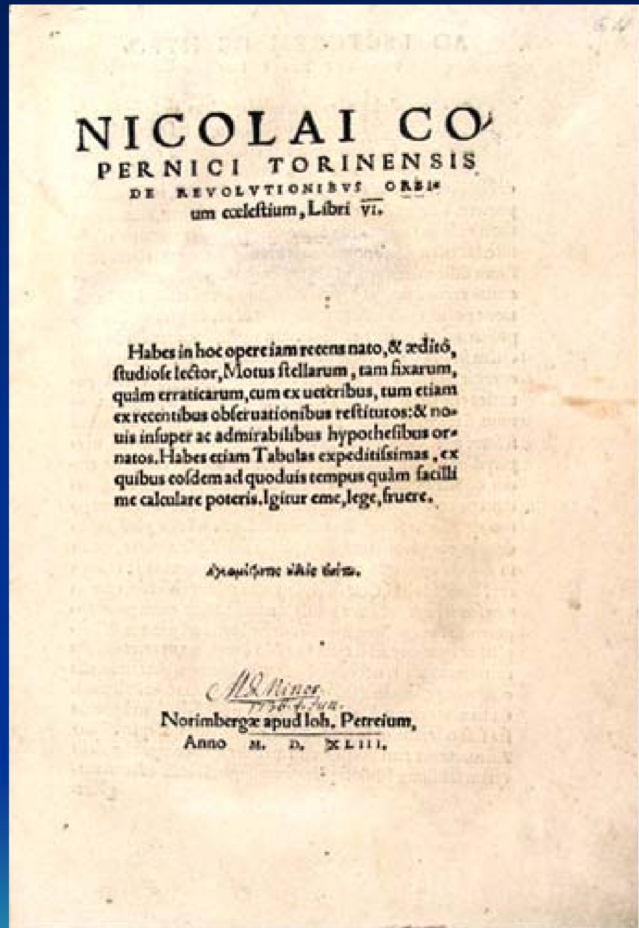


Une page de la traduction arabe de « La grande syntaxe Mathématique », (« Almageste » en arabe,), manuscrit du 12-ème siècle

Nicolas Copernic (Mikolaj Kopernik)



Portrait de Nicolas Copernic.
Né à Torun (Pologne) en 1473, il étudia À Cracovie et à Bologne (Italie). Son œuvre astronomique a été publiée en 1543, l'année de sa mort.



NICOLAI CO
PERNICI TORINENSIS
DE REVOLVTIONIBVS ORBI-
um cœlestium, Libri VI.

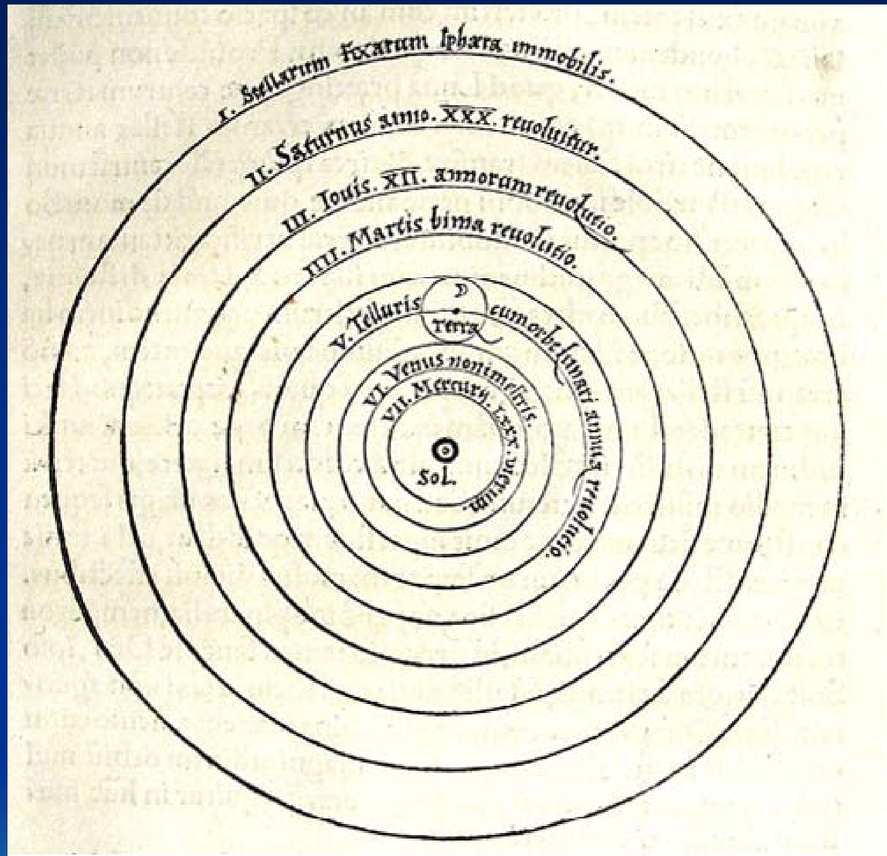
Habes in hoc opere iam recens nato, & ædito, studiose lector, Motus stellarum, tam fixarum, quàm erraticarum, cum ex ueteribus, tum etiam ex recentibus obseruationibus restitutos: & nouis insuper ac admirabilibus hypothesibus ornatos. Habes etiam Tabulas expeditissimas, ex quibus eosdem ad quoduis tempus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

ἀγεωμέτρητος οὐδεὶς εἰσίτω.

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

La page de garde de son œuvre, parue en 1543

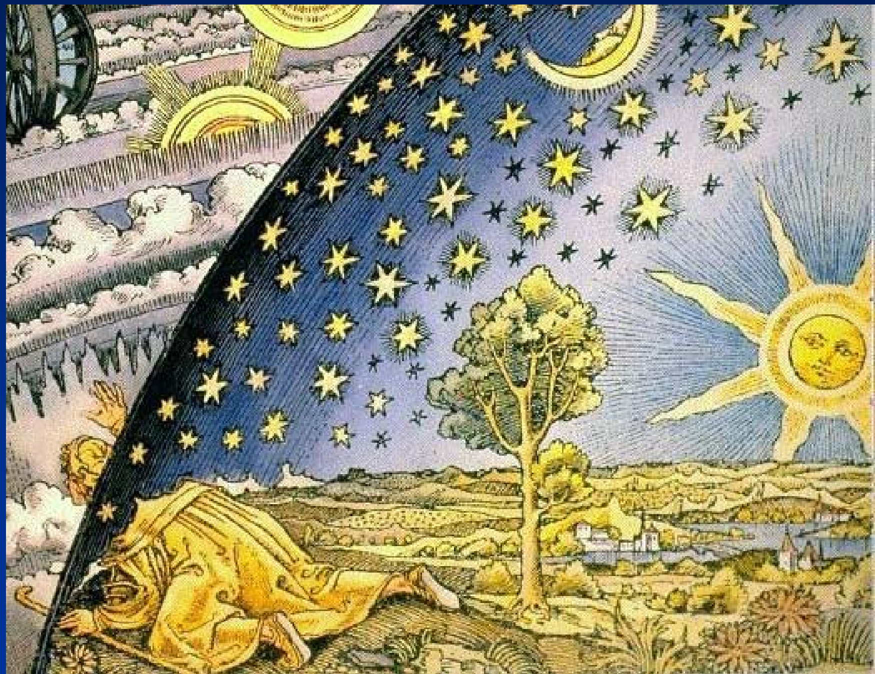
Le système héliocentrique de Copernic



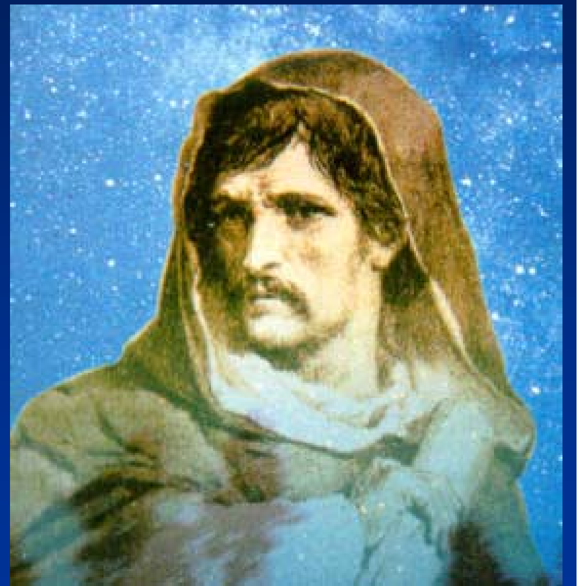
La représentation du système héliocentrique qui se trouvait dans le livre de Copernic « De Revolutionibus Orbium Celestium » en latin, paru en 1543

Giordano Bruno et l'Univers infini

Giordano Bruno,
Né en 1548, il
défend la doctrine
selon laquelle il y a
une multitude de
systèmes solaires
dans l'Univers.



L'Homme découvrant l'Univers
au-delà de la sphère céleste.
Gravure coloriée du XVII-ème
siècle

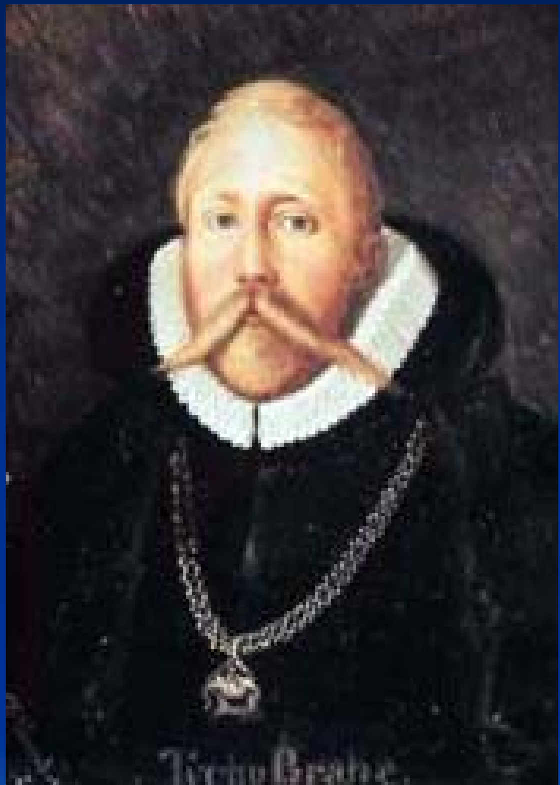


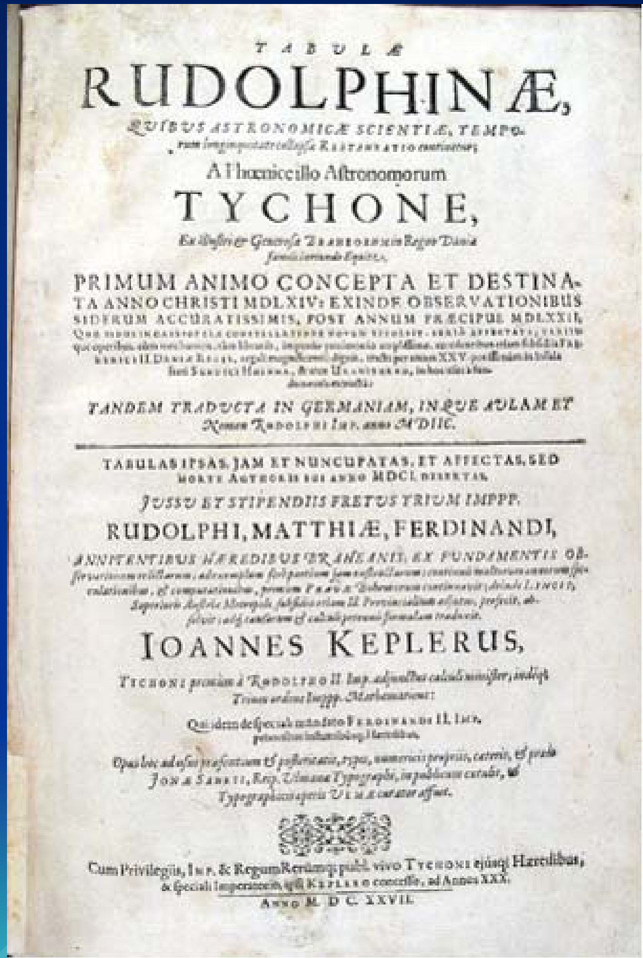
Fut condamné après un
procès qui a duré 8 ans
à être brûlé vif sur le
bûcher. Exécuté en 1600

Tycho Brahe, astronome danois

Tycho Brahe est né en 1546 à Aalborg et mort à Prague en 1601

Tycho Brahe et ses tables astronomiques





TABULÆ

RUDOLPHINÆ,

QUIBUS ASTRONOMICÆ SCIENTIÆ, TEMPO-
rum longinquitate collapsæ RESTAURATIO continetur;

A Phœnice illo Astronomorum

TYCHONE,

Ex Illustri & Generosa BRAHEORUM in Regno Daniæ
familia oriundo Equite,

PRIMUM ANIMO CONCEPTA ET DESTINA-
TA ANNO CHRISTI MDLXIV: EXINDE OBSERVATIONIBUS
SIDERUM ACCURATISSIMIS, POST ANNUM PRÆCIPUE MDLXXII,
[illegible]

TANDEM TRADUCTA IN GERMANIAM, INQUE AULAM ET
Nomen RUDOLPHI IMP. anno MDIIC.

TABULAS IPSAS, JAM ET NUNCUPATAS, ET AFFECTAS, SED
MORTE AUTHORIS SUI ANNO MDCI. DESERTAS,

JUSSU ET STIPENDIIS FRETUS TRIUM IMPPP.

RUDOLPHI, MATTHIÆ, FERDINANDI,

ANNITENTIBUS HÆREDIBUS BRAHEANIS, EX FUNDAMENTIS OB-
[illegible]

IOANNES KEPLERUS,

TYCHONI primùm à RUDOLPHO II. Imp. adjunctus calculi minister; indeq;
Trium ordine Imppp. Mathematicus:

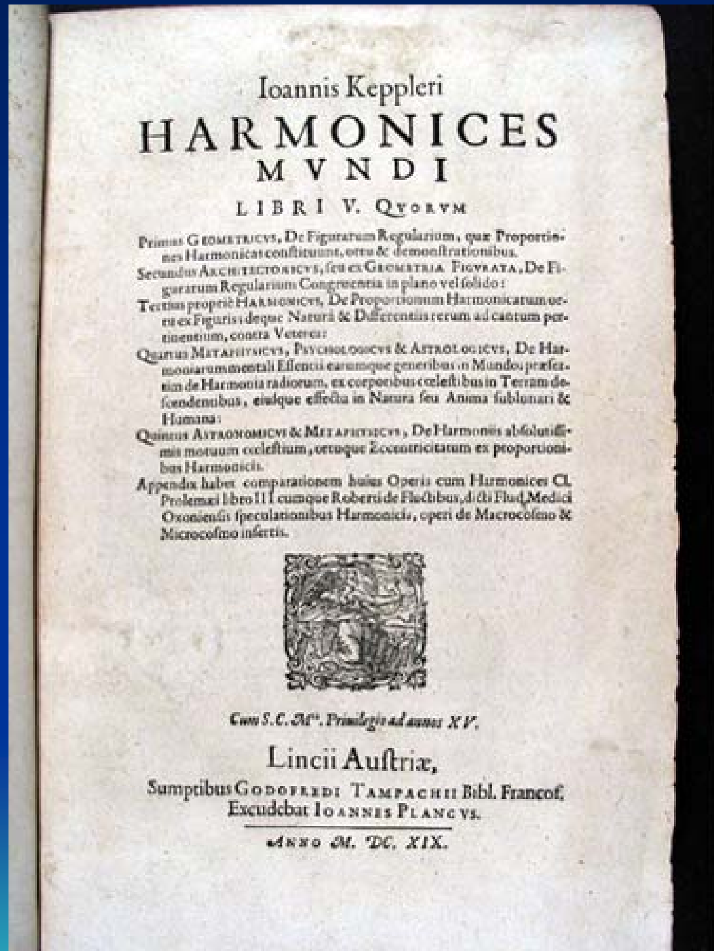
[illegible]

Cum Privilegiis, IMP. & Regum Rerúmq; publ. vivo TYCHONI ejúsq; Hæredibus,
& speciali Imperatorio, ipsi KEPLERO concesso, ad Annos XXX.

ANNO M. DC. XXVII.

Kepler et son livre « Harmonices Mundi » (« l'harmonie du monde »)

Johannes Kepler, né en 1571
en Allemagne, mort en 1630



Ioannis Keppleri
HARMONICES
MVNDI
LIBRI V. QVORVM

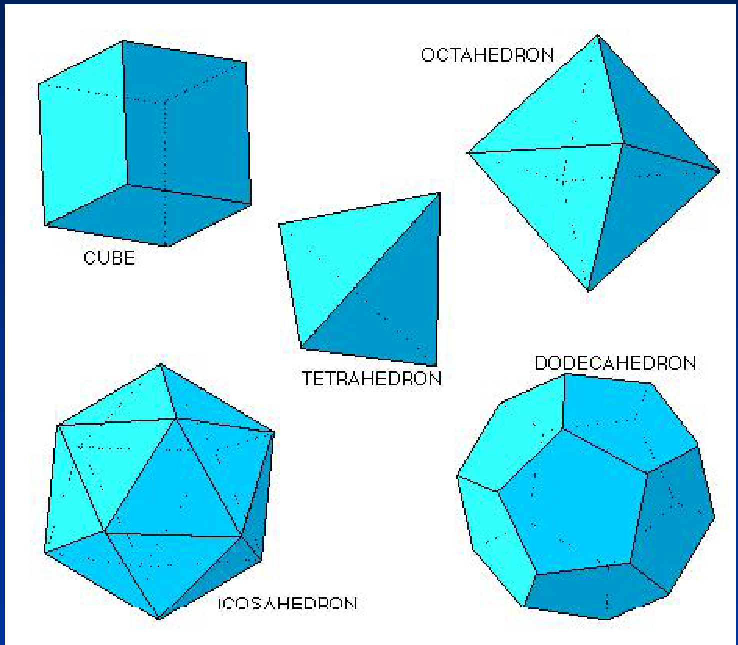
Primus GEOMETRICVS, De Figurarum Regularium, quæ Proportiones Harmonicas constituunt, ortu & demonstrationibus.
Secundus ARCHITECTONICVS, seu ex GEOMETRIA FIGVRATA, De Figurarum Regularium Congruentia in plano vel solido:
Tertius propriè HARMONICVS, De Proportionum Harmonicarum ortu ex Figuris; deque Naturâ & Differentiis rerum ad cantum pertinentium, contra Veteres:
Quartus METAPHYSICVS, PSYCHOLOGICVS & ASTROLOGICVS, De Harmoniarum mentali Essentiâ earumque generibus in Mundo; præsertim de Harmonia radiorum, ex corporibus cœlestibus in Terram descendentibus, eiusque effectu in Natura seu Anima sublunari & Humana:
Quintus ASTRONOMICVS & METAPHYSICVS, De Harmoniis absolutissimis motuum cœlestium, ortuque Eccentricitatum ex proportionibus Harmonicis.
Appendix habet comparationem huius Operis cum Harmonices Cl. Ptolemæi libro III. cumque Roberti de Fluctibus, dicti Flud, Medici Oxoniensis speculationibus Harmonicis, operi de Macrocosmo & Microcosmo insertis.

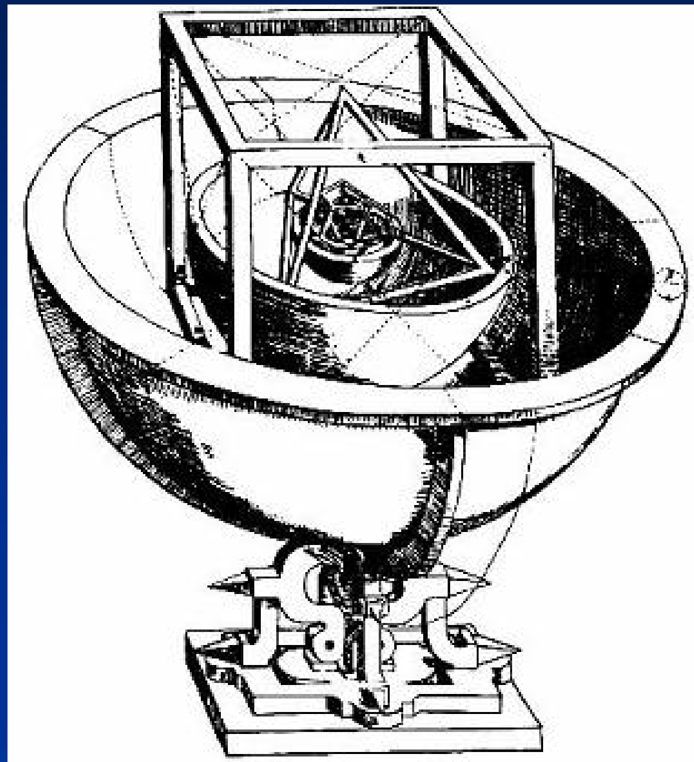
Cum S.C. Mᵗⁱˢ. Privilegio ad annos XV.

Lincii Austriæ,
Sumptibus GODOFREDI TAMPACHII Bibl. Francof.
Excudebat IOANNES PLANCVS.
ANNO M. DC. XIX.

Le livre de Kepler où il défend le
modèle Copernicien du système solaire

Les polyèdres parfaits de Platon et le premier modèle de Kepler





Kepler croyait en une régularité dans la distribution d'orbites planétaires. 5 planètes et 5 polyèdres réguliers, ça faisait penser à plus qu'une simple coincidence…

Le modèle de sphères célestes imaginé par Kepler. Les rayons des orbites s'inscrivent dans les polyèdres réguliers bien choisis.

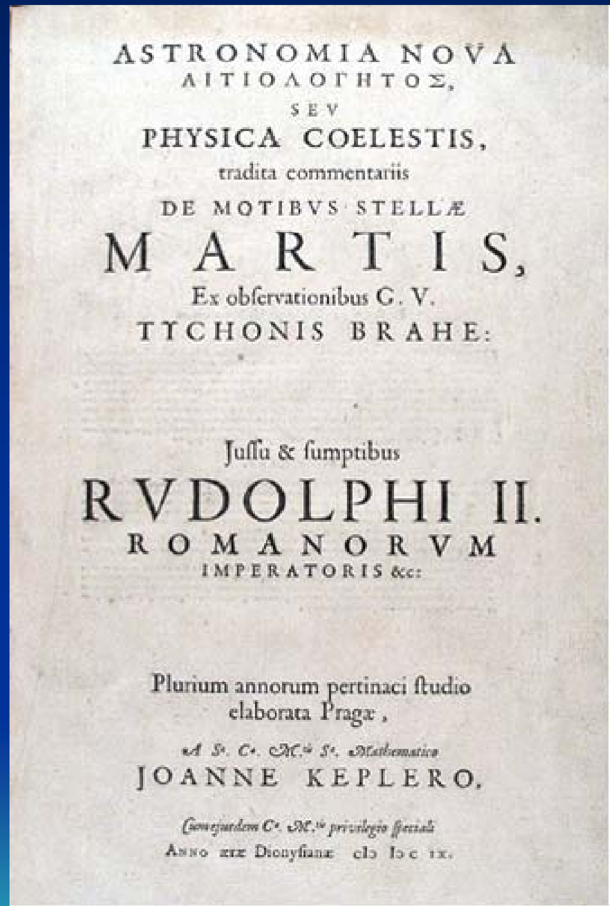
Les paramètres d'orbites des planètes du système solaire et la loi de Bode et de Titius: $D_n = 0.4 + 0.3 \times 2^{(n-1)}$ U.A.

Planète	Demi-grand Axe	D_n	Période sidérale
Mercure	0,38	0,4	87,969 j
Vénus	0,72	0,7	224,701 j
Terre	1	1	365,256 j
Mars	1,52	1,6	686,960 j
?	(?)	2.8	
Jupiter	5,20	5.1	4 335,355 j
Saturne	9,54	9.9	10 757,737 j
Uranus	19,22	19.6	30 708,160 j
Neptune	30,06	38.8 (?)	60 224,904 j

$$D_n = 0.4 + 0.3 \times \mathbf{2}^{(n-1)} \text{ U.A.}$$

Kepler et ses observations de la planète Mars

Johannes Kepler à Prague. Après la mort de Tycho Brahe il a eu accès aux carnets d'observation de Tycho, grâce à quoi il a su déterminer la forme de l'orbite de Mars.



ASTRONOMIA NOVA
ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΤΟΣ,
SEV
PHYSICA COELESTIS,
tradita commentariis
DE MOTIBVS STELLÆ
MARTIS,
Ex obſervationibus G. V.
TYCHONIS BRAHE:

Juſſu & ſumptibus
RVDOLPHI II.
ROMANORVM
IMPERATORIS &c:

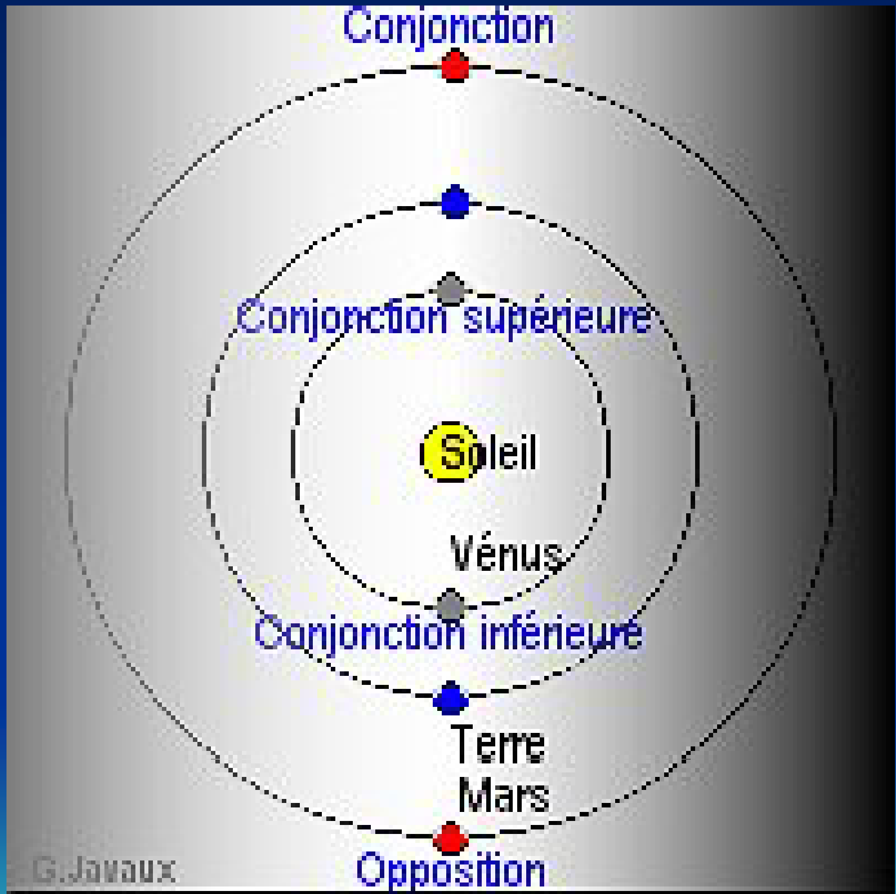
Plurium annorum pertinaci ſtudio
elaborata Pragæ,

A S. C. M.tis S. Mathematico
JOANNE KEPLERO,

Cum ejusdem C. M.tis privilegio ſpeciali
ANNO æræ Dionyſianæ cIɔ Iɔ c ix.

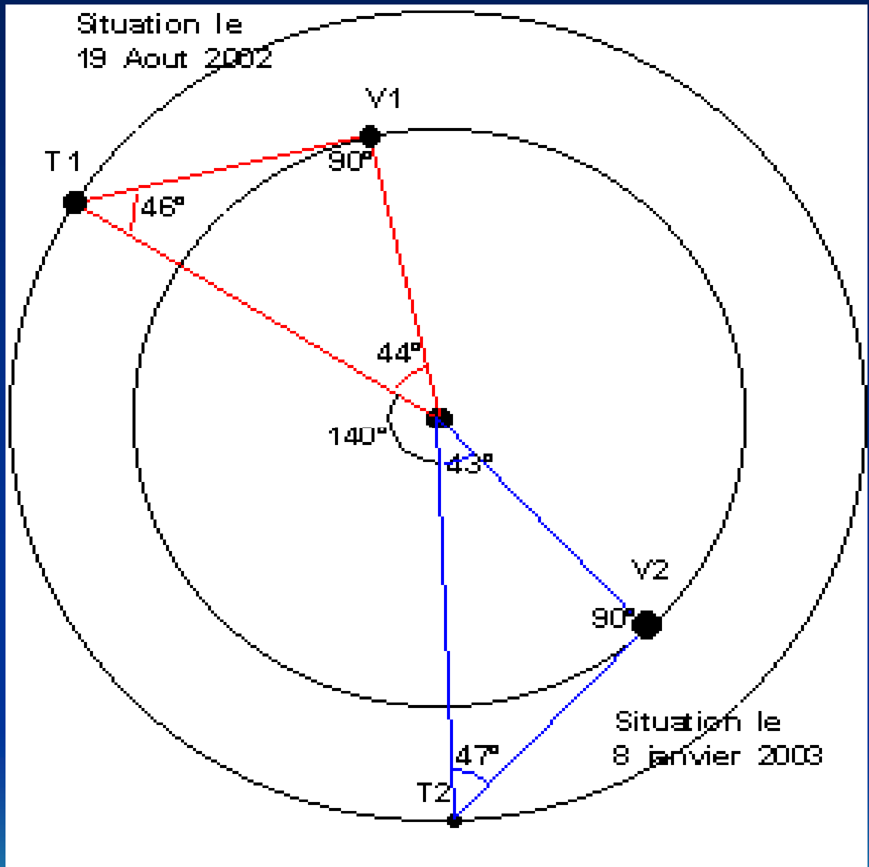
« L'Astronomie Nouvelle » de Kepler, avec l'énoncé ses lois de mouvement des planètes.

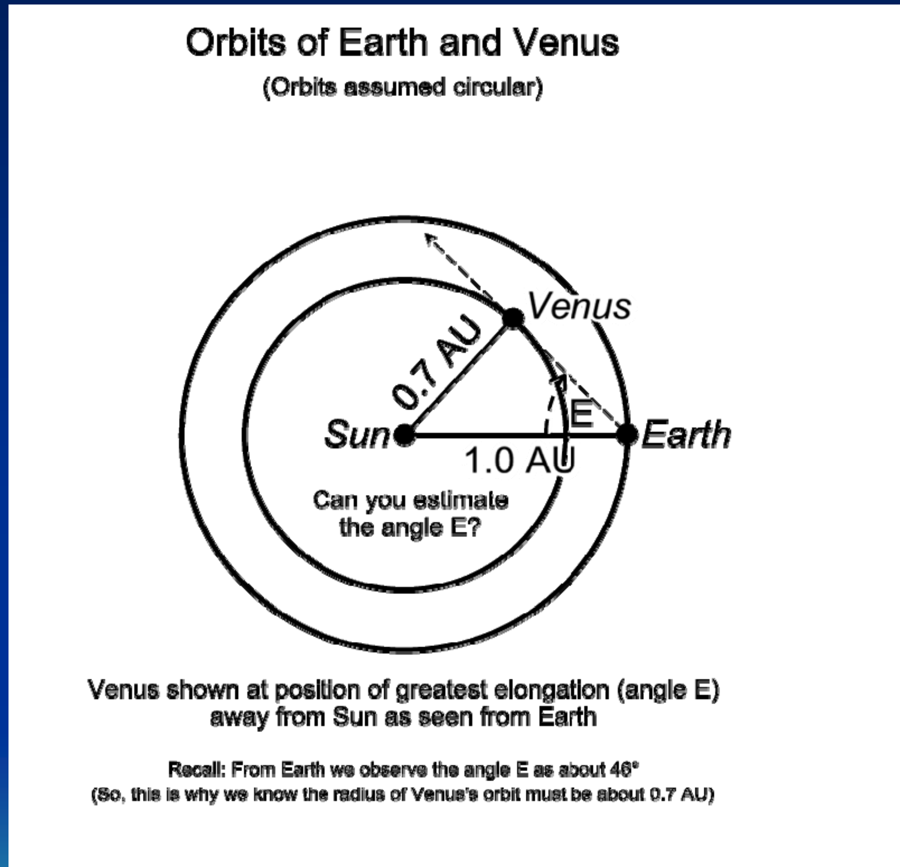
Positions caractéristiques d'une planète par rapport à la position de la Terre.



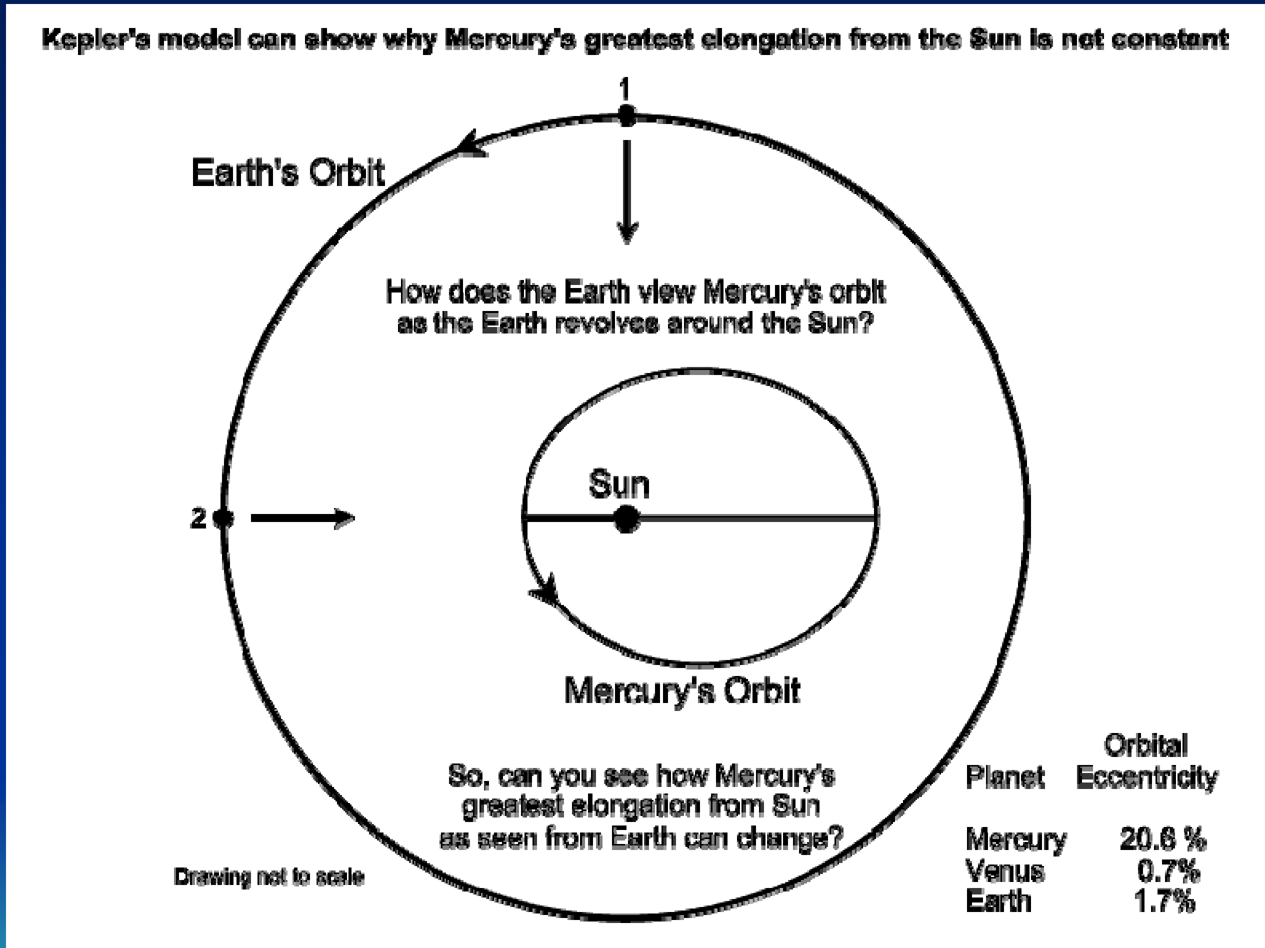
Conjonctions (oppositions) supérieures et inférieures de Mars et de Vénus.

Elongations maximales de Vénus





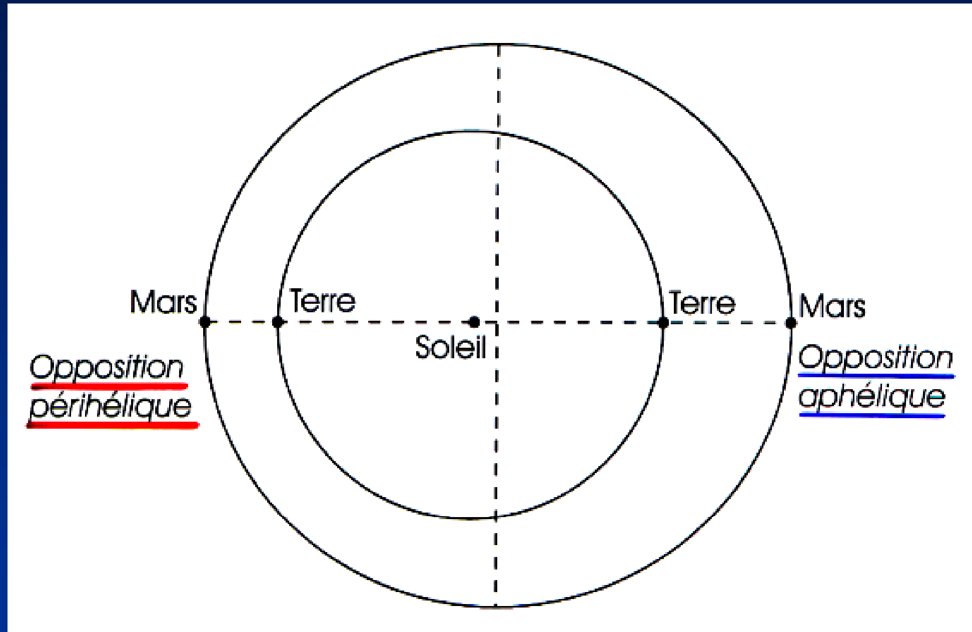
Les élongations maximales de Mercure varient au cours du temps.



En observant les élongations maximales variables de Mercure Kepler avait conclu que son orbite autour du Soleil ne pouvait pas avoir la forme d'un cercle parfait. Une forme ovale de l'orbite expliquait bien les observations.

Mars et son orbite

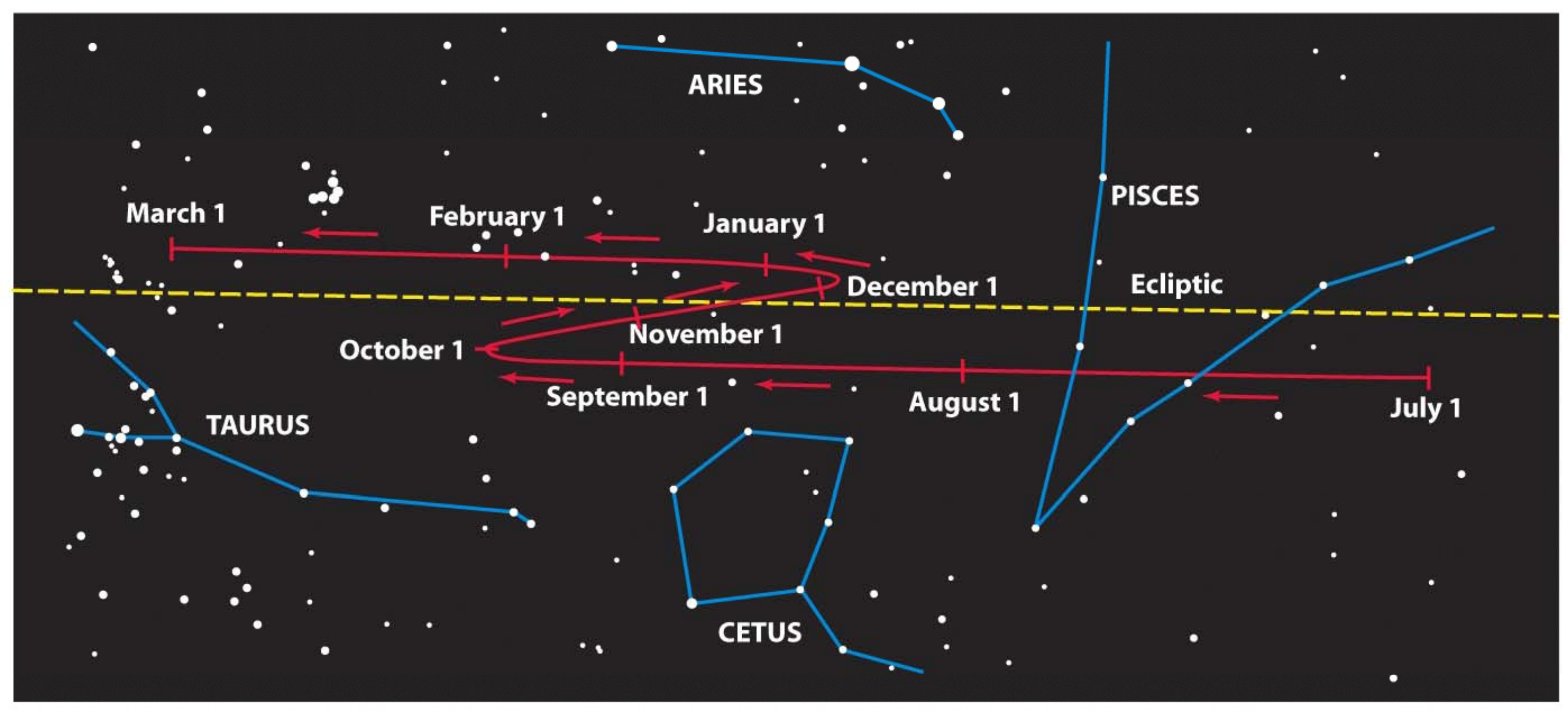
La planète Mars vue à travers un télescope de force moyenne.

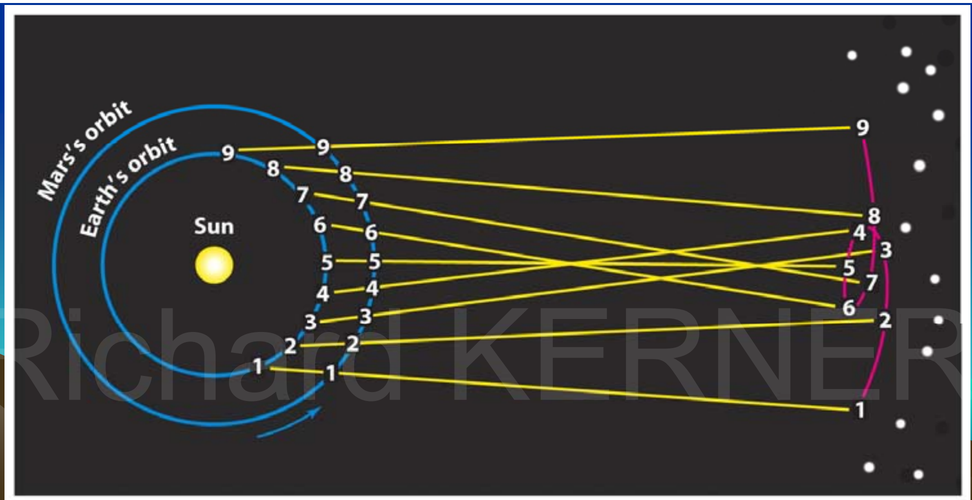


La période entre deux oppositions consécutives de Mars est de 780 jours.

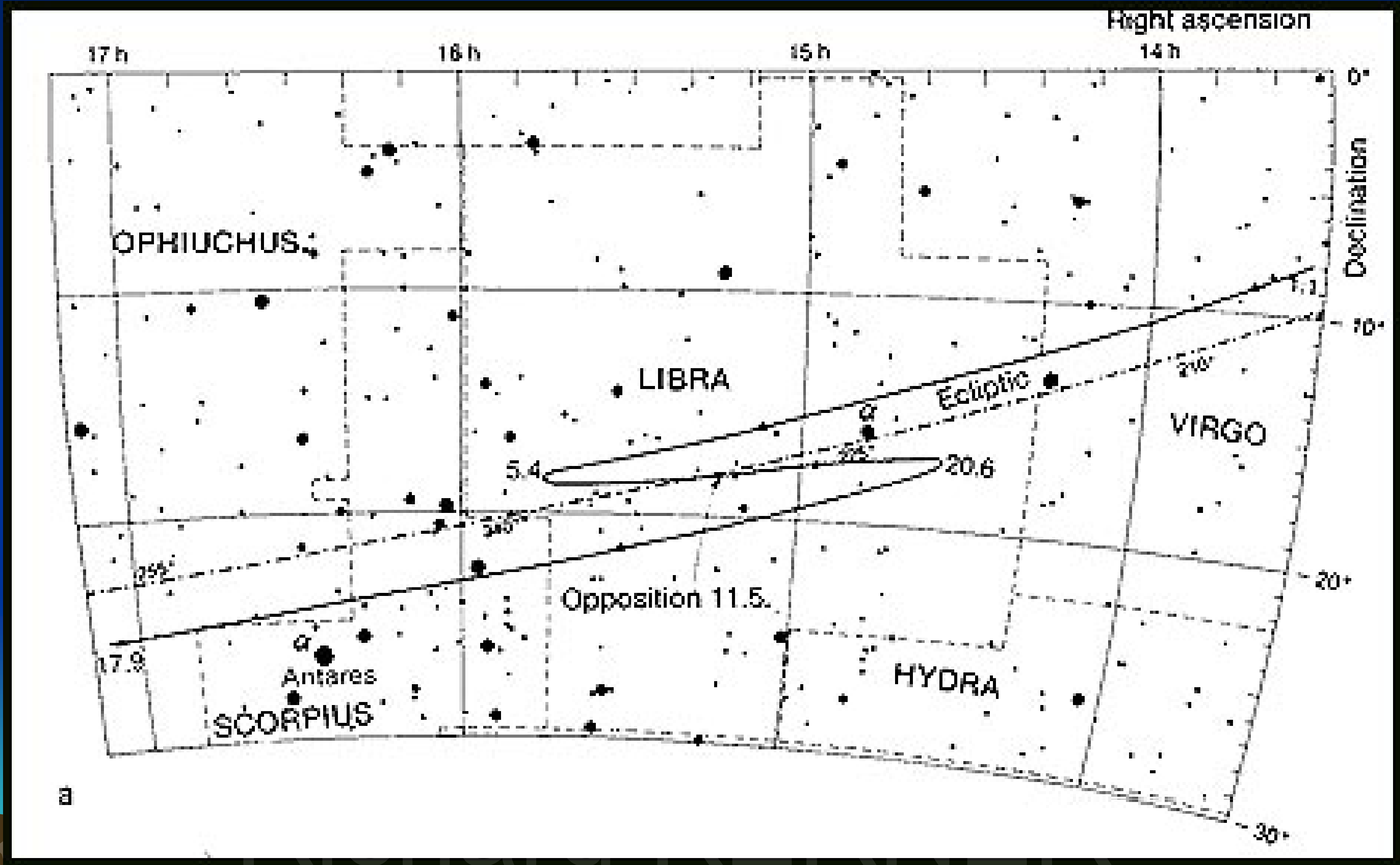
Grandeur apparente de Mars du juin au décembre 2004

Mouvement rétrograde de Mars et son explication par le système de Copernic

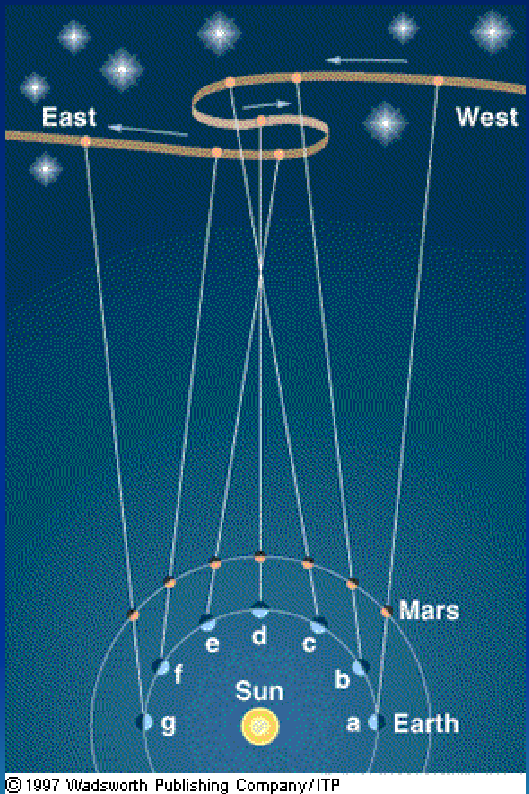


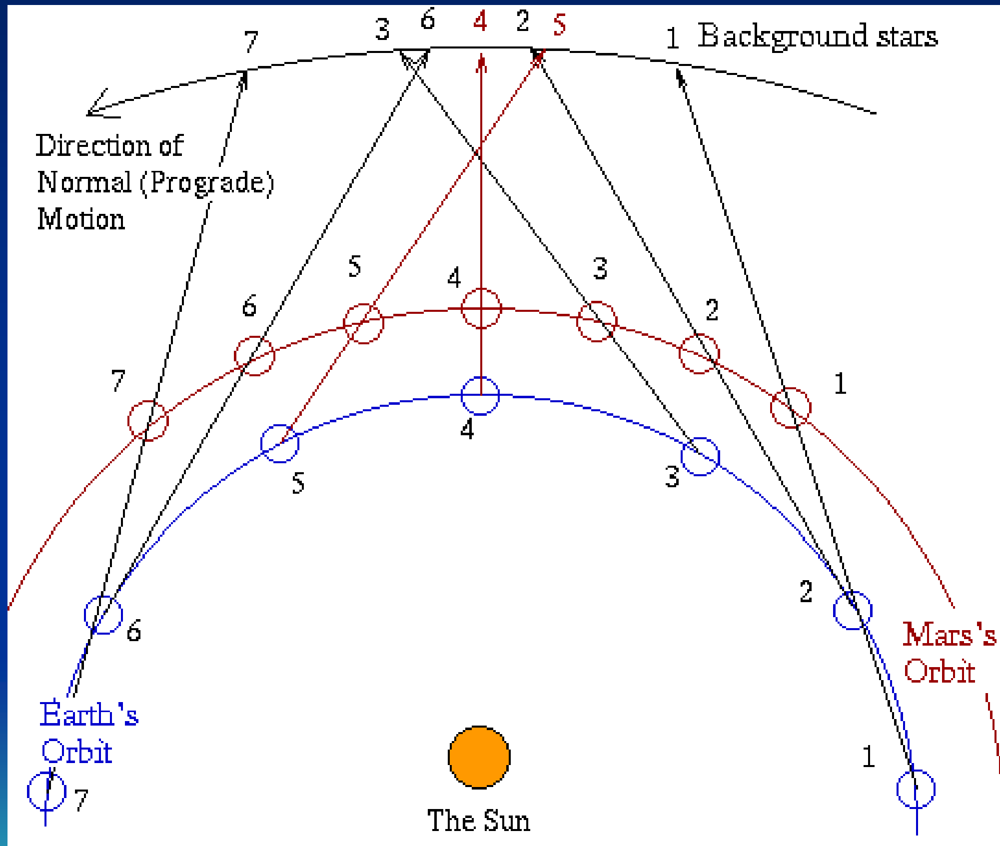


Mouvement apparent de Mars sur le fond des étoiles fixes.

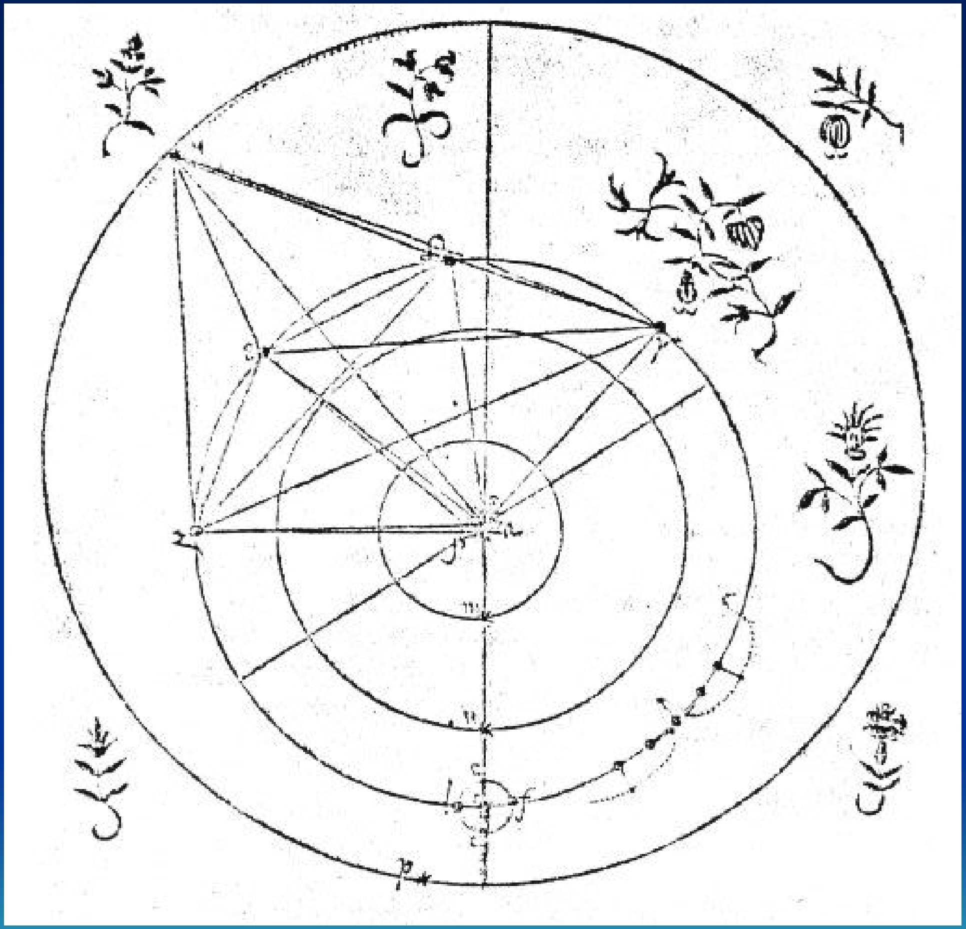


Mesures angulaires consécutives de la position de la planète Mars



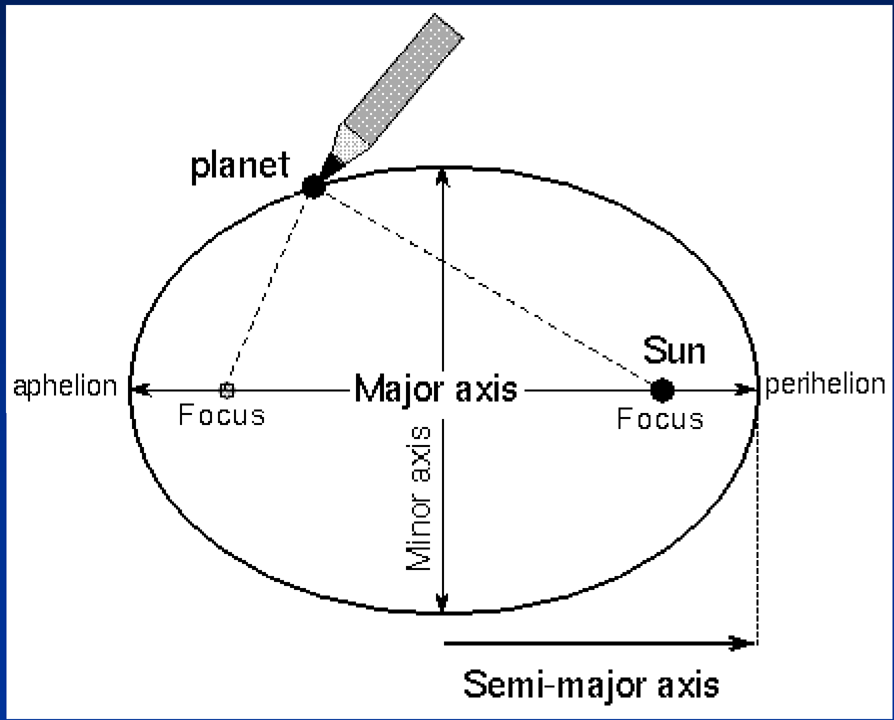


Dessin original de Kepler
montrant la triangulation de l'orbite de Mars



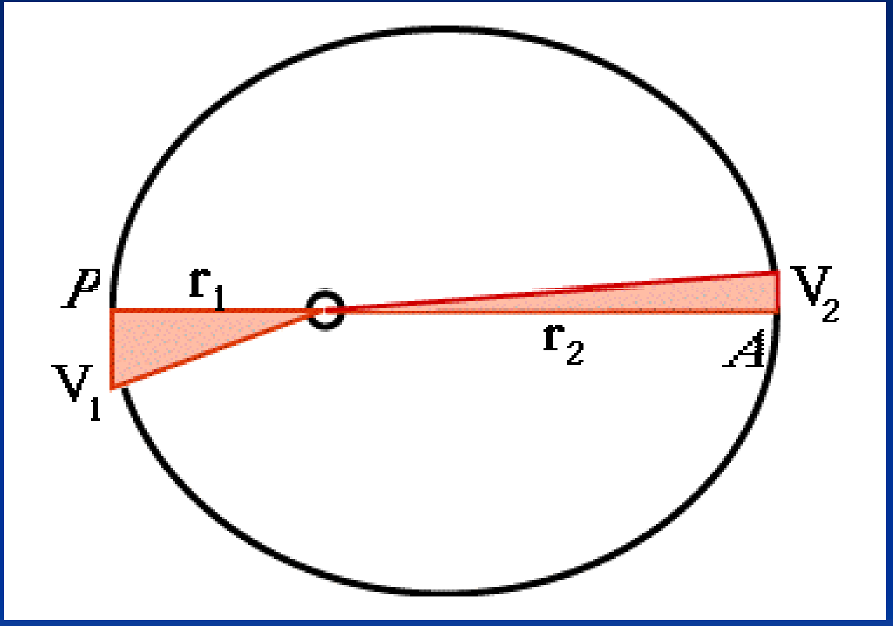
Dessin original de Kepler dans son livre « Astronomia Nova »,
Montrant le principe de la triangulation de l'orbite de Mars

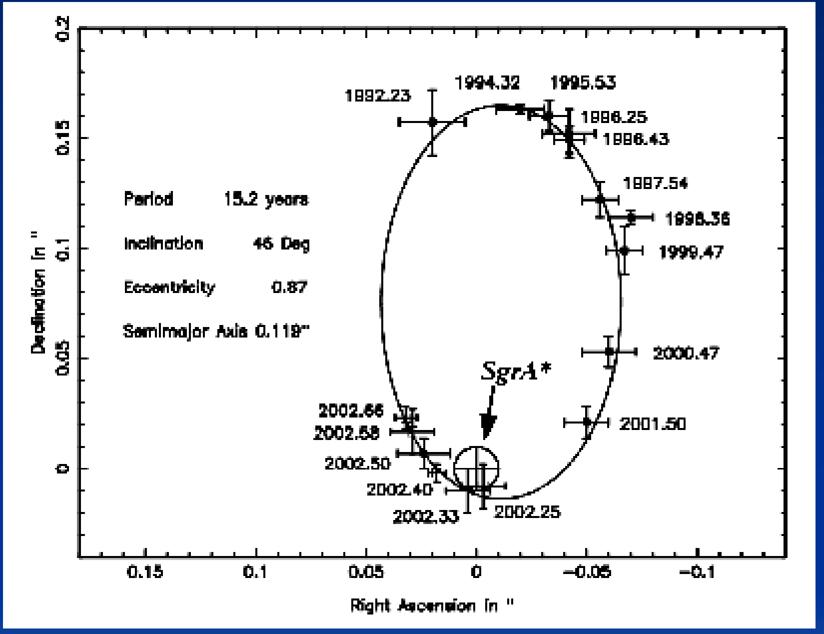
La première loi de Kepler



Les orbites des planètes sont des ellipses,
le Soleil se trouvant dans un des foyers de l'ellipse.

La seconde loi de Kepler

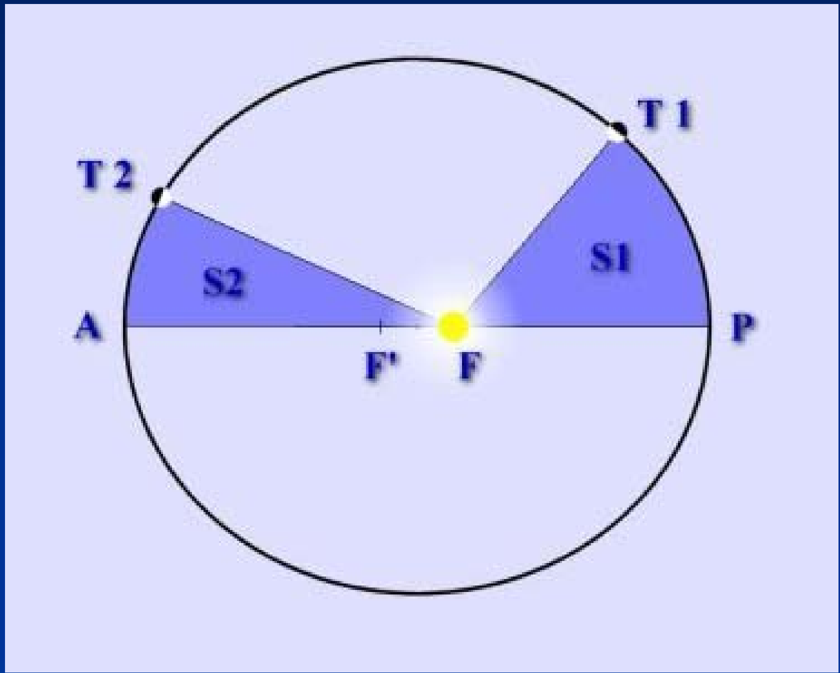


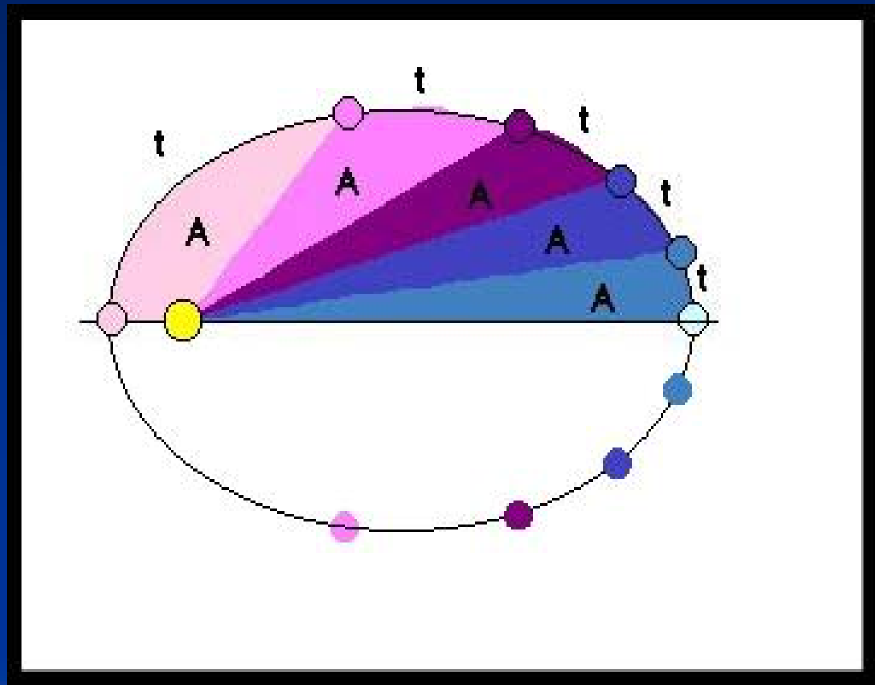


Pendant les temps égaux une planète parcourt les segments de son orbite elliptique balayant les aires égales.

Confirmation de la seconde Loi de Kepler: une étoile double dans la constellation du Sagittaire

Représentations géométriques de la seconde loi de Kepler





Pendant les temps égaux une planète parcourt les segments de son orbite elliptique balayant les aires égales. Les vitesses Angulaires des planètes sont bien évidemment différentes.

La troisième loi de Kepler

Pour toutes les orbites planétaires le rapport du carré des périodes de révolution (p) au cube du demi-grand-axe de l'orbite (a) est constant:

$$\frac{a^3}{p^2} = K$$

On peut exprimer a en Unités Astronomiques (en abrégé UA, 1 UA = 150 000 000 km) p en années; K est une constante.

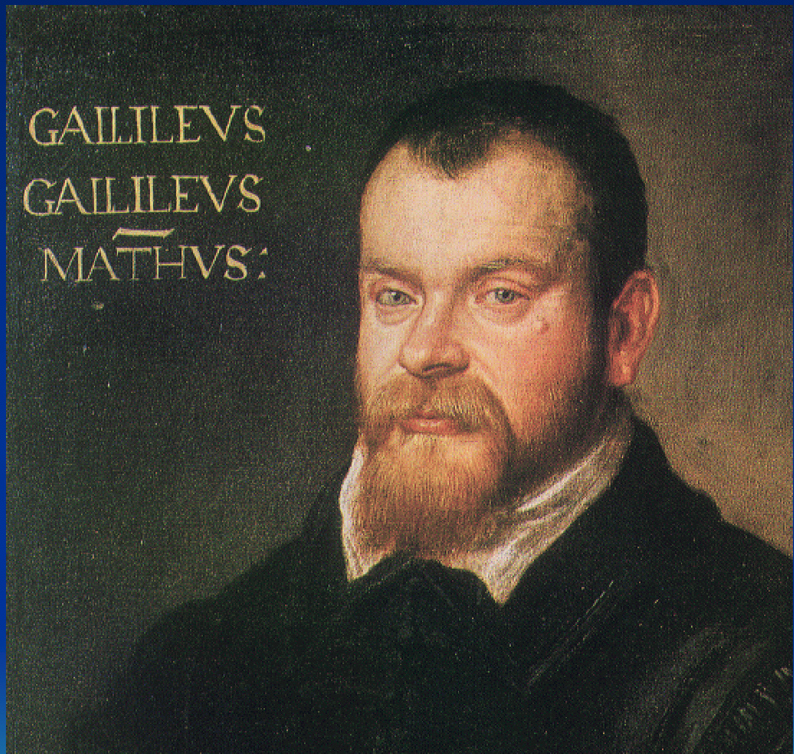
La troisième loi de KEPLER s'applique aussi, avec la même valeur de K, aux astéroïdes et aux comètes du système solaire.

$$\underset{\text{Terre}}{\frac{a_T^3}{p_T^2}} = \underset{\text{Vénus}}{\frac{a_V^3}{p_V^2}} = K$$

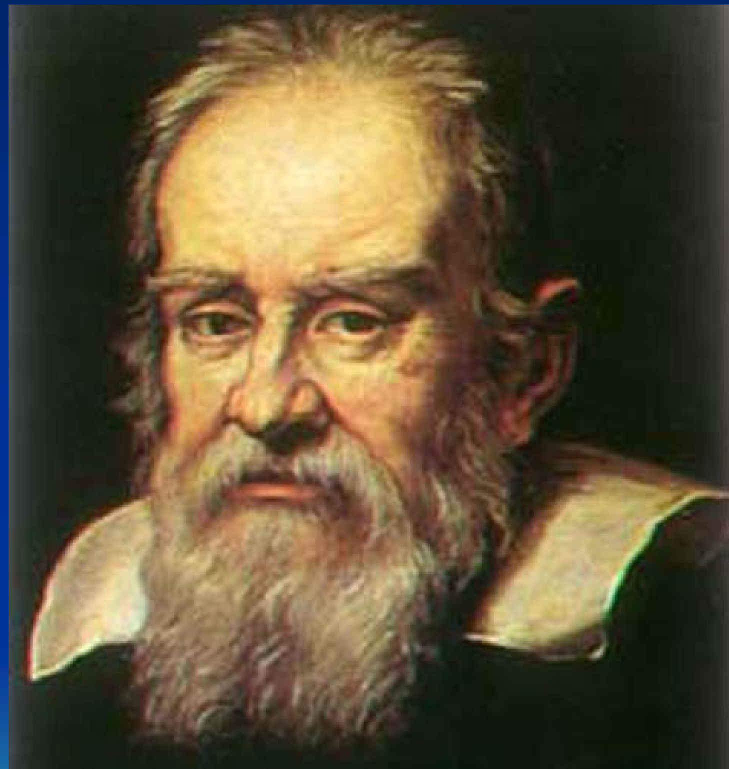
On peut l'appliquer à un ensemble de satellites orbitant autour d'une planète, comme Jupiter ou Saturne, entre autres, mais en redéfinissant la valeur de K pour chacun des systèmes.

Galileo Galilei

né à Pise en 1564, mort à Florence en 1642



Galileo Galilei jeune à Pise



Galilei vers la fin de sa vie

Le télescope de Galilée et ses découvertes astronomiques

Le télescope

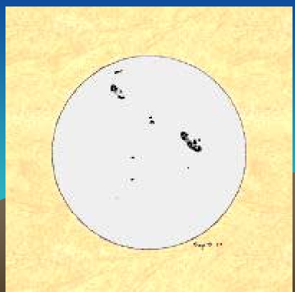
SIDEREVS
NVNCIVS
MAGNA, LONGEQVE ADMIRABILIA
GALILEO GALILEO
PATRITIO FLORENTINO
PERSPICILLI
QVATVOR PLANETIS
MEDICEA SIDERA
NVNCVPANDOS DECREVIT.
VENETIIS, Apud Thomam Baglionum. M DC X.

Le livre « Messager des étoiles »

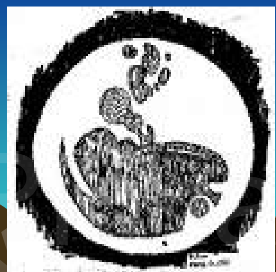
Une page du « Messager »

Les dessins originaux de Galilée

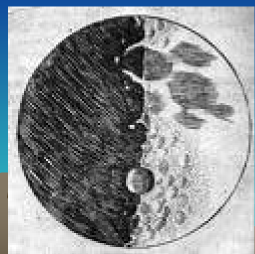
Tâches solaires



Mars

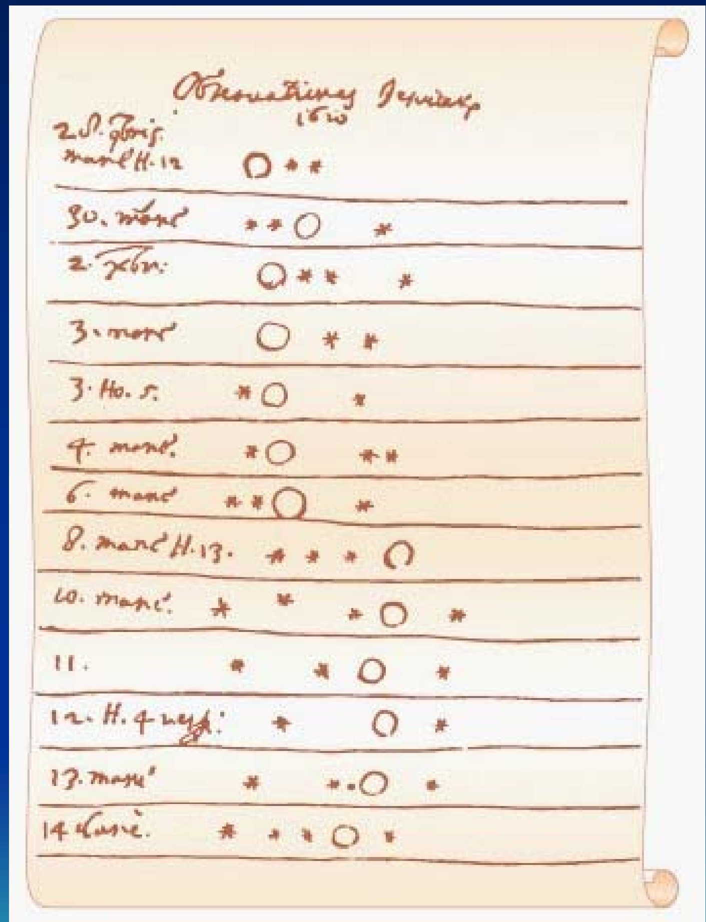


La Lune et ses cratères

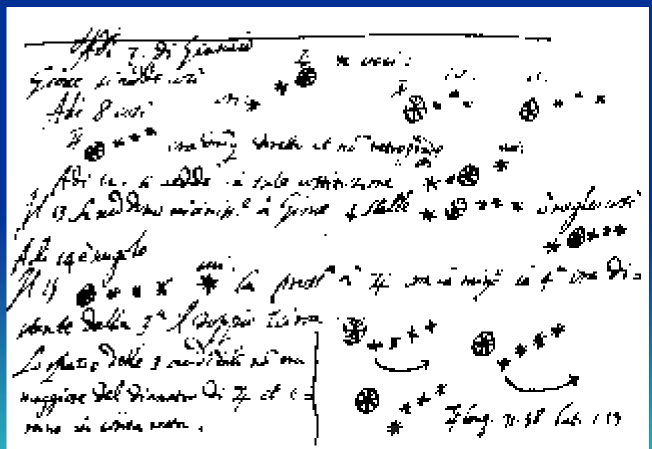


La découverte des satellites de Jupiter par Galilée

**Jupiter et ses satellites
tels que Galilée pouvait les observer
à travers son premier télescope**



**Les observations systématiques
Des éclipses effectuées plus tard**



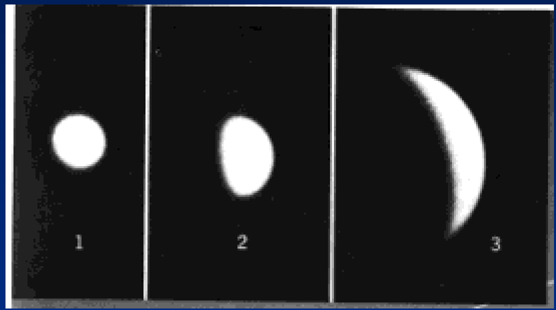
**Premiers dessins des satellites
de Jupiter faits par Galilée**

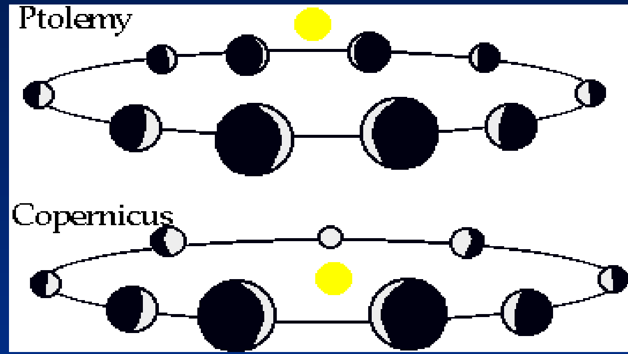
Jupiter et ses quatre satellites Galiléens (l’échelle n’est pas respectée, les satellites sont beaucoup plus petits en réalité)

Ganymède **Callisto**

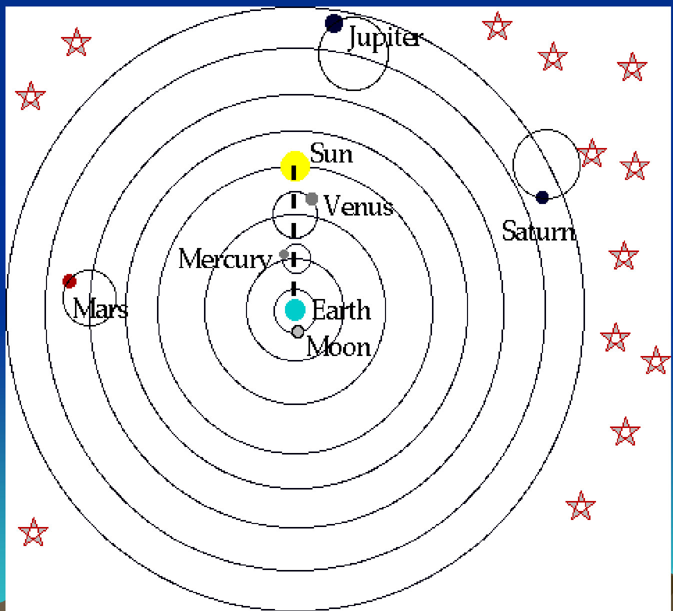
Io **Europa**

Observation des phases de Venus par Galilée, confirmant bien le système de Copernic.

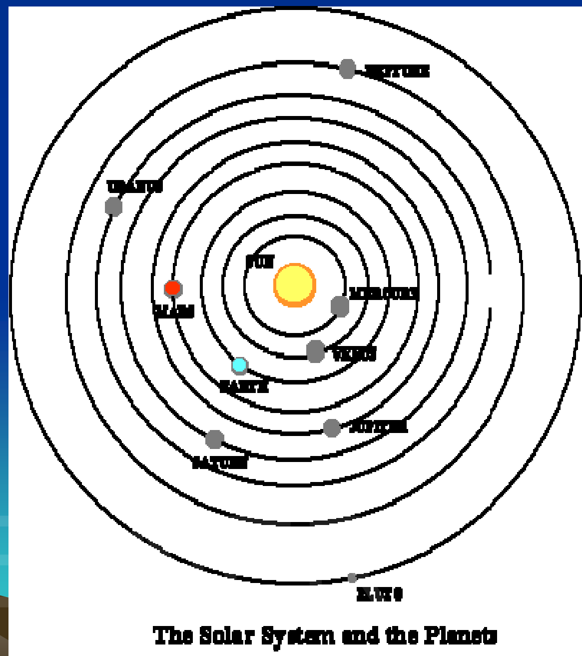




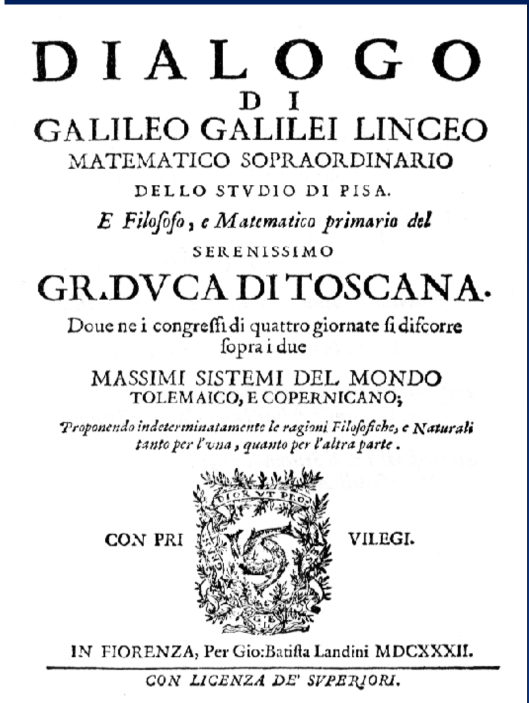
Le système Ptoléméen



Le système Copernicien



Le procès de Galilée

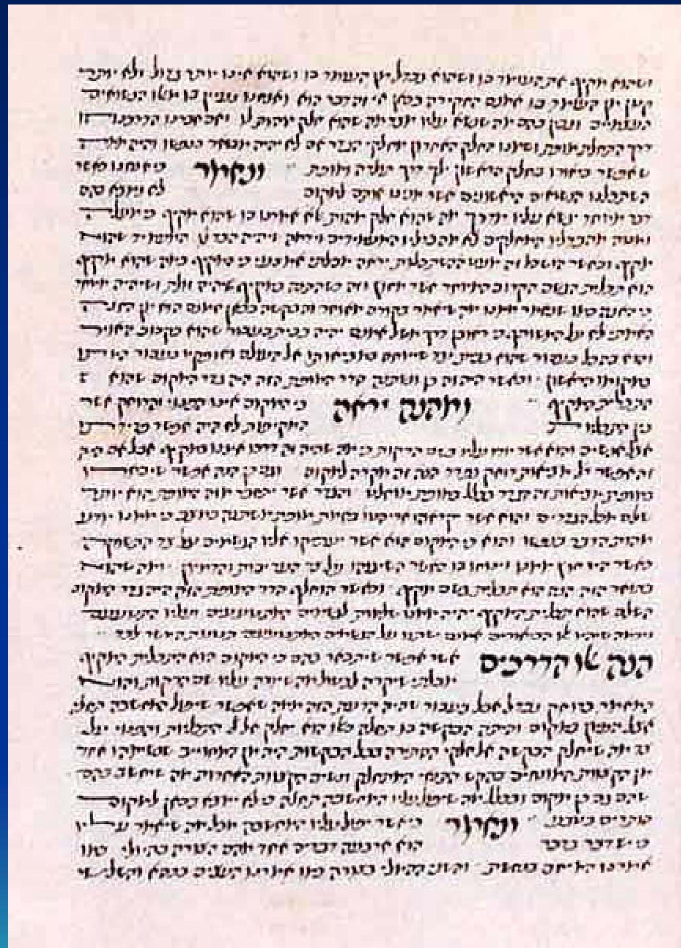

DIALOGO
DI
GALILEO GALILEI LINCEO
MATEMATICO SOPRAORDINARIO
DELLO STVDIO DI PISA.
E Filosofo, e Matematico primario del
SERENISSIMO
GR. DVCA DI TOSCANA.
Doue ne i congressi di quattro giornate si discorre
sopra i due
MASSIMI SISTEMI DEL MONDO
TOLEMAICO, E COPERNICANO;
Proponendo indeterminatamente le ragioni Filosofiche, e Naturali
tanto per l'una, quanto per l'altra parte.
CON PRI VILEGI.
IN FIORENZA, Per Gio:Batista Landini MDCXXXII.
CON LICENZA DE' SVPERIORI.

Le livre « Dialogue sur les systèmes du Monde » qui A fortement déplu au Pape Urbain VIII

Galilée devant le tribunal d'Inquisition. Menacé de mort , il se rétracte, mais la légende lui attribue la phrase « Eppur si muove ! » - « Et pourtant, elle bouge! » (probablement jamais prononcée)

Aristote et son influence prépondérante.

Aristote (Louvre, Paris)



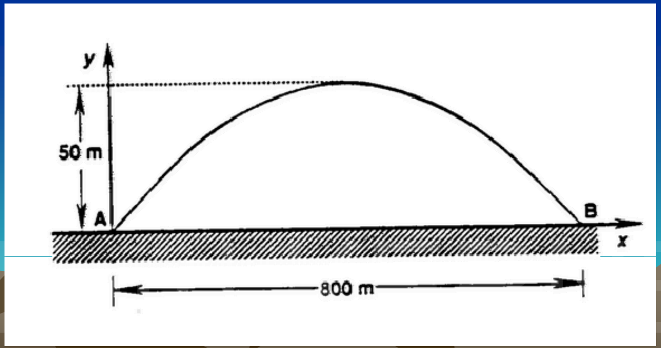
Traduction hébraïque de la « Physique »
D'Aristote. Espagne, XIII-ème siècle

Le physique d’Aristote

Dans la nature il n’existe que deux types de mouvement: mouvement rectiligne et mouvement circulaire. Dans le ciel il n’y a que des mouvements circulaires.

La loi d’attraction universelle: les choses semblables s’attires les unes vers les autres, les choses dissemblables se repoussent mutuellement.
Les objets matériels sont composés de 4 éléments, en proportions diverses: Le feu, l’air, l’eau et la terre. Les métaux lourds contiennent beaucoup d’élément « terrestre »; c’est pourquoi on les trouve dans les profondeurs. L’eau va vers l’eau, l’air vers l’air et le feu vers le feu (là-haut!)

La loi de la chute des corps: la trajectoire est composée de segments rectilignes et de segments circulaires.

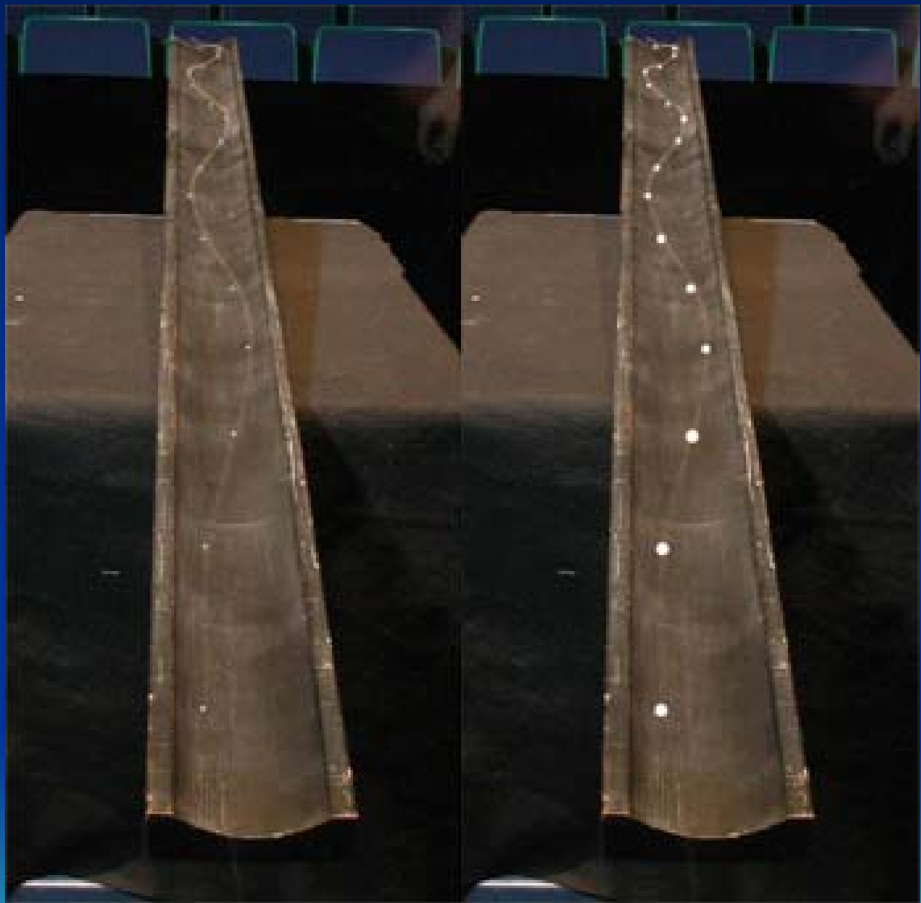


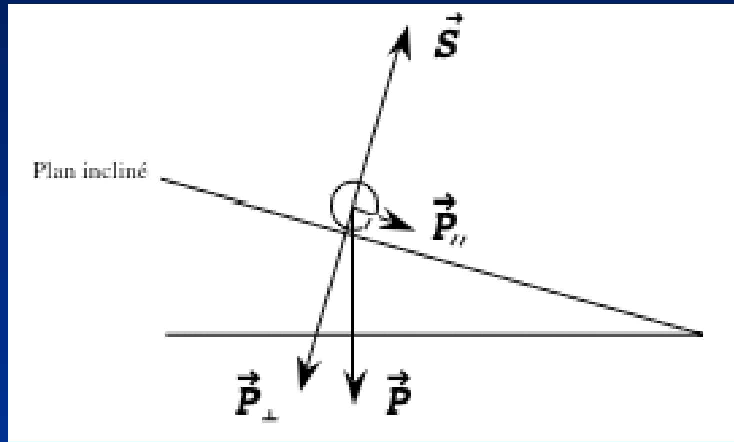
Les expériences mécaniques de Galilée…

La tour de Pise à partir de laquelle Galilée lançait des cailloux pour comparer leur Temps de chute libre.

Le plan incliné de Galilée pour observer la chute libre au ralenti (au Musée de Florence).

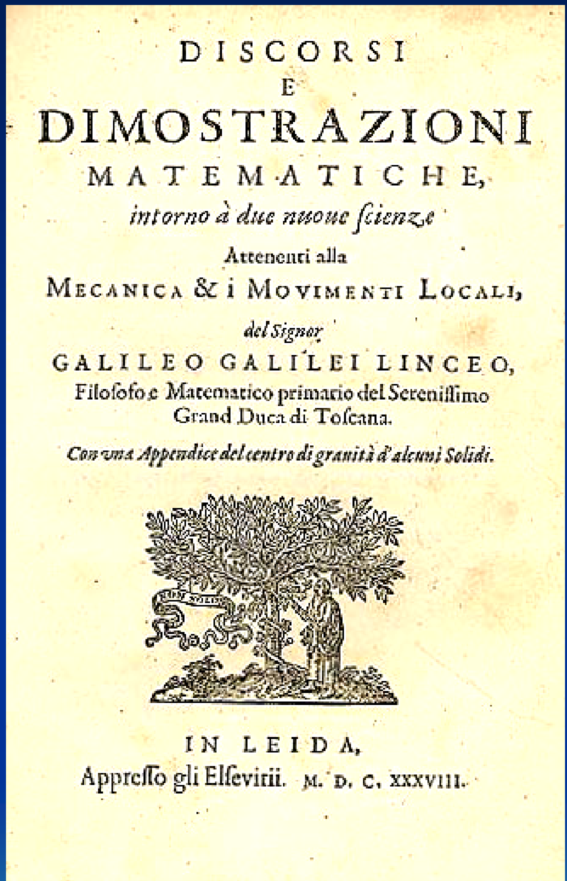
Les plans inclinés pour mesurer le temps de chute ralentie des billes.





Un plan incliné décompose la force de la pesanteur verticale **P** en deux parties, **P**$_{\parallel}$ (parallèle) et **P**$_{\perp}$ (perpendiculaire). C'est la partie parallèle uniquement qui agit en provoquant le mouvement de la bille. Elle peut être réduite à volonté.

…et ses conclusions:


DISCORSI
E
DIMOSTRAZIONI
MATEMATICHE,
intorno à due nuoue ſcienze
Attenenti alla
MECANICA & i MOVIMENTI LOCALI,
del Signor
GALILEO GALILEI LINCEO,
Filoſofo e Matematico primario del Sereniſſimo
Grand Duca di Toſcana.
Con una Appendice del centro di grauità d'alcuni Solidi.

IN LEIDA,
Appreſſo gli Elſevirii. M. D. C. XXXVIII.

La page de garde du livre publié par Galilée en 1638, où il décrit les lois de mouvement des corps massifs.

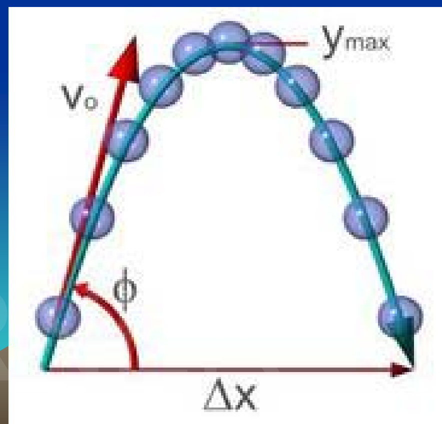
La loi du mouvement uniforme:

$$e = v\,t$$

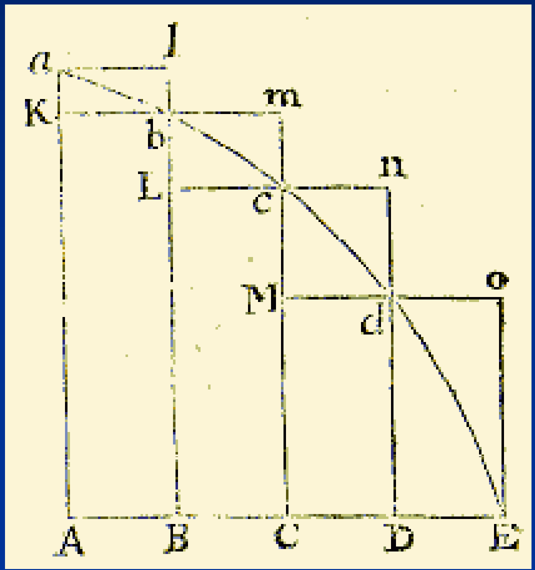
La loi de la chute des corps:

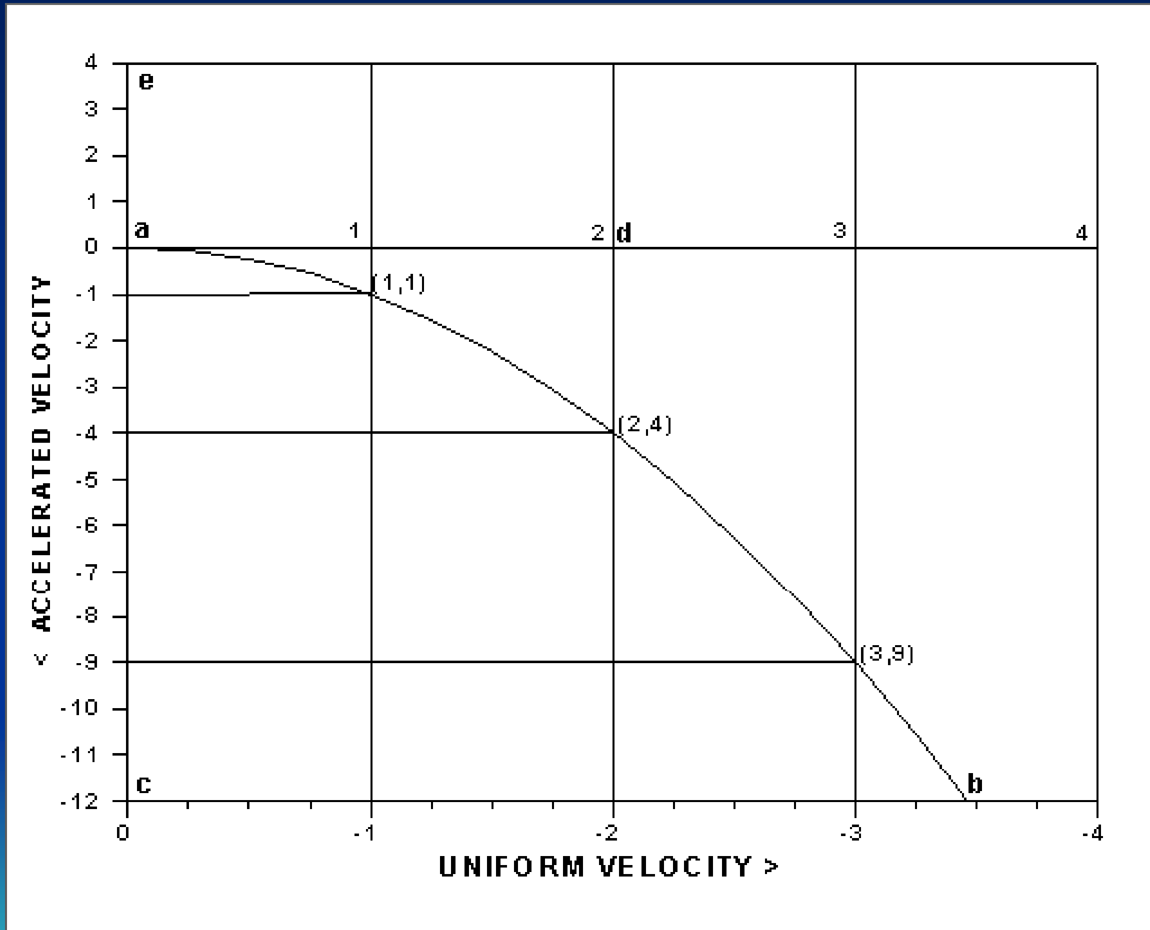
$$e = \frac{1}{2} g\, t^2$$

La combinaison de ces deux lois conduit à des trajectoires paraboliques:



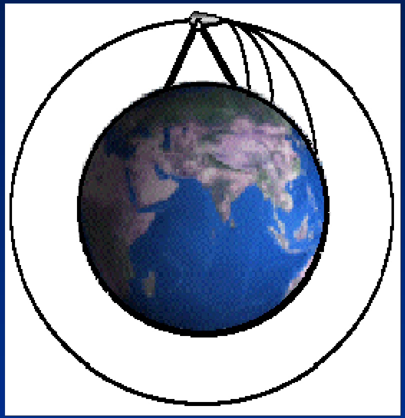
La trajectoire de la chute libre est une parabole



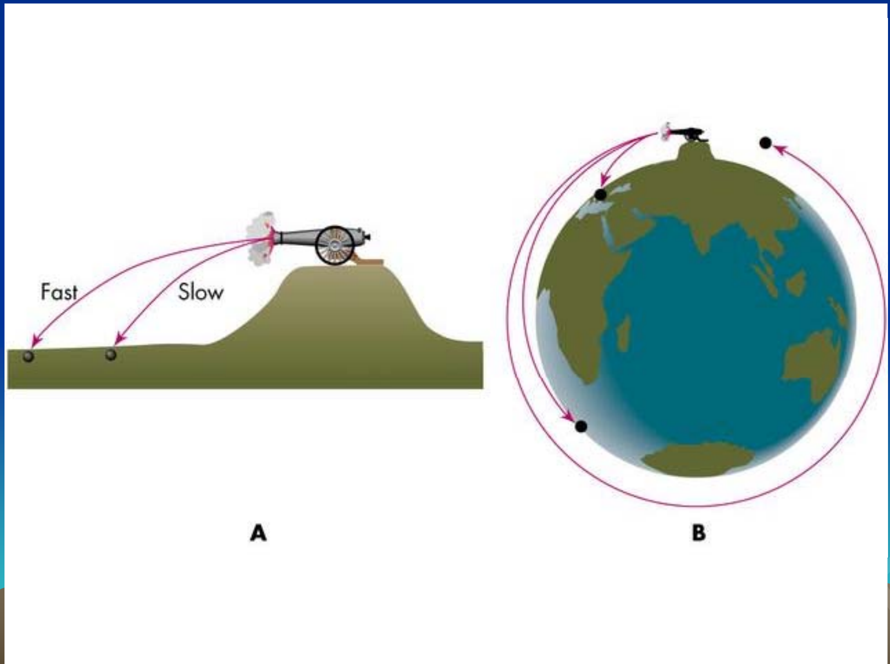


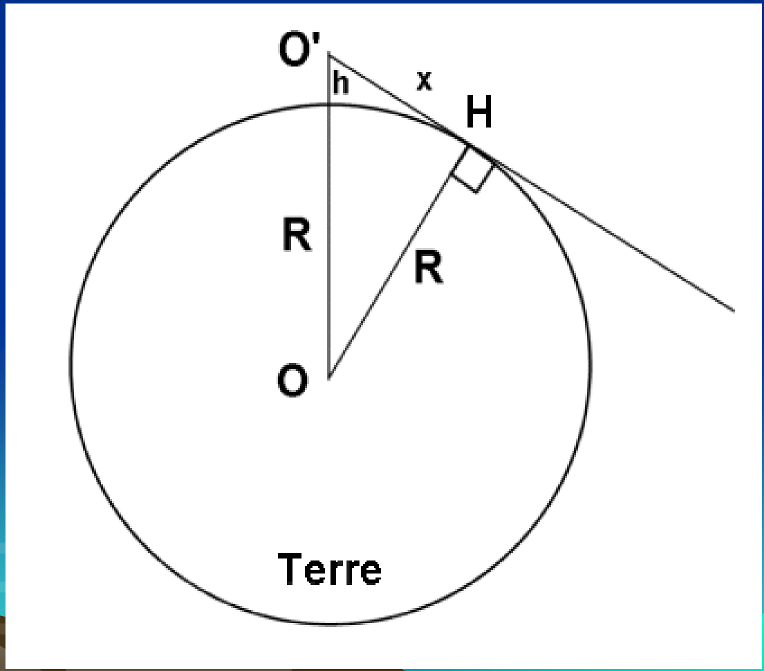
Galilée a été le premier à imaginer la satellisation d'un objet.

Il a pu déterminer la première vitesse cosmique: 7.9 km/sec.

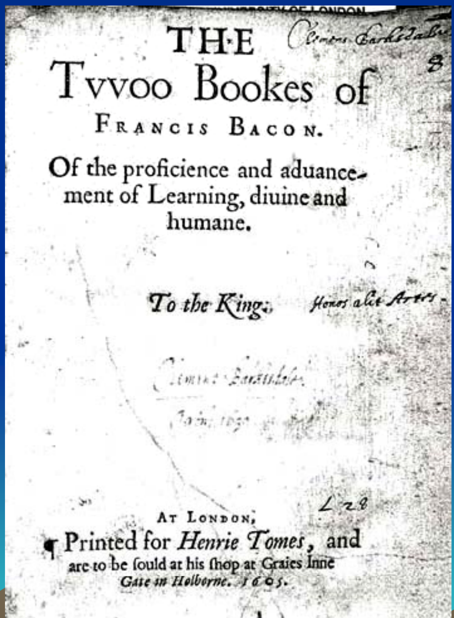


Le temps de la traversée d'une distance x avec la vitesse constante V est égal à ($t=x/V$). Pendant ce temps l'objet perd en hauteur $h=gt^2/2$. En comparant Ces deux expressions, on trouve la valeur de V.





Francis Bacon, Baruch Spinoza et René Descartes: La naissance de la méthode scientifique moderne.

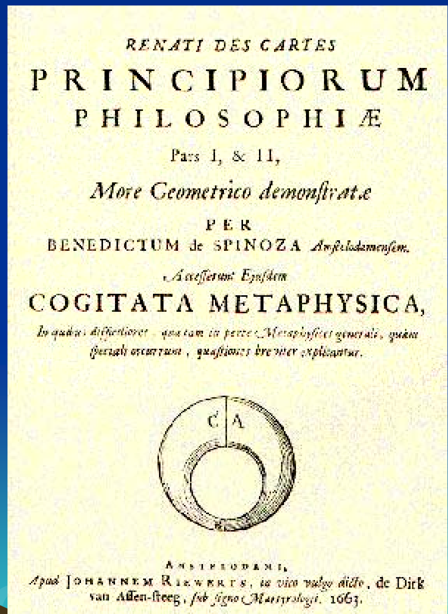


THE
Tvvoo Bookes of
FRANCIS BACON.

Of the proficience and aduancement of Learning, diuine and humane.

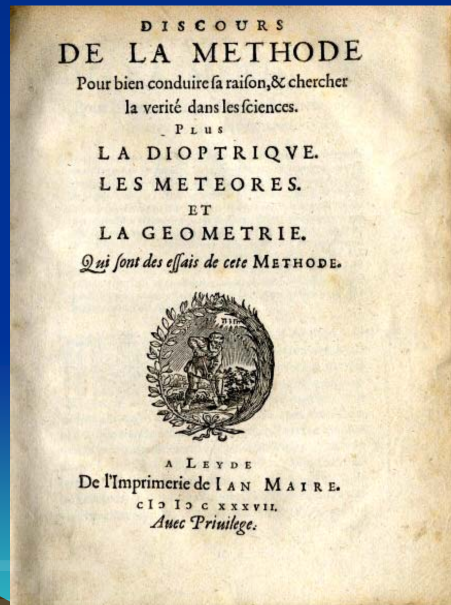
To the King.

AT LONDON,
Printed for Henrie Tomes, and are to be ſould at his ſhop at Graies Inne Gate in Holborne. 1605.



RENATI DES CARTES
PRINCIPIORUM
PHILOSOPHIÆ
Pars I, & II,
More Geometrico demonſtratæ
PER
BENEDICTUM de SPINOZA Amſtelodamenſem.
Acceſſerunt Ejuſdem
COGITATA METAPHYSICA,
In quibus difficiliores, quæ tam in parte Metaphyſices generali, quam ſpeciali occurrunt, quæſtiones breviter explicantur.

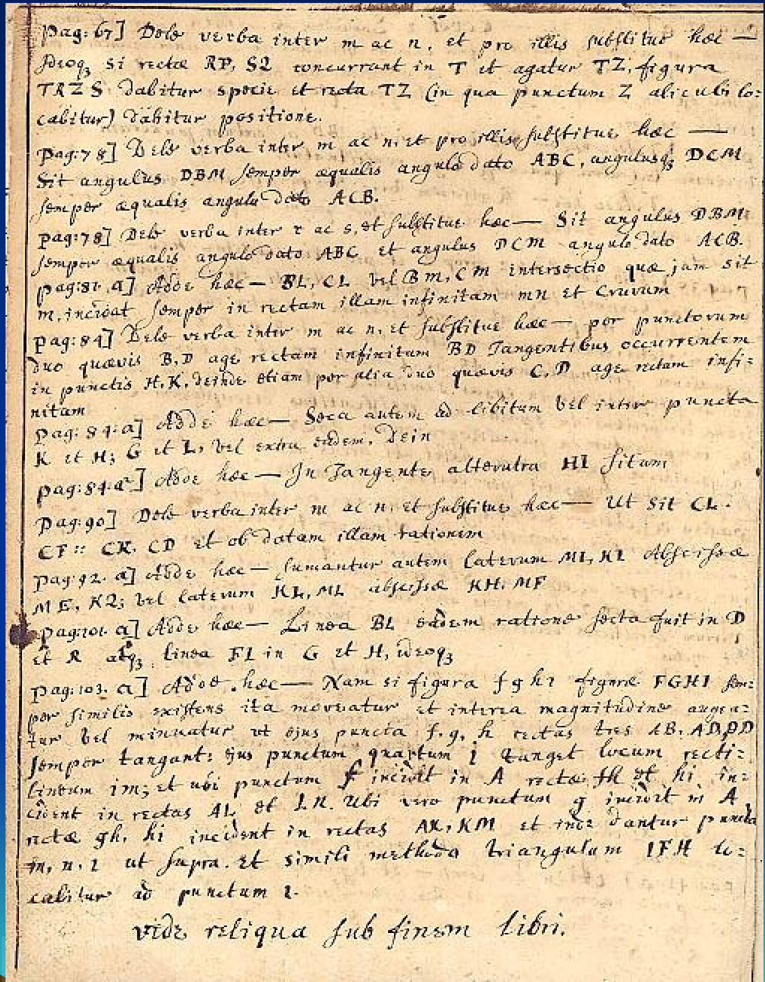
AMSTELODAMI,
Apud JOHANNEM RIEWERTS, in vico vulgo dicto, de Dirk van Aſſen-ſteeg, ſub ſigno Martyrologii. 1663.



DISCOURS
DE LA METHODE
Pour bien conduire ſa raiſon, & chercher la verité dans les ſciences.
PLUS
LA DIOPTRIQVE.
LES METEORES.
ET
LA GEOMETRIE.
Qui ſont des eſſais de cete METHODE.

A LEYDE
De l'Imprimerie de IAN MAIRE.
CIↃ IↃ C XXXVII.
Auec Priuilege.

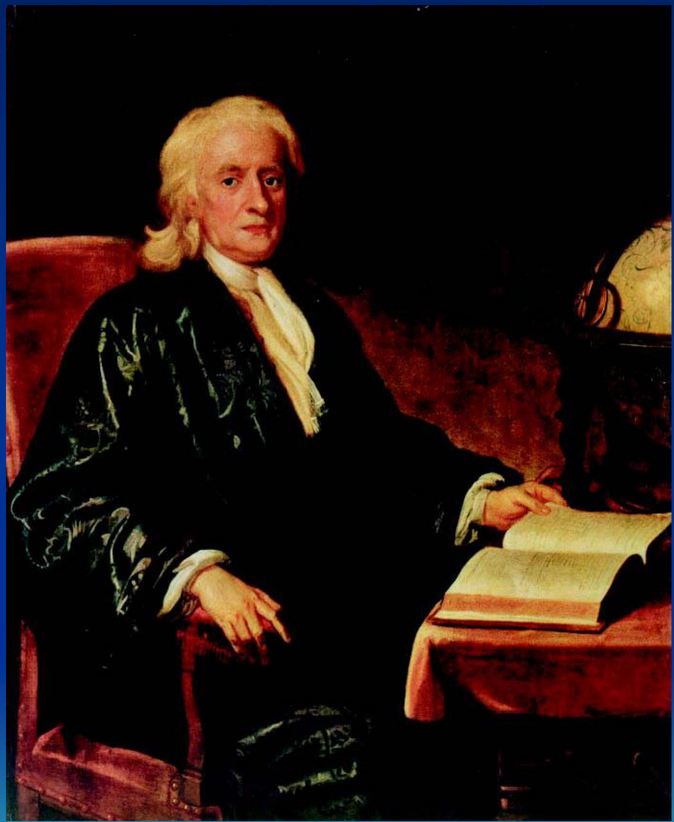
Isaac Newton et une page de son manuscrit

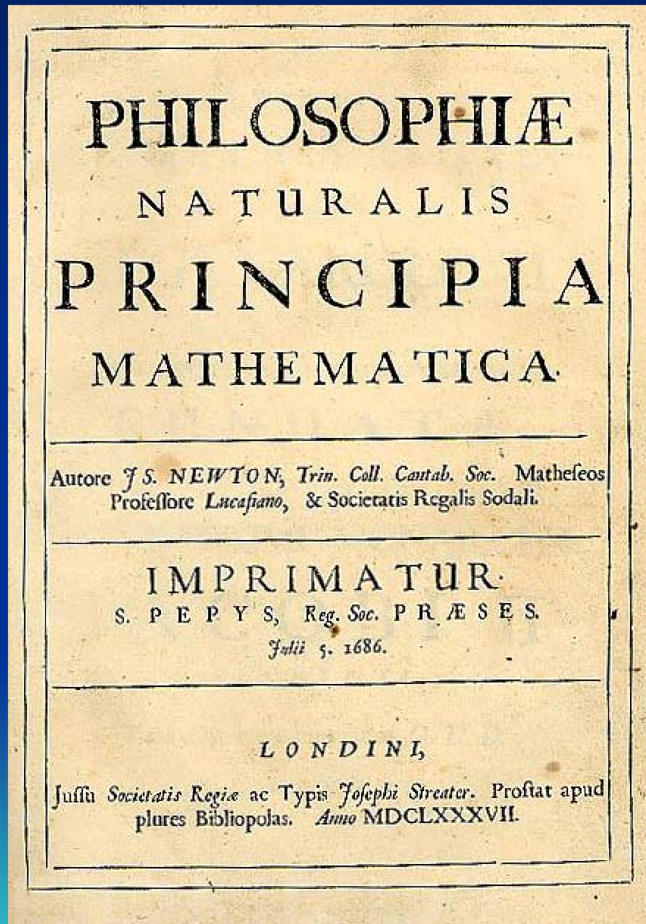


pag:67] Dele verba inter m ac n, et pro illis substitue hæc —
Deniq; si rectæ RP, SQ concurrant in T et agatur TZ, figura
TRZS dabitur specie et recta TZ (in qua punctum Z alicubi lo=
cabitur) dabitur positione.
pag:78] Dele verba inter m ac n, et pro illis substitue hæc —
Sit angulus DBM semper æqualis angulo dato ABC, angulusq; DCM
semper æqualis angulo dato ACB.
pag:78] Dele verba inter r ac s, et substitue hæc — Sit angulus DBM
semper æqualis angulo dato ABC et angulus DCM angulo dato ACB.
pag:81. a] Adde hæc — BL, CL vel BM, CM intersectio quæ jam sit
m, incidat semper in rectam illam infinitam mn et e contra
pag:84] Dele verba inter m ac n, et substitue hæc — per punctorum
duo quævis B, D age rectam infinitam BD Tangentibus occurrentem
in punctis H, K, deinde etiam per alia duo quævis C, D age rectam infi=
nitam
pag: 84. a] Adde hæc — Loca autem ad libitum vel inter puncta
K et H; G et L, vel extra eadem, dein
pag:84. a²] Adde hæc — In Tangente alterutra HI situm
pag:90] Dele verba inter m ac n, et substitue hæc — Ut sit CL.
CF :: CK. CD et ob datam illam rationem
pag:92. a] Adde hæc — sumantur autem laterum ML, KL abscissæ
ME, KQ; vel laterum KL, ML abscissæ KH, MF
pag:101. a] Adde hæc — Linea BL eadem ratione secta fuit in D
et R atq; linea FL in G et H, ideoq;
pag:103. a] Adde. hæc — Nam si figura fghi figuræ FGHI sem=
per similis existens ita moveatur et interea magnitudine augea=
tur vel minuatur ut ejus puncta f, g, h rectas tres AB, AD, DD
semper tangant: ejus punctum quartum i tanget locum recti=
lineum im; et ubi punctum f incidit in A rectæ fh et hi in=
cidunt in rectas AL et LK. Ubi vero punctum g incidit in A
rectæ gh, hi incidunt in rectas AK, KM et inde dantur puncta
m, n, l ut supra. et simili methodo triangulum IFH lo=
cabitur ad punctum l.

vide reliqua sub finem libri.

Newton et la première édition de ses « Principia mathematica »





PHILOSOPHIÆ

NATURALIS

PRINCIPIA

MATHEMATICA.

Autore J S. NEWTON, *Trin. Coll. Cantab. Soc.* Matheseos Professore *Lucasiano*, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.

S. PEPYS, *Reg. Soc.* PRÆSES.

Julii 5. 1686.

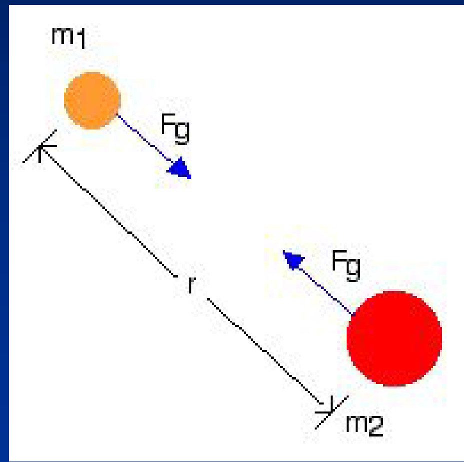
LONDINI,

Jussu *Societatis Regiæ* ac Typis *Josephi Streater.* Prostat apud plures Bibliopolas. *Anno* MDCLXXXVII.

Les lois de la mécanique de Newton

$$F = ma$$

L’accélération est proportionnelle à la force agissant sur le corps. Le facteur multiplicatif Définit la masse inertielle du corps.



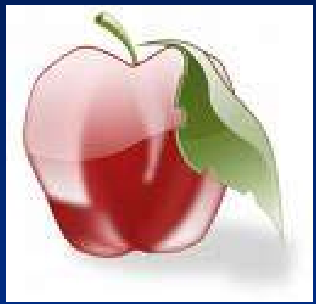
$$F = G\frac{mM}{D^2}$$

La force d’attraction gravitationnelle entre deux masses m et M est proportionnelle au produit mM et à l’inverse du carré de la distance qui les sépare. Le facteur G est La constante gravitationnelle de Newton.

$$F_g = G\,\frac{M\,m}{d^2}$$

$$G = 6.67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N\,m^2 / kg^2}$$

La théorie de la gravitation de Newton: la pomme et la Lune

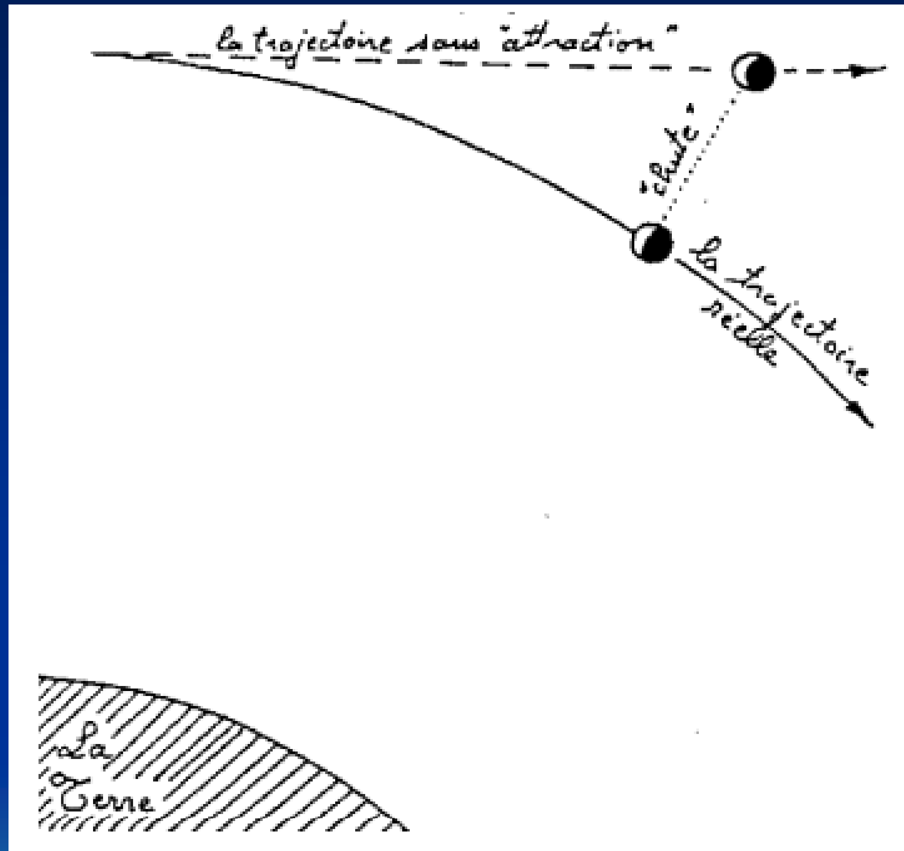


Trinity College (Cambridge) où travailla Newton

Le pont de Newton

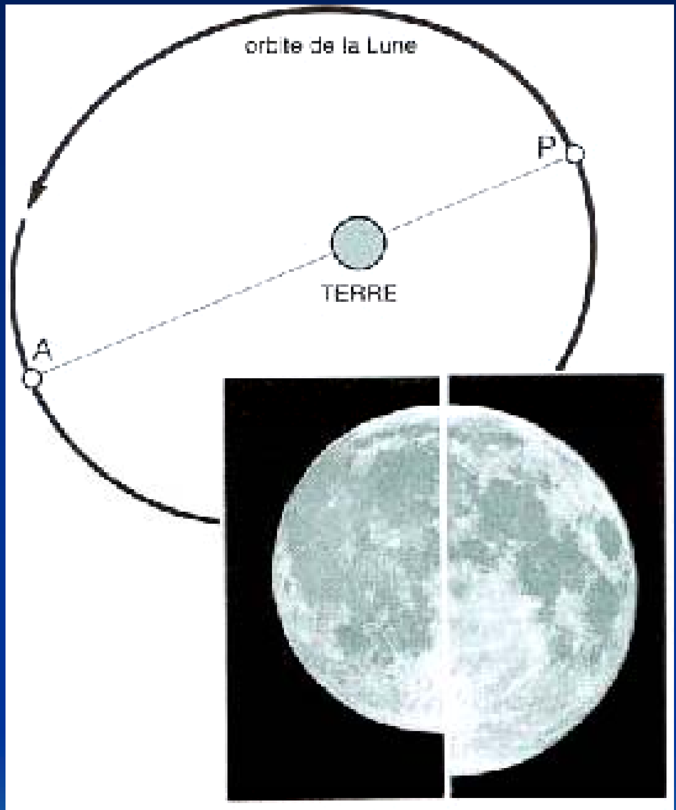
La cour intérieure avec le pommier

La théorie de la gravitation de Newton



La force qui fait tomber une pomme
et la force qui fait dévier la Lune
de sa trajectoire rectiligne sont toutes
les deux engendrées par l'action de
la gravitation terrestre. En comparant
l'accélération au niveau de la Lune à
celle qui agit sur un objet à la surface
de la Terre, on peut retrouver la loi
de Kepler reliant les deux quantités.

L'orbite de la Lune

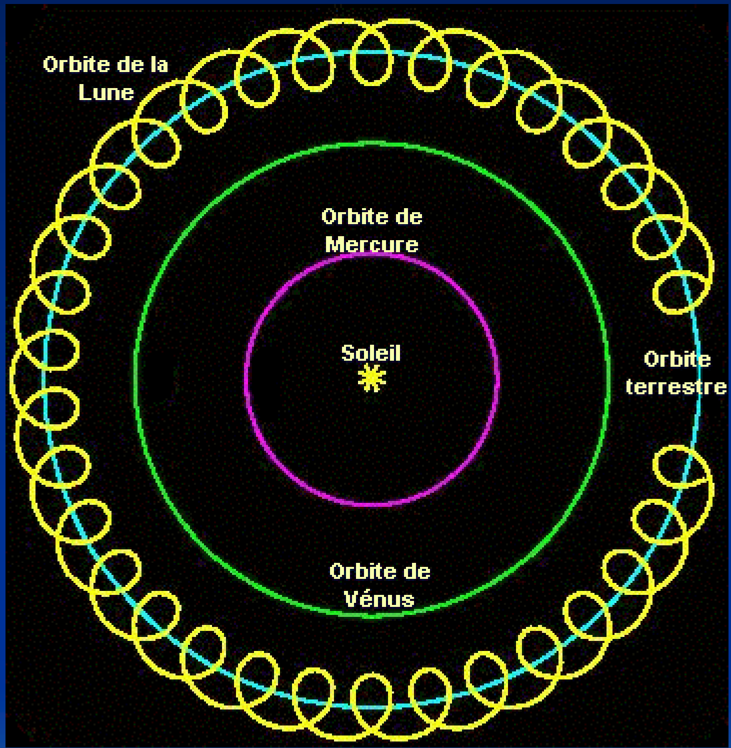


En réalité, l'orbite de la Lune est elliptique. Sur le dessin de gauche, l'excentricité est fortement exagérée. Mais en mesurant la grandeur apparente de la Lune on peut se rendre compte que sa distance de la Terre varie au cours d'un mois.

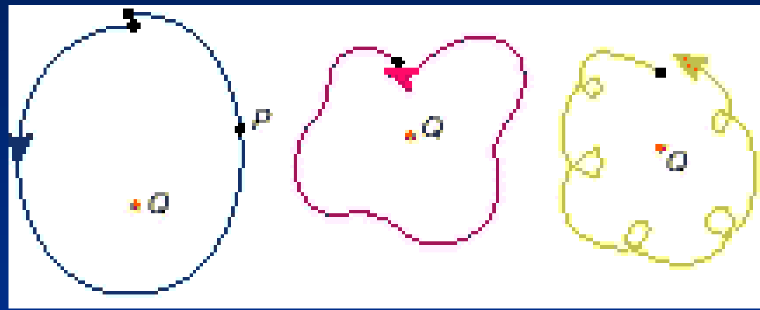
Lune à sa grandeur visible maximale:

Lune à sa grandeur visible minimale :

Gravitation: qui tire plus fort, le Soleil ou la Terre ?



Une fausse image de l'orbite de la Lune autour du Soleil – il n'y a pas autant de mois dans l'année !



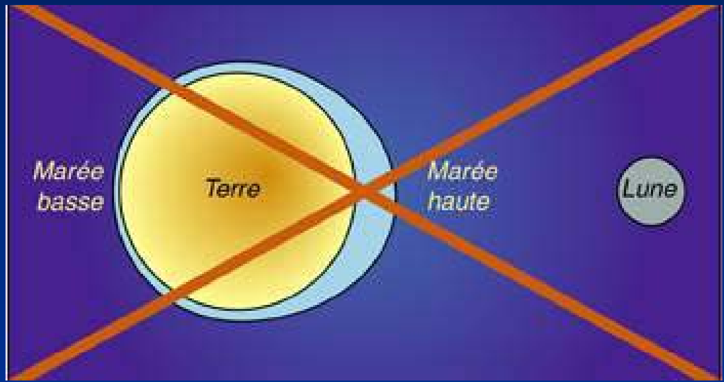
Une orbite peut être convexe partout , ou seulement par segments. On peut Prouver aisément que l'orbite de la Lune vue à partir des étoiles est tout Le temps convexe. Lea gravitation du Soleil est donc toujours plus forte que celle de la Terre.

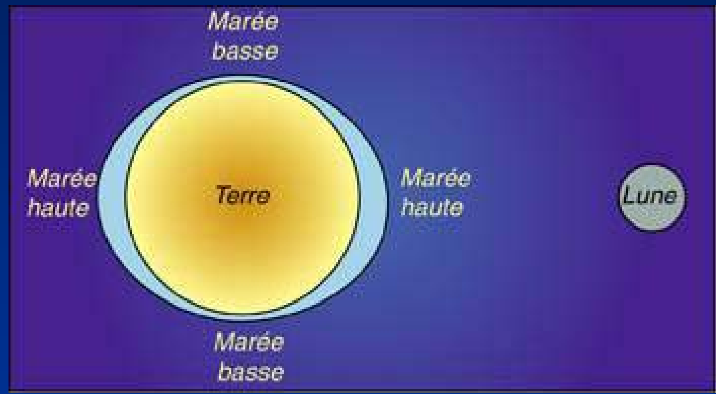
Les marées océaniques: une preuve de la théorie de Newton

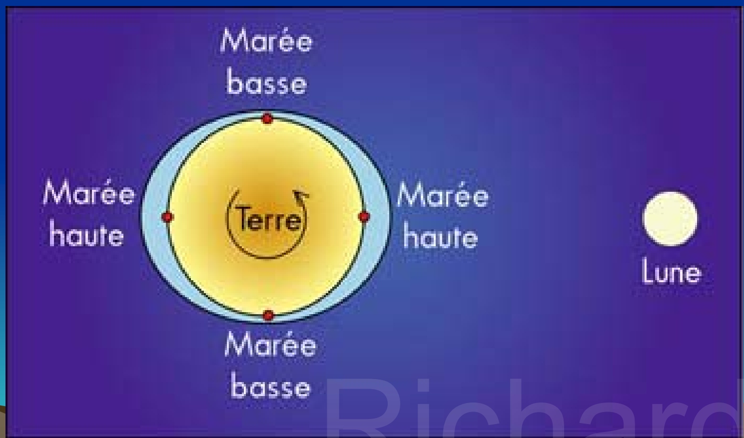
Marée haute et marée basse dans La Manche (Cornouailles)

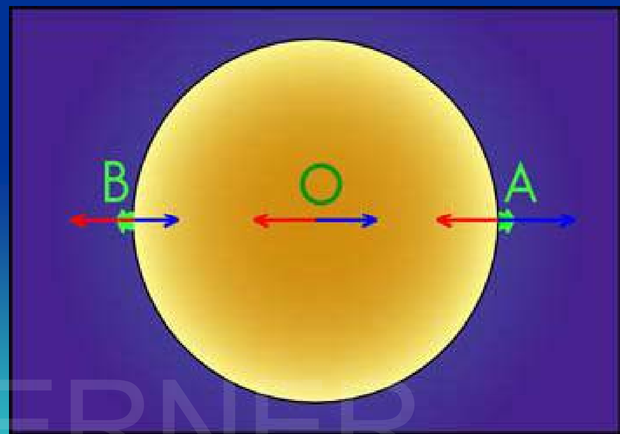
Marée haute et marée basse dans la baie de Fundy (Nouvelle Ecosse, au Canada)

L'origine des marées océaniques: l'influence gravitationnelle de la Lune

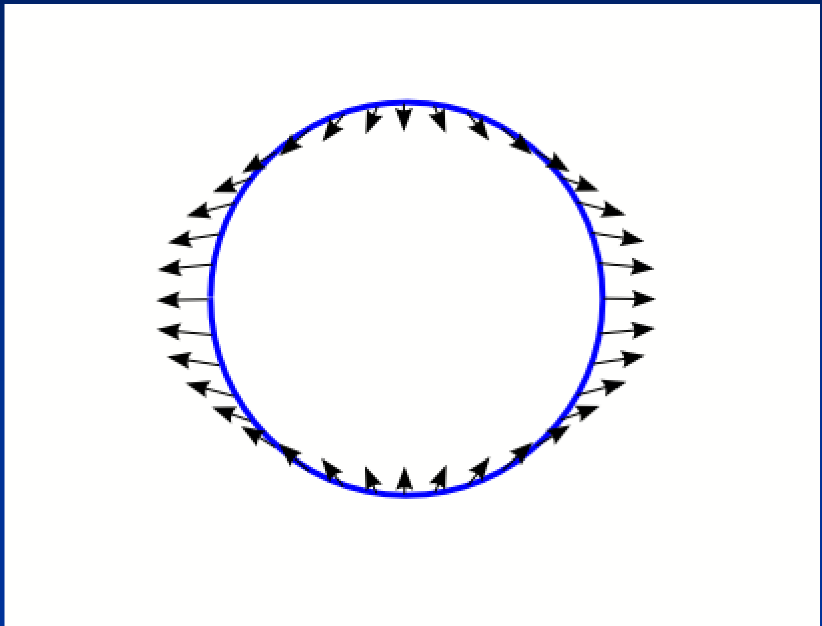






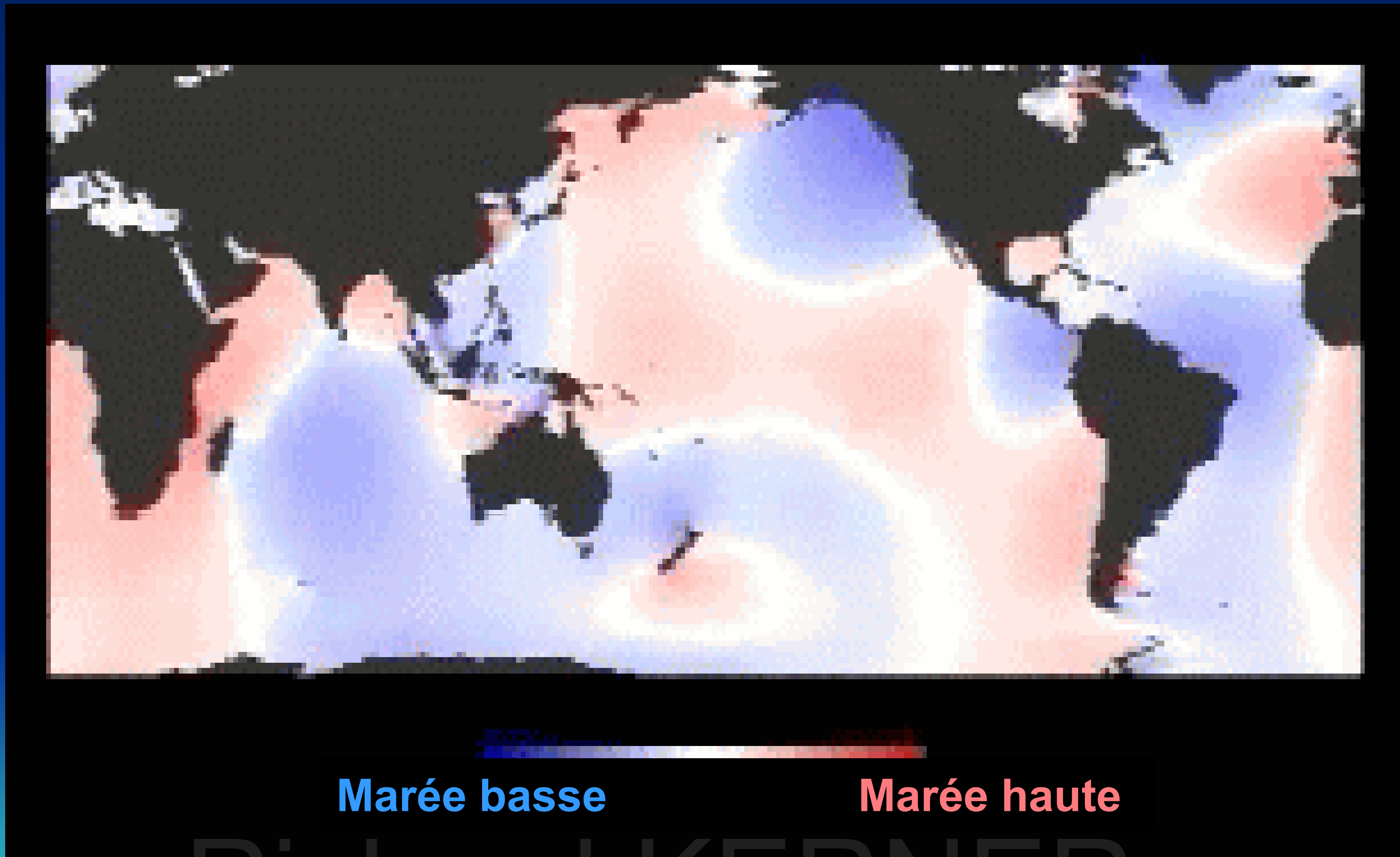


Les forces résultantes agissant sur une masse à la surface de la Terre

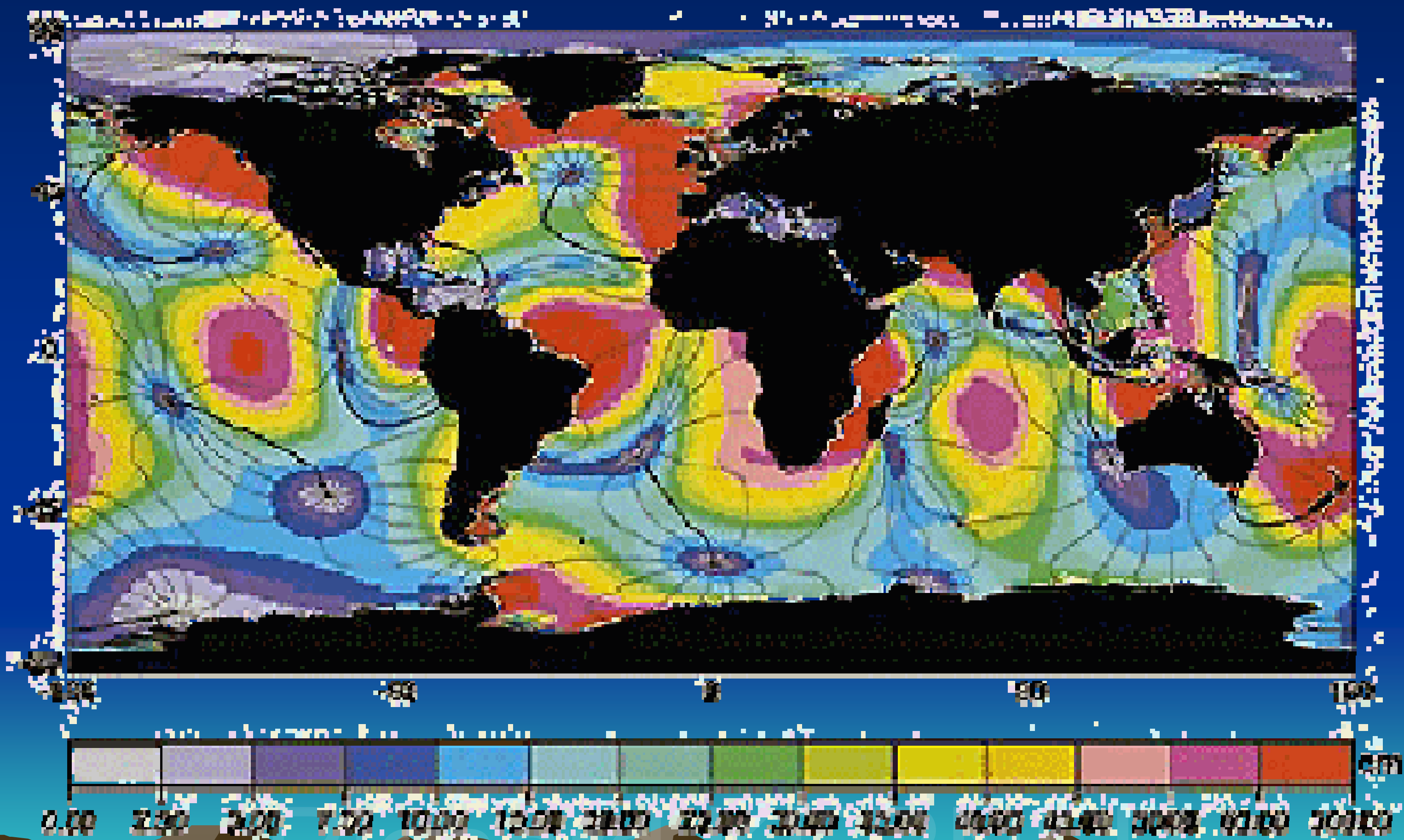


L'image des forces agissant sur
Les éléments d'eau à la surface
du globe Terrestre.

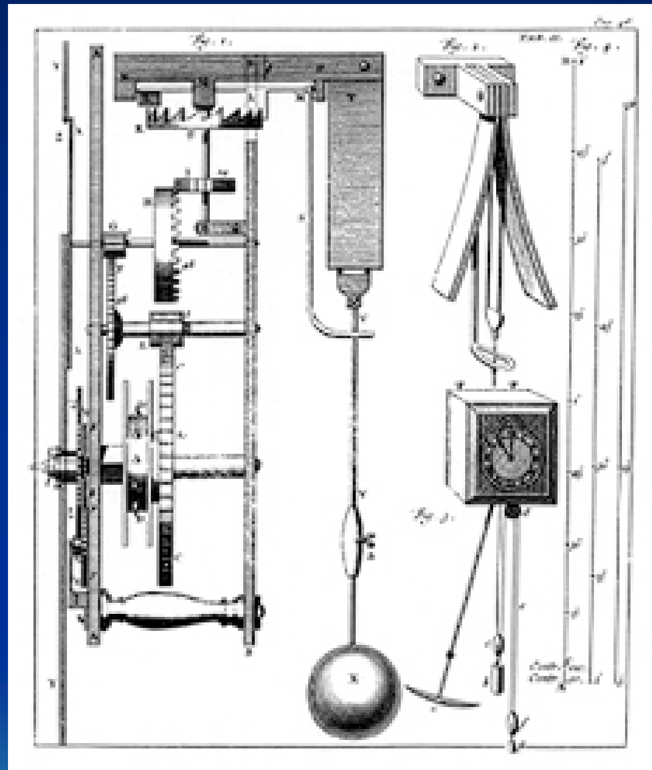
Les marées océaniques: situation à un instant donné.

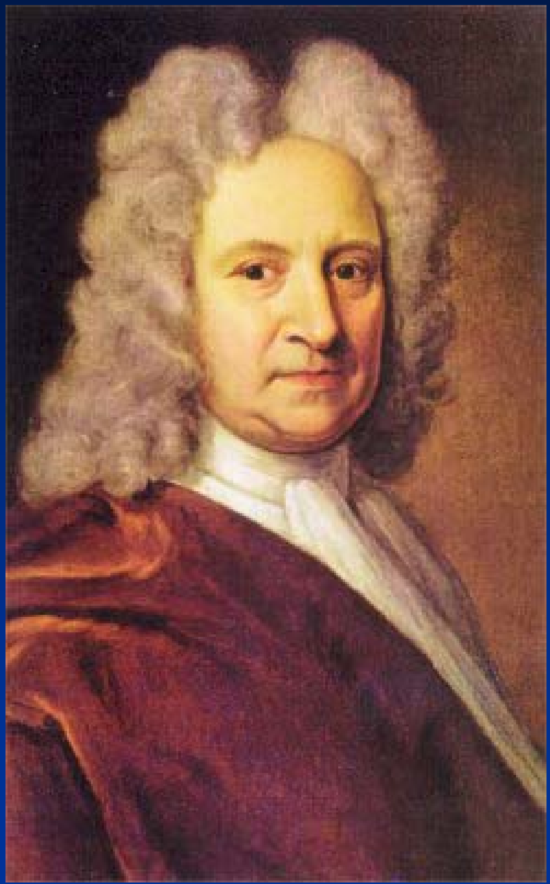


Les marées océaniques: amplitudes moyennes sur une année

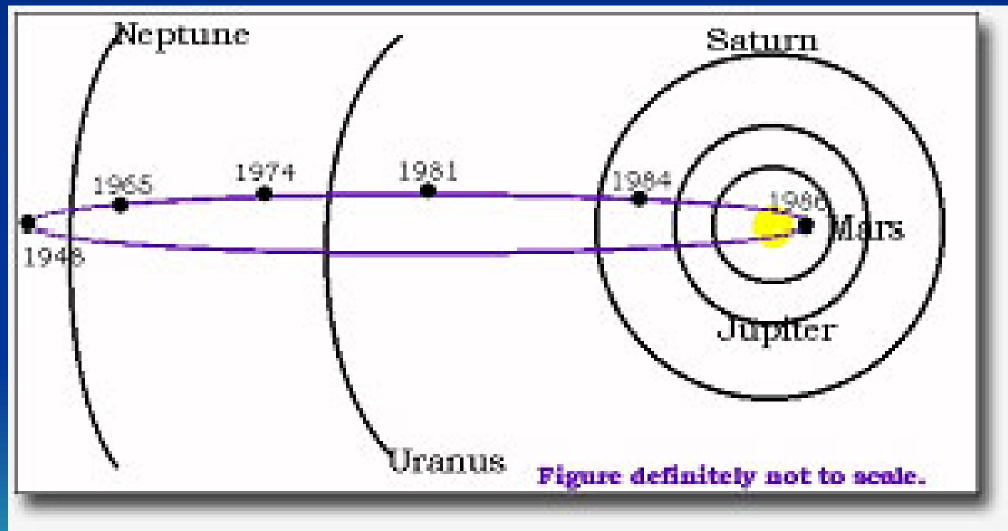


Christian Huygens et son chronomètre





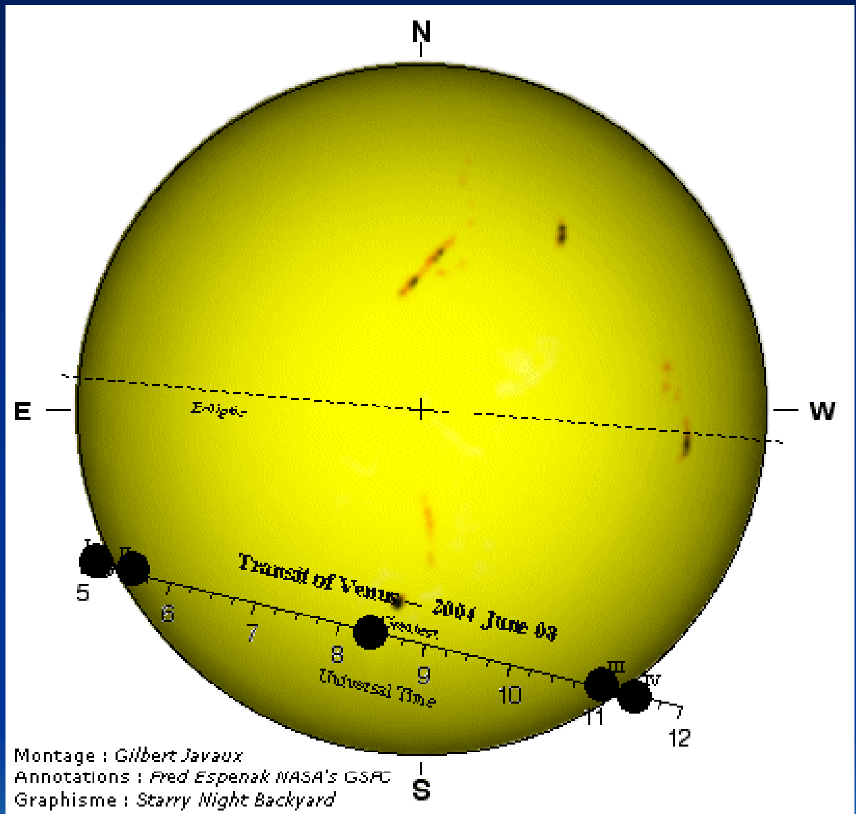
La comète d'Halley

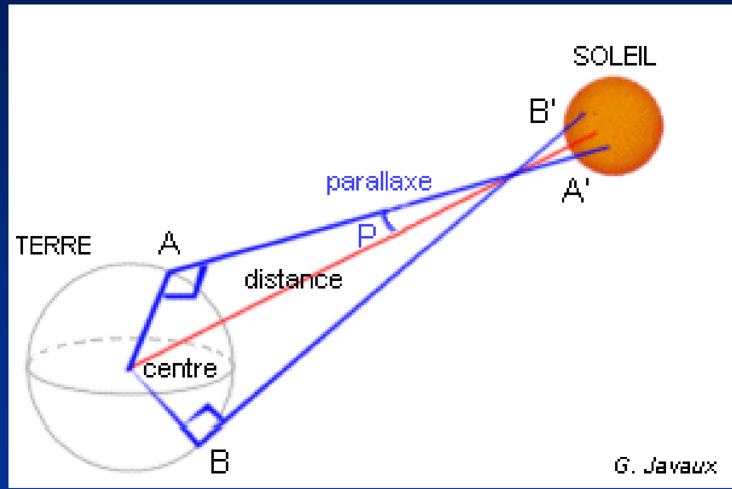


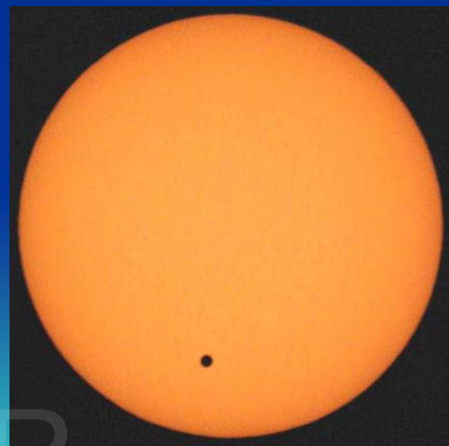
L'orbite elliptique de la comète d'Halley

Edmund Halley
a prévu le retour d'une comète après avoir calculé son orbite elliptique très allongée, en utilisant la théorie de Newton. La période de la comète d'Halley est de 76 ans.

Le transit de Vénus et la parallaxe solaire







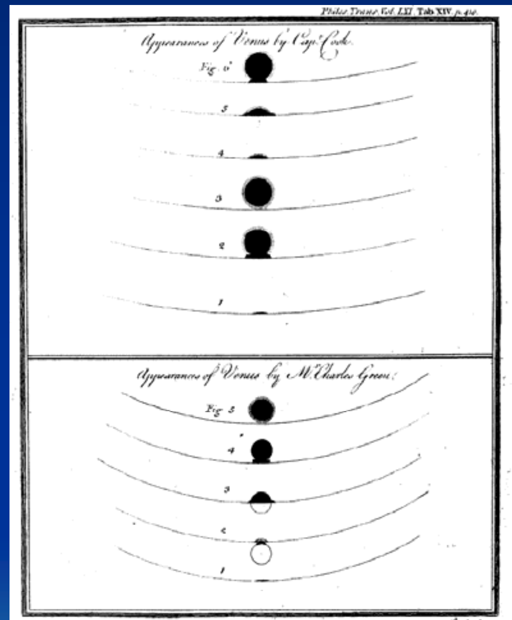
Le transit de Vénus observé à Paris le 8 juin 2004.
Le prochain transit de Vénus sera visible en Amérique en 2012; le suivant seulement en 2132 !

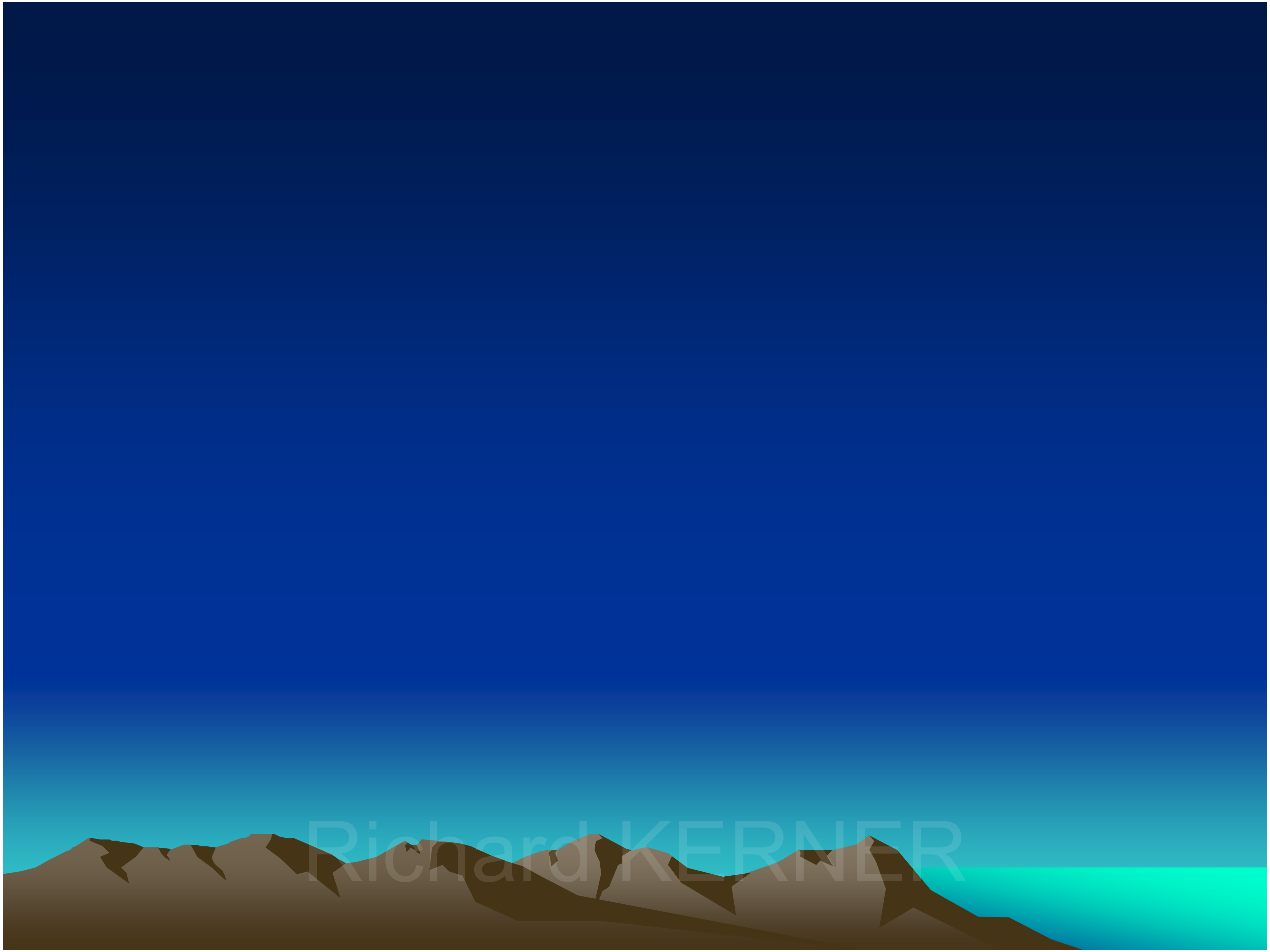
Le capitaine James Cook
et son bateau « Endeavour »

Le capitaine James Cook

Le bateau « Endeavour »
part vers Tahiti en 1769

En 1769 le transit de Vénus est visible à partir de l'Océan Pacifique. L'expédition de Cook a pour but l'observation précise du phénomène.




Richard KERNER