

La mesure des distances dans l'univers

École d'été « l'univers à la portée de tous »

23-26 août 2017

Comment mesurer le ciel? On ne mesure en fait que des angles.

Il faut mesurer les étoiles « fixes »: ce sont des références

Il faut mesurer les positions changeantes des planètes pour connaître leur mouvement

Le nom « planète » vient du grec
« πλανητης » (*planetès*) = astre errant

Saturne
Magnitude : 0.87
AD/DE : 10h32m15s/+11°10'28"
Az/Alt : +272°11'53"/+14°26'27"
Distance : 8.29537179UA



Cygne

Lyre

Hercule

Chiens de chasse

Petit Renard

Couronne boréale Bouvier

Chevelure de Bérénice

Lion

Flèche

Arcturus

Saturne

Dauphin

Petit Cheval

Aigle

Serpent

Vierge

Serpentaire

Écu de Sobieski

Pluton

Balance

Est

Mercure

Venus

Jupiter

Corbeau

Coupe

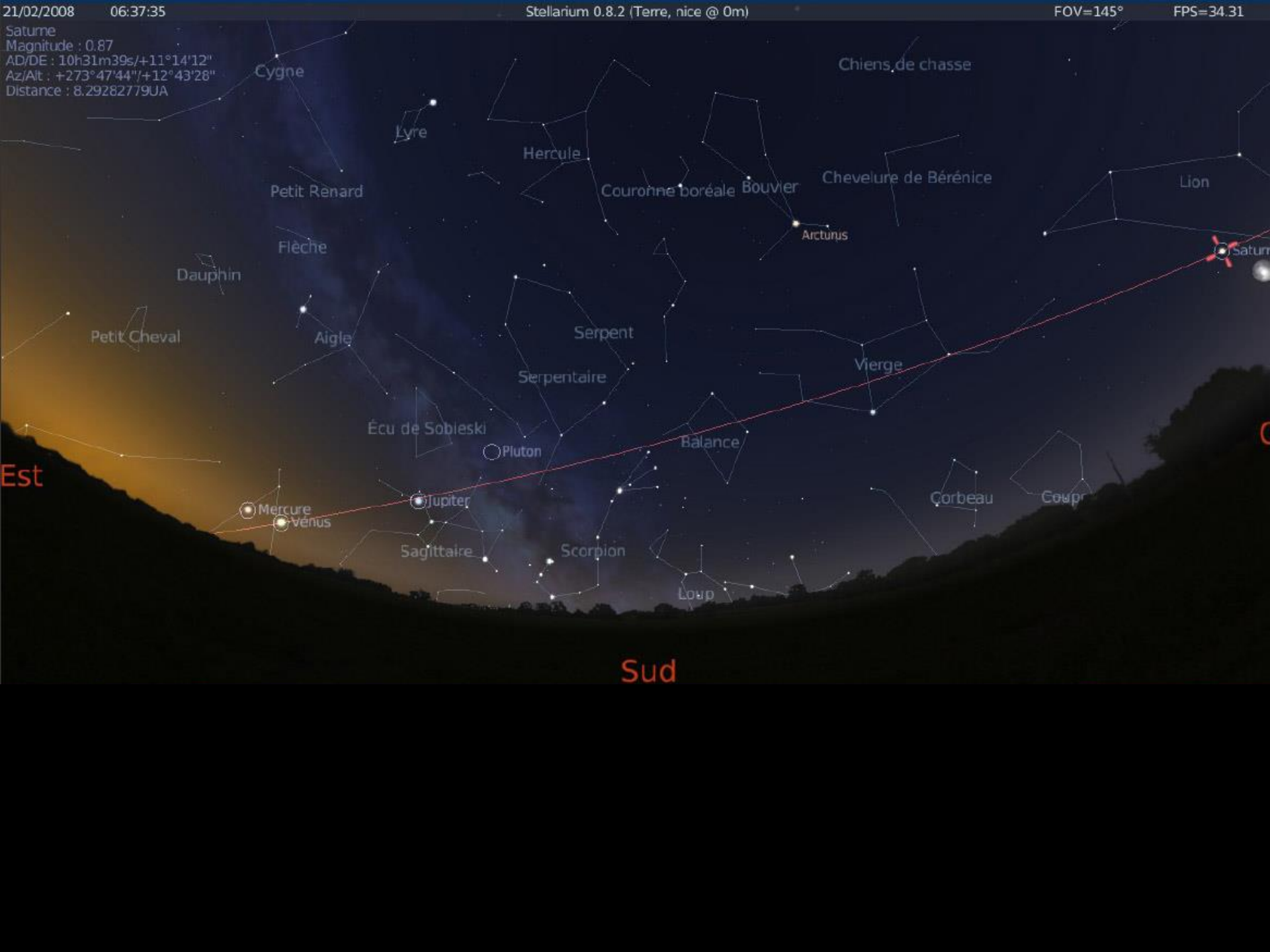
Sagittaire

Scorpion

Loup

Sud

Saturne
Magnitude : 0.87
AD/DE : 10h31m39s/+11°14'12"
Az/Alt : +273°47'44"/+12°43'28"
Distance : 8.29282779UA



Est

Sud

Cygne

Lyre

Hercule

Chiens de chasse

Petit Renard

Couronne boréale

Bouvier

Chevelure de Bérénice

Lion

Flèche

Arcturus

Saturne

Dauphin

Petit Cheval

Aigle

Serpent

Vierge

Serpentaire

Écu de Sobieski

Pluton

Balance

Mercure
Vénus

Jupiter

Corbeau

Couronne australe

Sagittaire

Scorpion

Loup

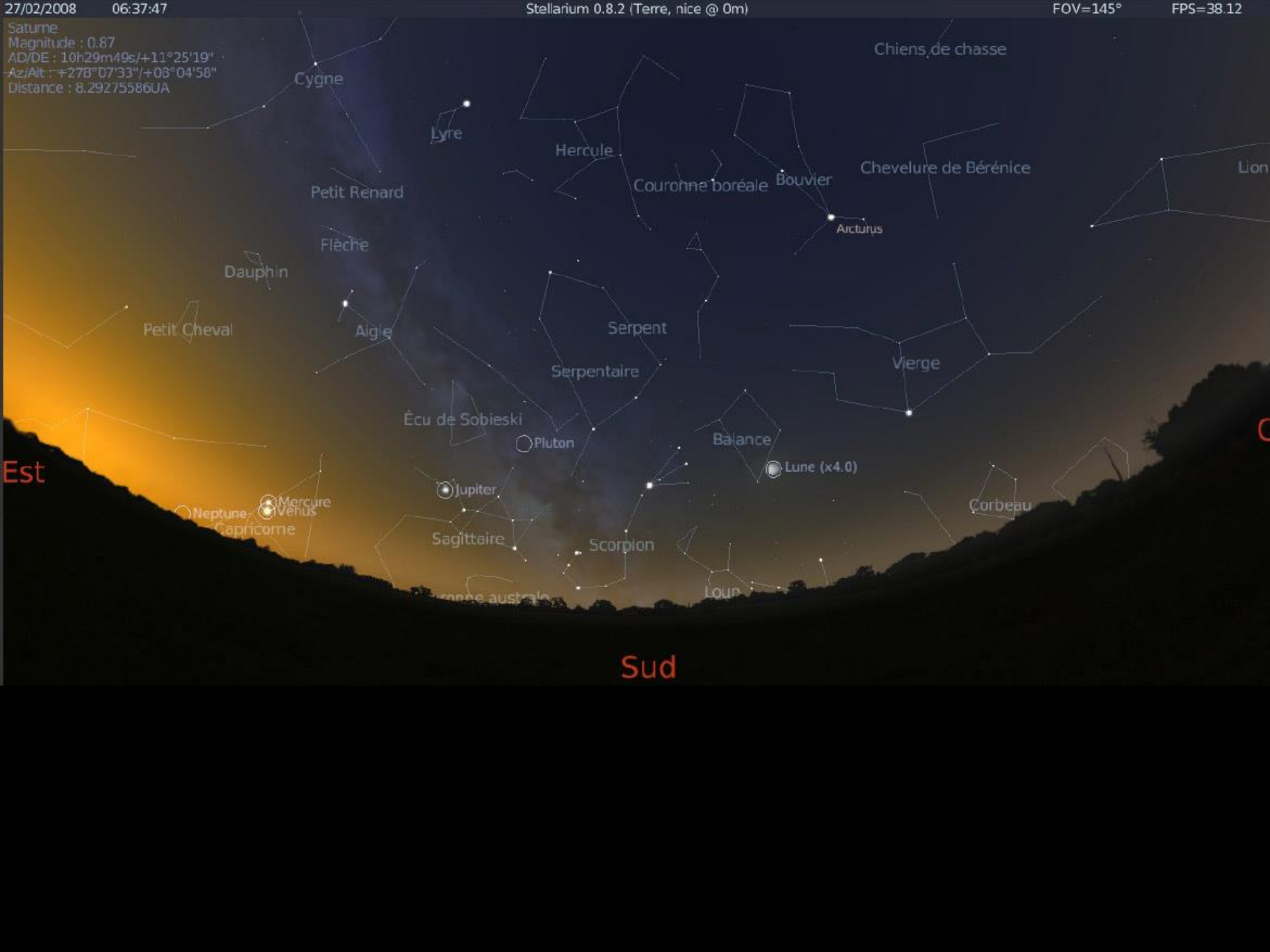
Saturne
Magnitude : 0.87
AD/DE : 10h30m26s/+11°21'38"
Az/Alt : +276°41'02"/+09°37'38"
Distance : 8.29152013JA



Est

Sud

Saturne
Magnitude : 0.87
AD/DE : 10h29m49s/+11°25'19"
Azi/Alt : +278°07'33"/+08°04'58"
Distance : 8.29275586UA



Est

Sud

Cygne

Lyre

Hercule

Chiens de chasse

Petit Renard

Couronne boréale

Bouvier

Chevelure de Bérénice

Flèche

Dauphin

Arcturus

Petit Cheval

Aigle

Serpent

Vierge

Serpentaire

Écu de Sobieski

Pluton

Balance

Lune (x4.0)

Neptune

Mercure
Vénus

Jupiter

Corbeau

Capricorne

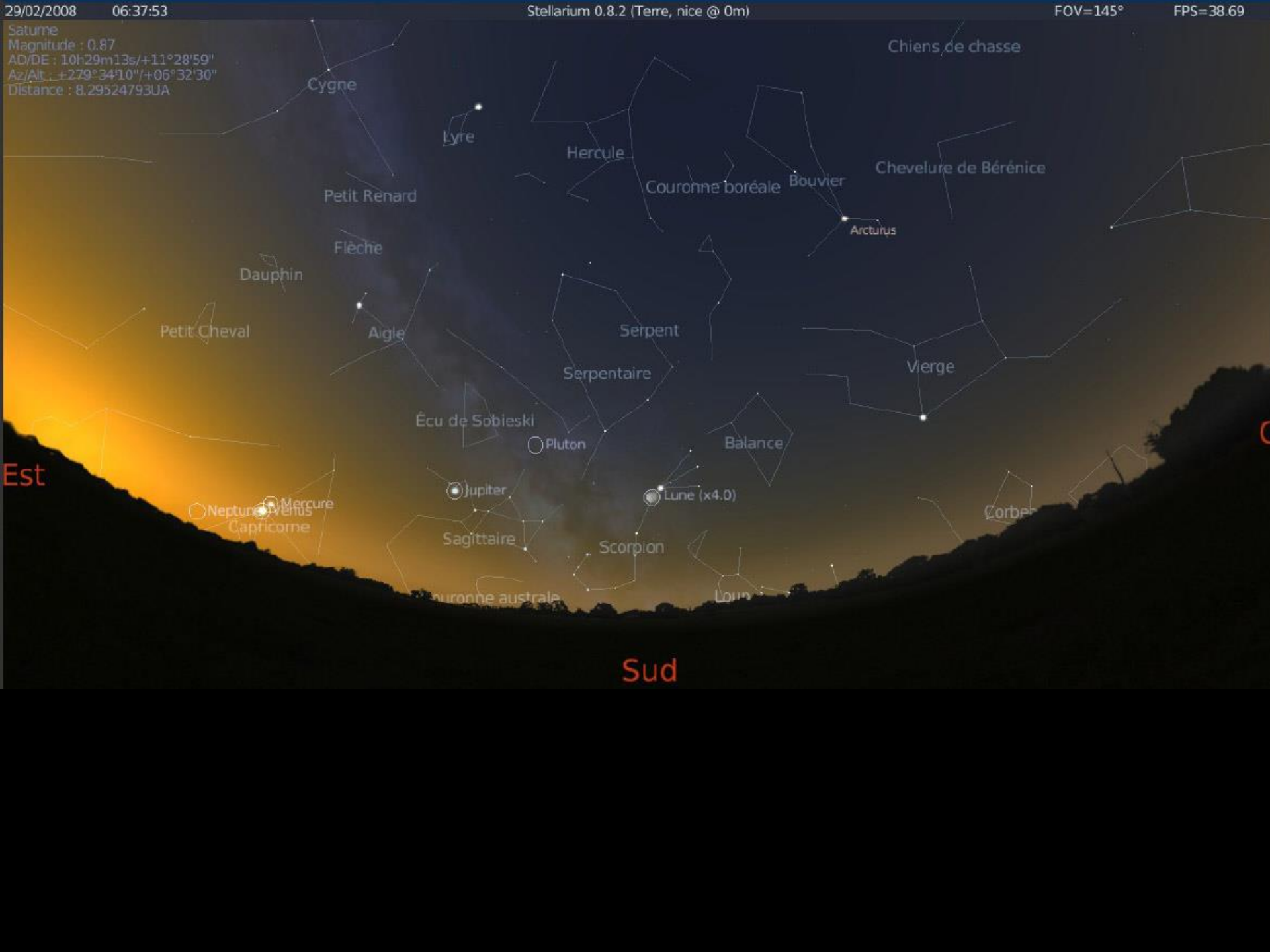
Sagittaire

Scorpion

Sonne australe

Loup

Saturne
 Magnitude : 0.87
 AD/DE : 10h29m13s/+11°28'59"
 Az/Alt : +279°34'10"/+06°32'30"
 Distance : 8.29524793UA



Cygne

Lyre

Hercule

Chiens de chasse

Chevelure de Bérénice

Petit Renard

Couronne boréale

Bouvier

Arcturus

Fleche

Dauphin

Petit Cheval

Aigle

Serpent

Vierge

Serpentaire

Écu de Sobieski

Pluton

Balance

Est

Neptune
 Mercure
 Capricorne

Jupiter

Lune (x4.0)

Corbeau

Sagittaire

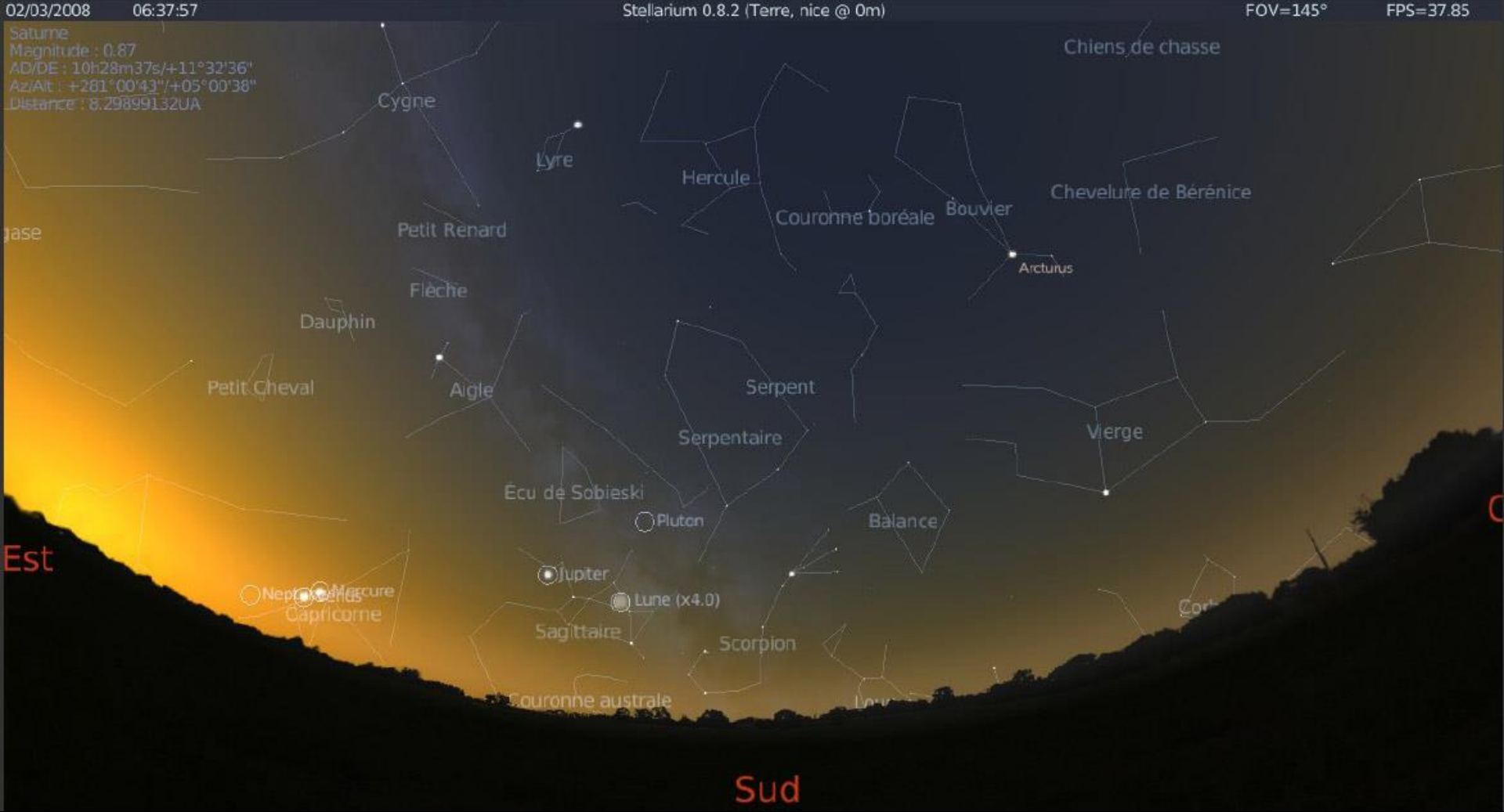
Scorpion

Coronne australe

Loup

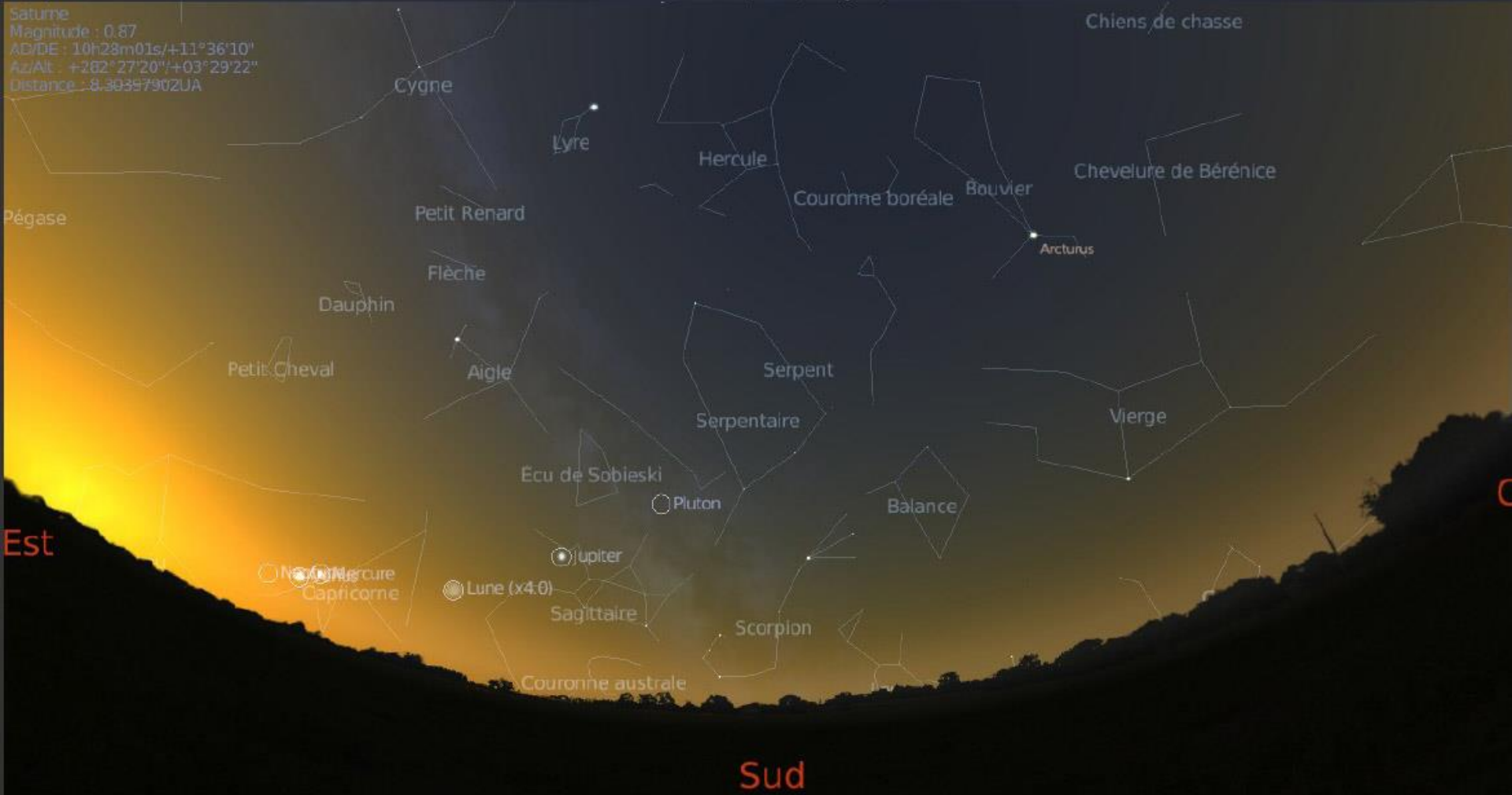
Sud

Saturne
 Magnitude : 0.87
 AD/DE : 10h28m37s/+11°32'36"
 Azi/Alt : +281°00'43"/+05°00'38"
 Distance : 8.29899132UA



Est

Sud



planète = astre errant



Dragon

Grande Ours

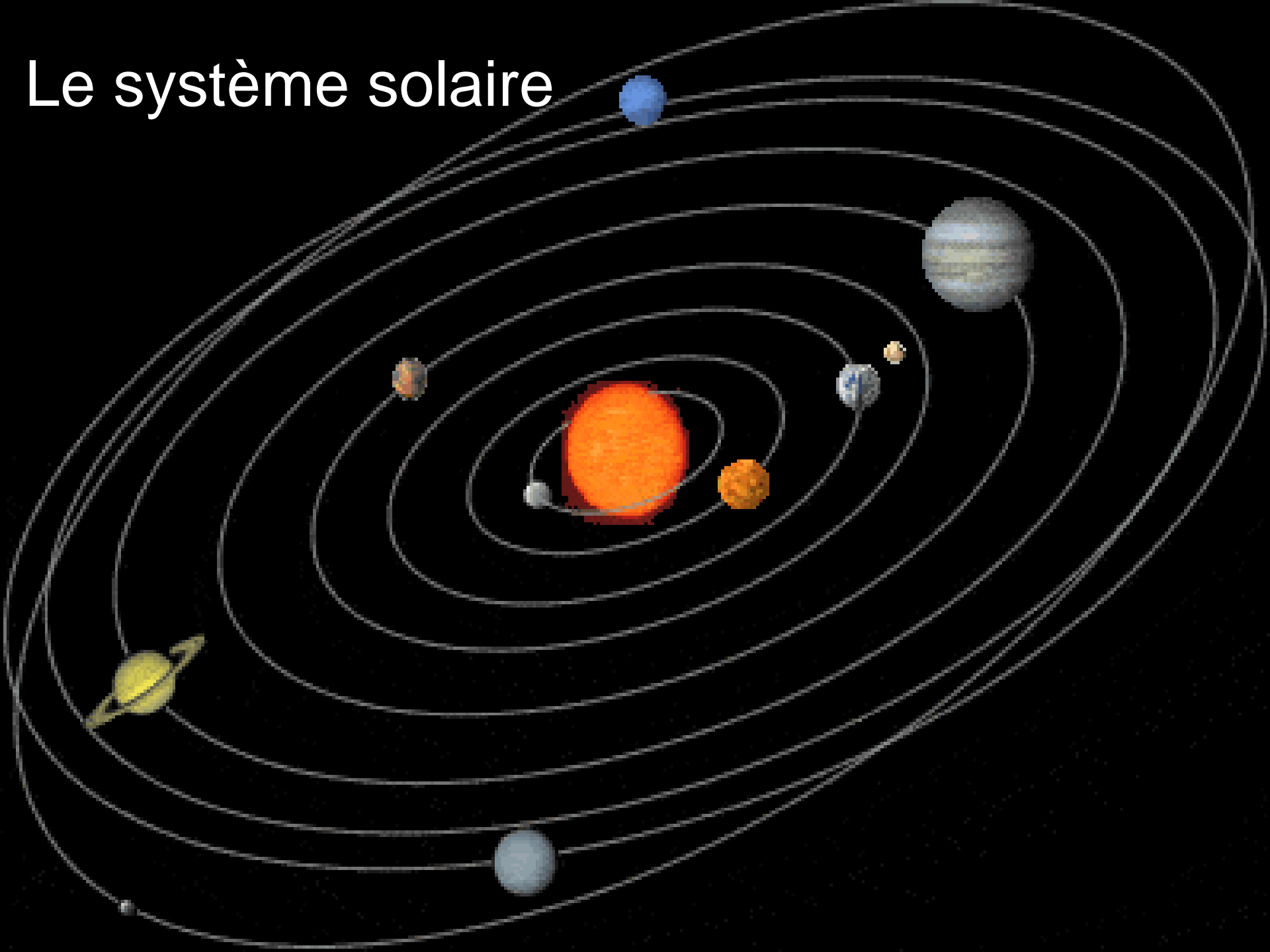
Petite Ours

Polaris

Céphée

Cassiopée

Le système solaire







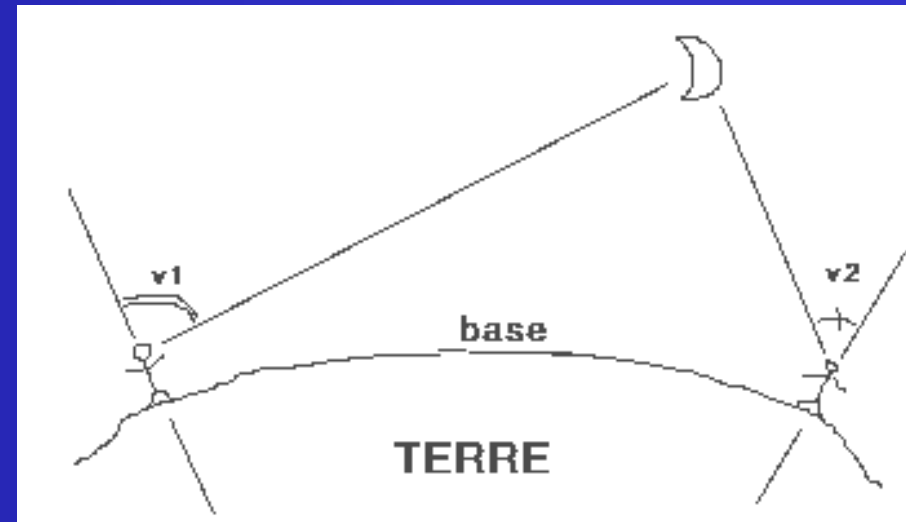
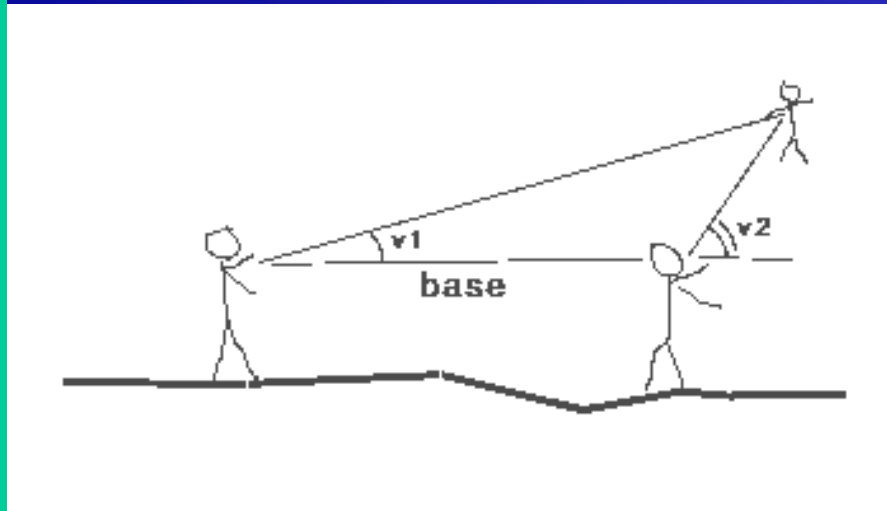






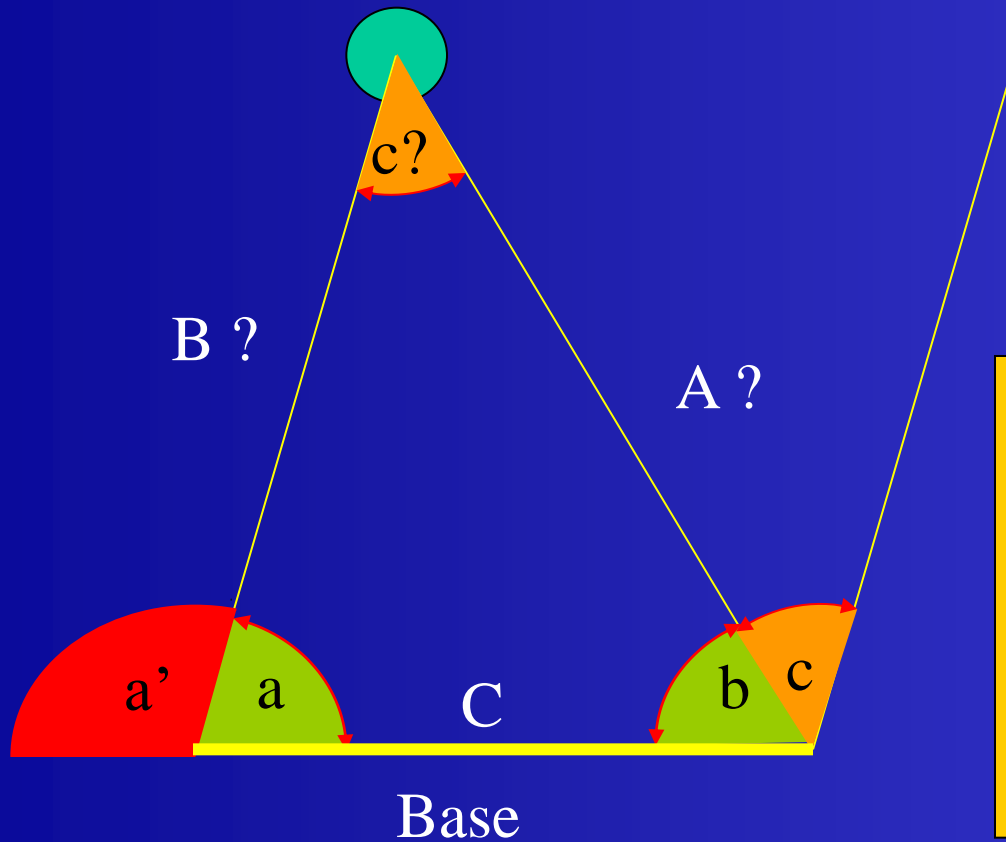
La mesure des distances grâce à la triangulation

Parallaxe ou triangulation,
ou comment mesurer une distance à un lieu inaccessible...



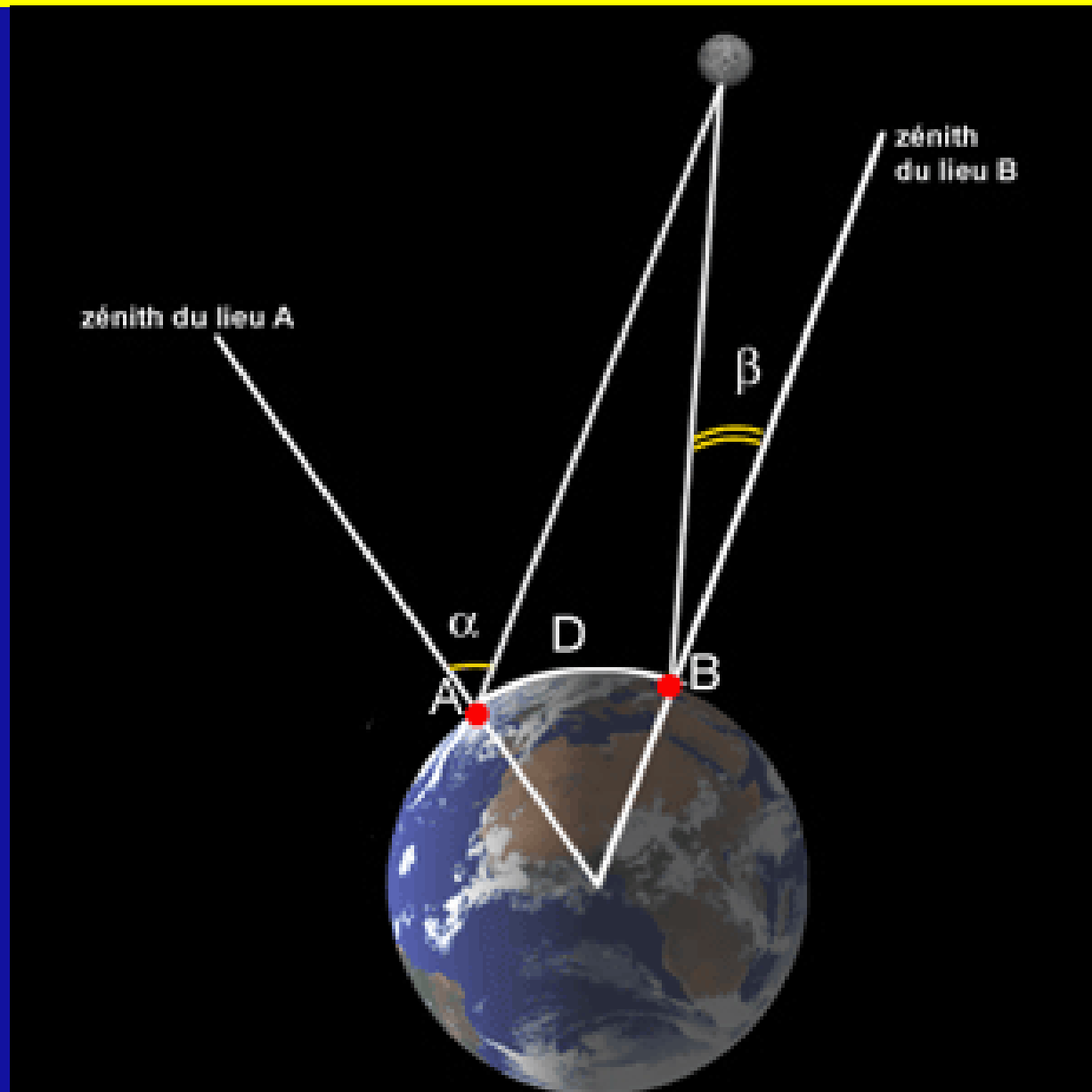
Un calcul connu depuis l'antiquité

La triangulation

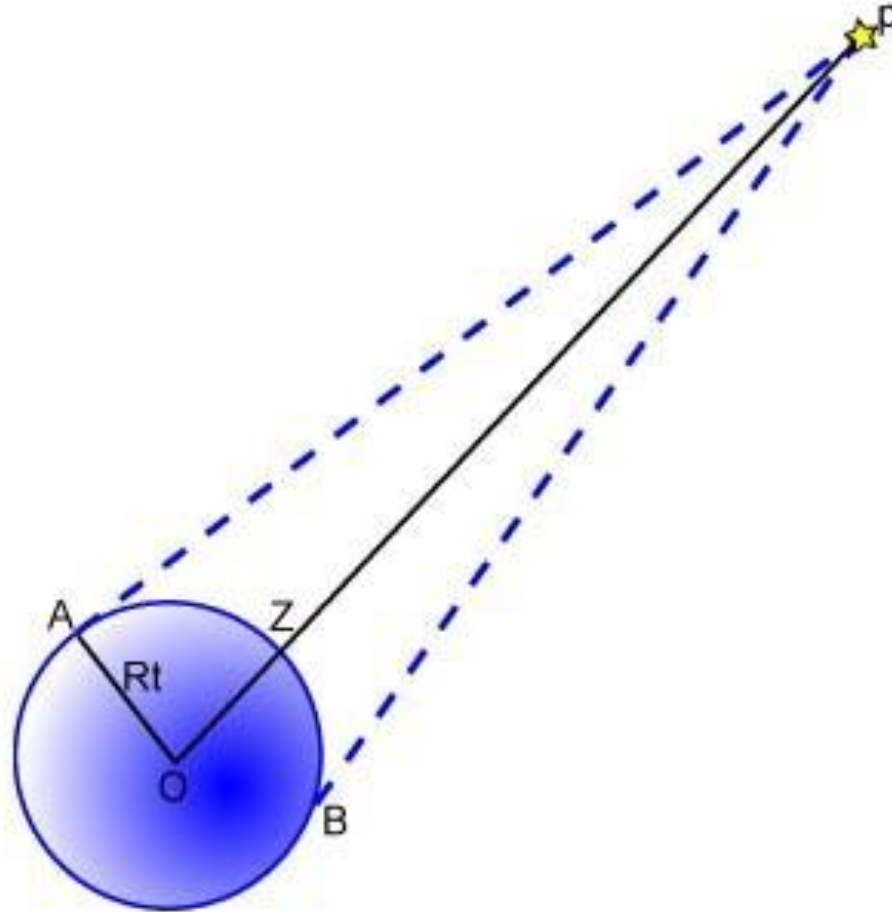


$$c = 180^\circ - (a + b)$$
$$c = a' - b$$
$$\frac{\sin c}{C} = \frac{\sin b}{B} = \frac{\sin a}{A}$$

L'application aux corps célestes: la Lune, etc...



La parallaxe diurne – la parallaxe horizontale



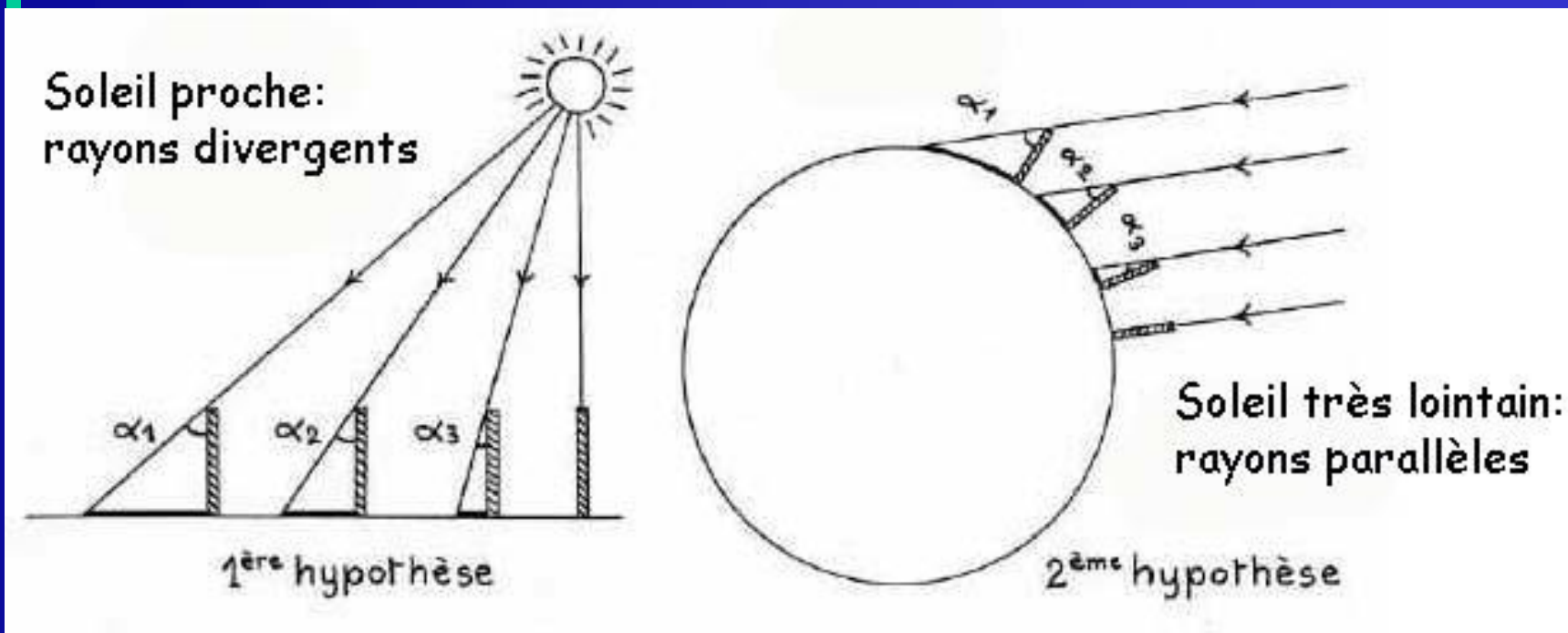
La distance de la Terre au Soleil ?



Des questions dès l'antiquité

- Pourquoi le Soleil n'est-il pas vu dans la même direction par tous ?
- Quand on descend vers le sud, le Soleil est plus haut dans le ciel... Pourquoi ?
- Comment mesurer la distance Terre-Soleil ?

L'importance du choix d'un modèle théorique d'univers

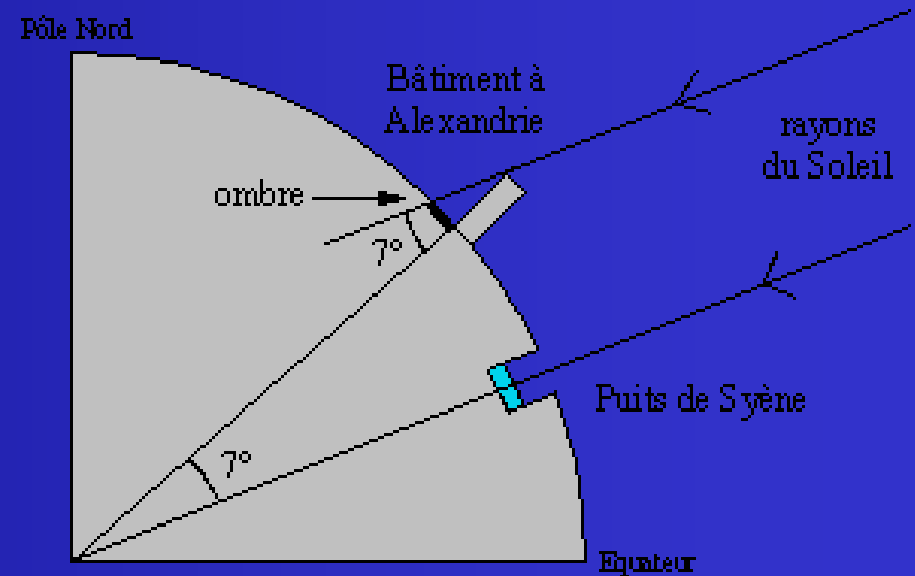


Détermination de la distance Terre-Soleil: une parallaxe mesurable?

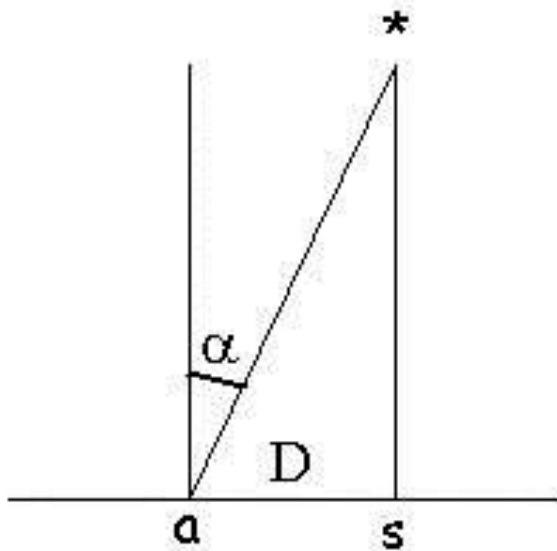
Une observation intéressante en Egypte



Eratosthène
(276 - 194 av. J.C)

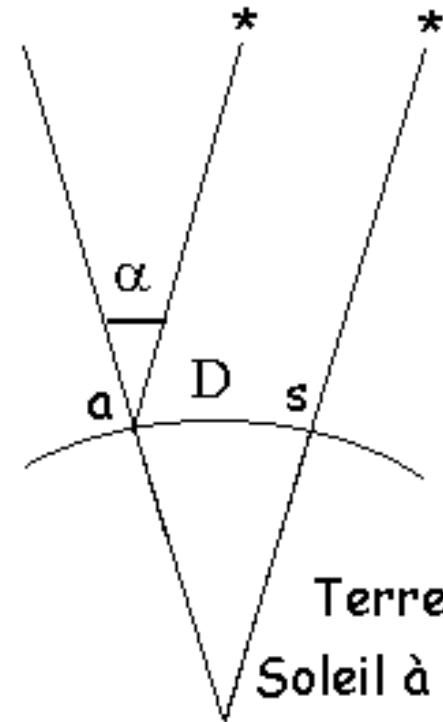


La nécessité d'un modèle théorique



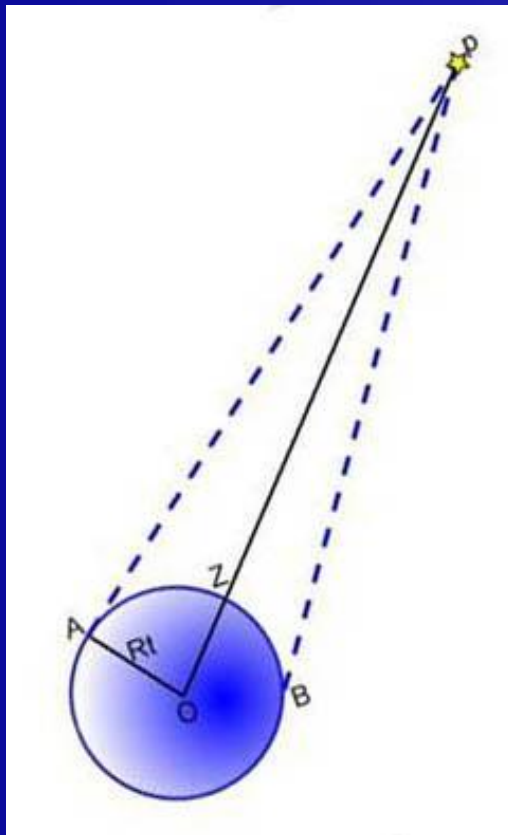
Terre plate
Soleil proche

a = Alexandrie
s = Syène

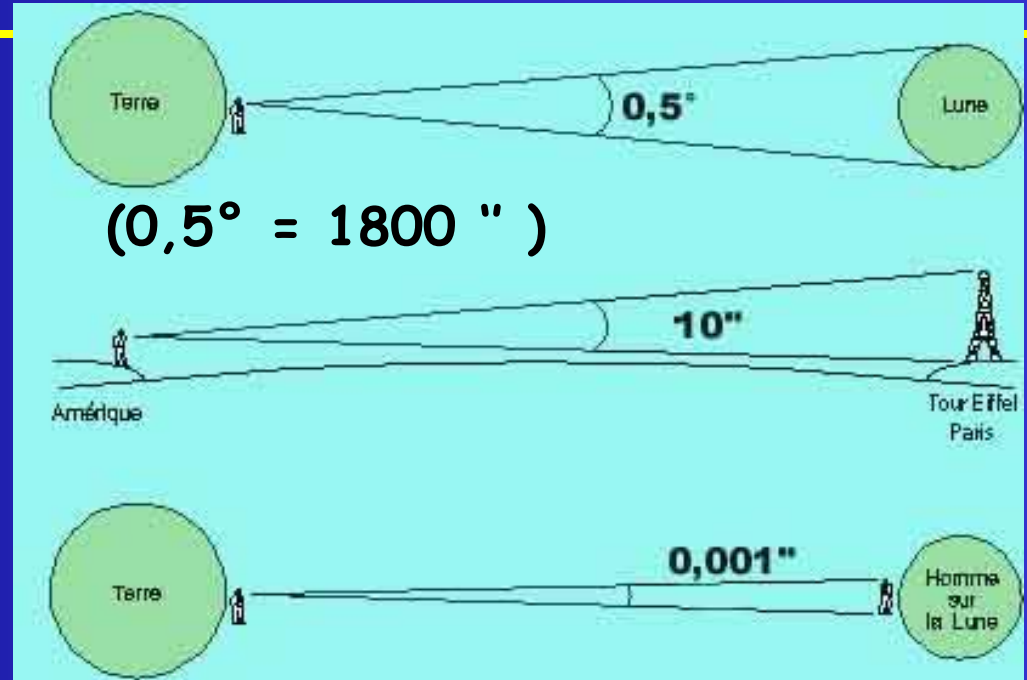


Terre ronde
Soleil à l'infini

La mesure des angles



La parallaxe horizontale



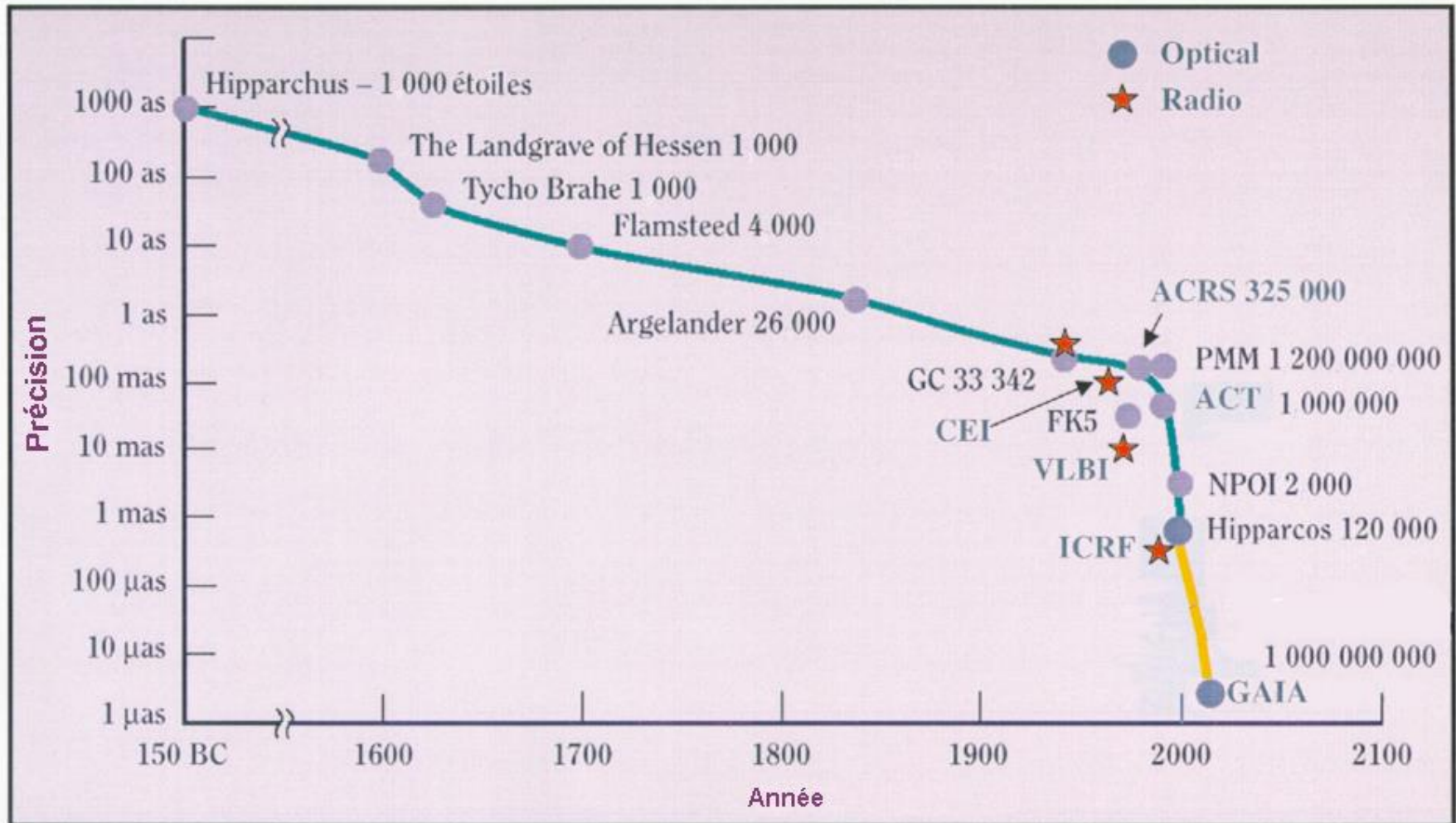
Angle apparent + taille \rightarrow distance

Parallaxe de la Lune = 1 degré = 3600 "

Parallaxe du Soleil = 8 "

Parallaxe de Jupiter = 1,5 "

La précision des observations astrométriques angulaires



La distance Terre-Lune



La triangulation ne nous a pas donné la distance Terre-Soleil mais la taille de la Terre...

La triangulation nécessite des instruments très précis: elle est encore trop difficile à appliquer: la distance Terre-Lune a été déterminée autrement.

Les éclipses de Lune



Une éclipse de Lune nous renseigne sur la forme de la Terre

14

Premier Partie de la
Ceste Figure demonstre que la Terre est ronde.



Si la Terre estoit quarrée, l'ombre d'icelle paroistroit de ceste mesme forme en l'Éclipse de la Lune.



Si la Terre estoit triangulaire, l'ombre d'icelle seroit aussi en l'Éclipse triangulaire.

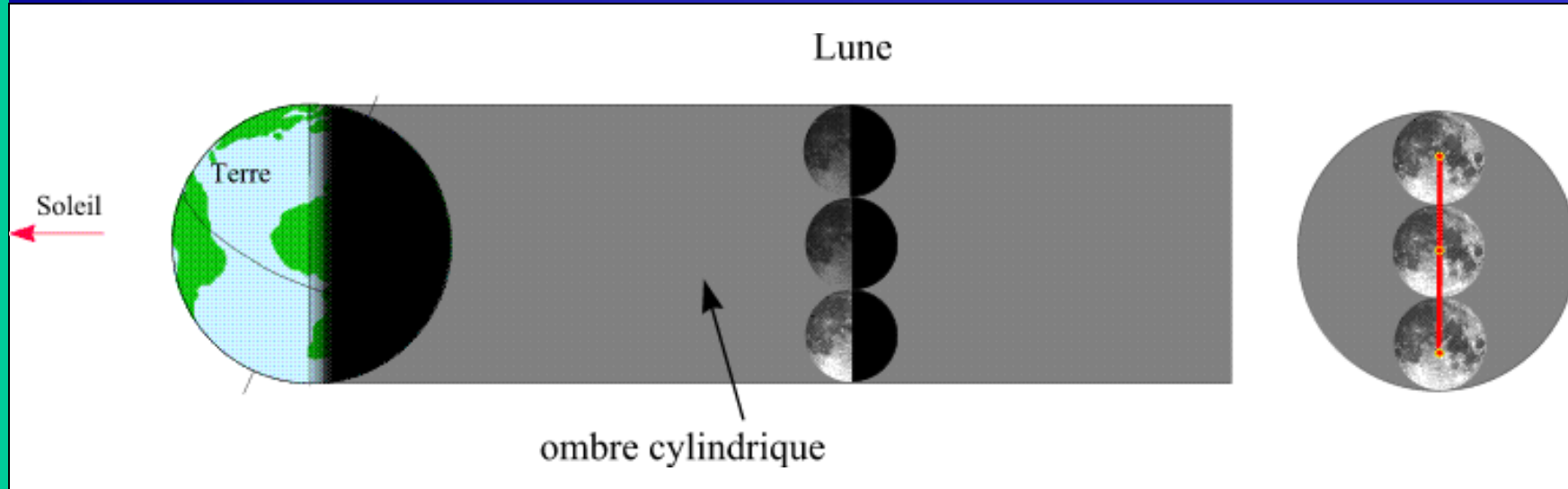


Si la Terre auoit six anglez, son ombre en l'Éclipse de la Lune, seroit de la mesme forme.



Mesure du système solaire: la distance Terre-Lune

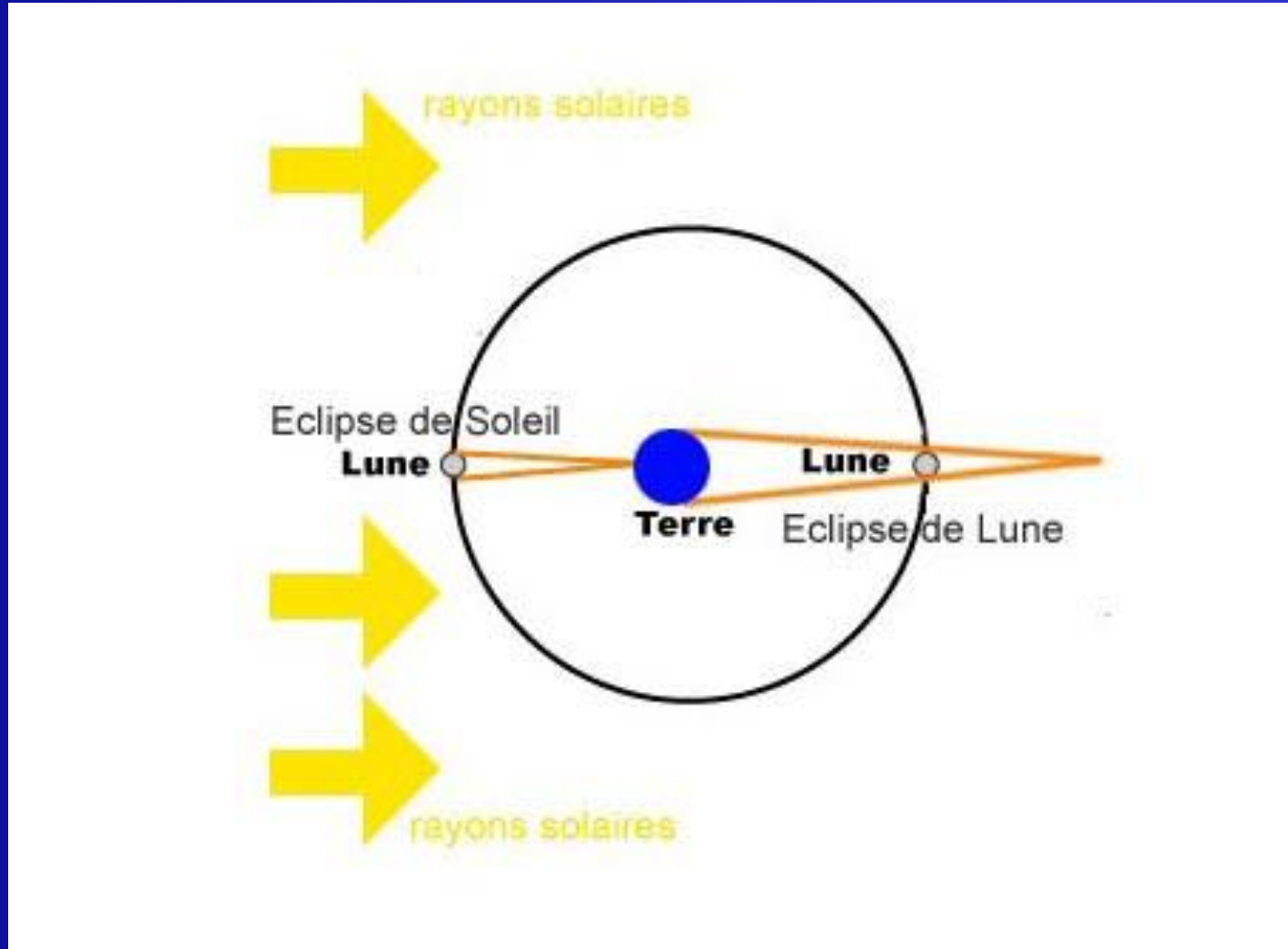
ARISTARQUE DE SAMOS (~275 av. J.-C.)



- L'ombre est supposée cylindrique.
- La Lune se déplace d'une distance égale à son diamètre en une heure.
- Les éclipses totales de Lune les plus longues durent environ 2 heures.

Donc le diamètre de la Lune est environ le tiers du diamètre terrestre $L = 0,3 T$.
Comme la Lune est vue sous un diamètre d'environ $32'$, sa distance est 107 fois son diamètre. $d = 0,3 T \times 107 = 32,1 T = 64,2$ rayons terrestres.

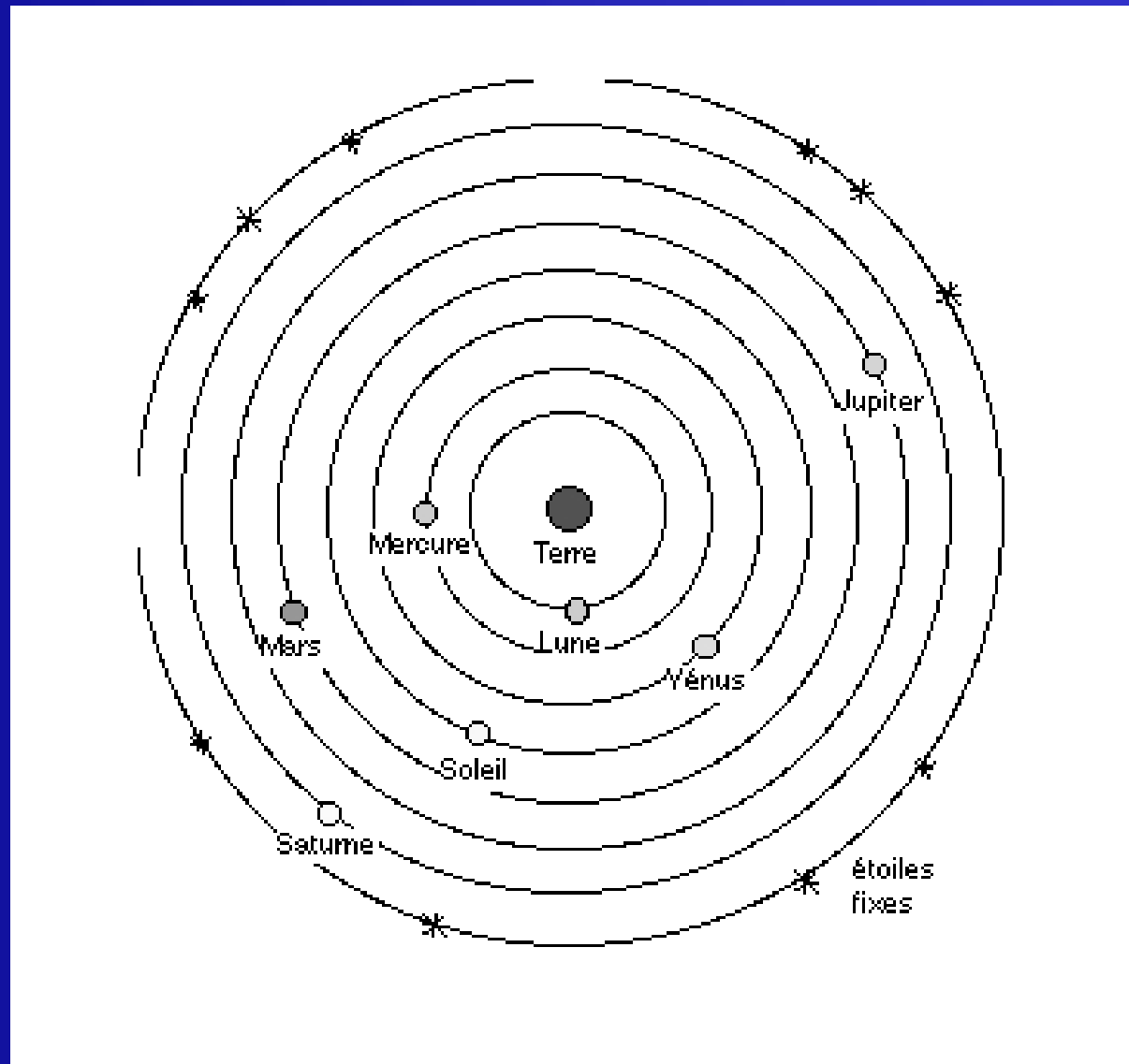
Eclipses de Soleil et de Lune



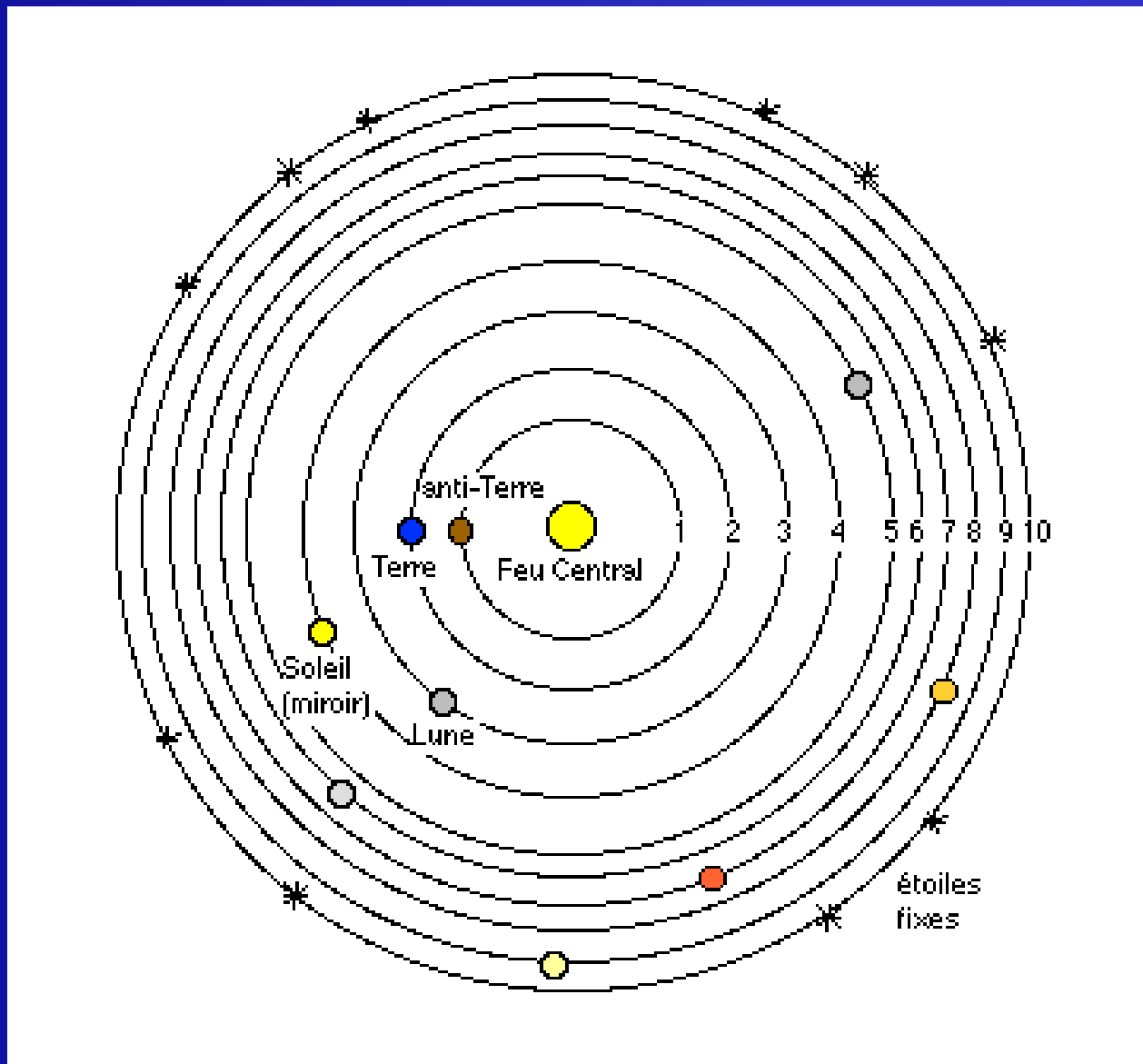
Comment mesurer les distances des corps plus éloignés que la Lune?

- Il faudra attendre près de 2000 ans (les XVIIème et XVIIIème siècles) pour en avoir une idée
- Il faudra surtout avoir un « bon » modèle d'univers

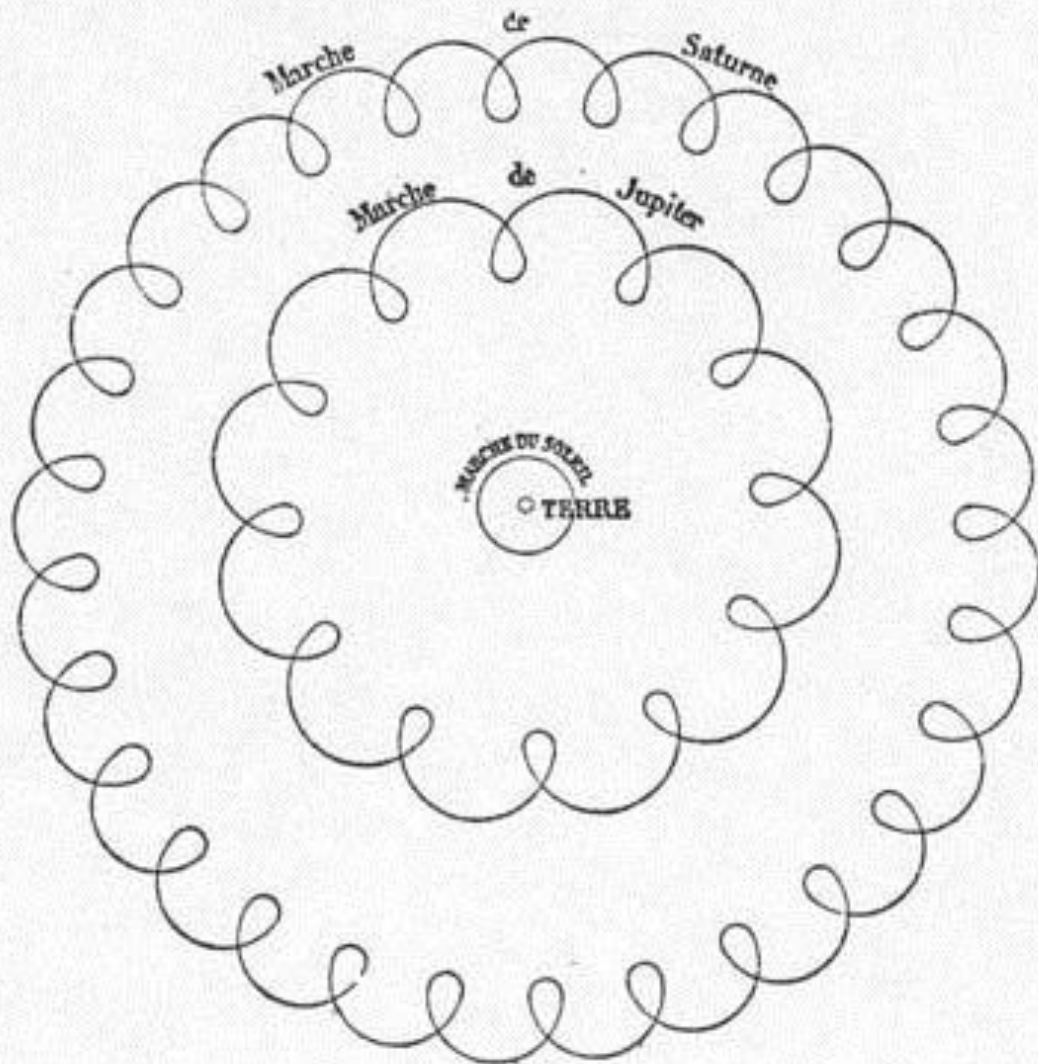
Le modèle d'univers d'Aristote



Le modèle de Philoas



Le modèle de Ptolémée

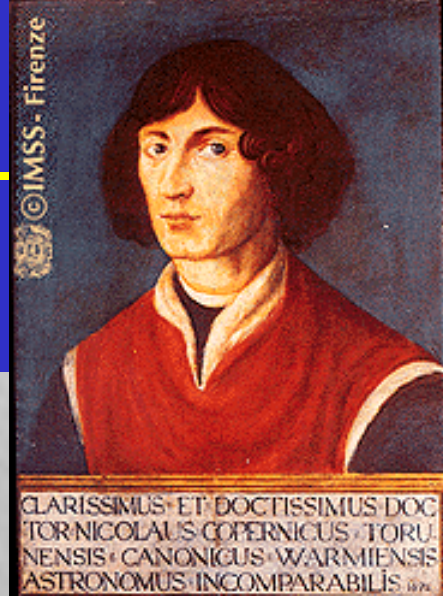


ÉPICYCLES DE PTOLÉMÉE.

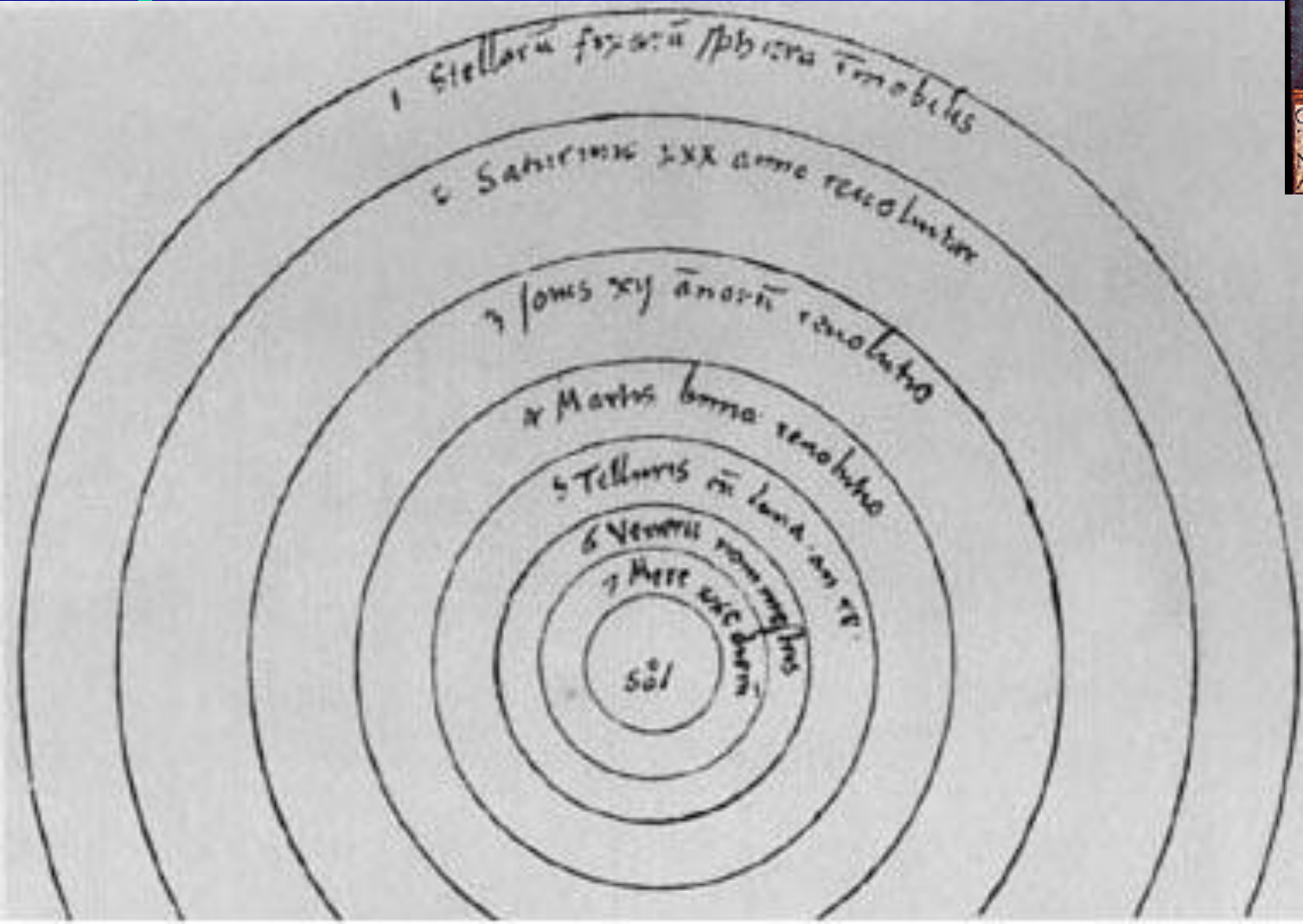


Ptolémée (100-170)

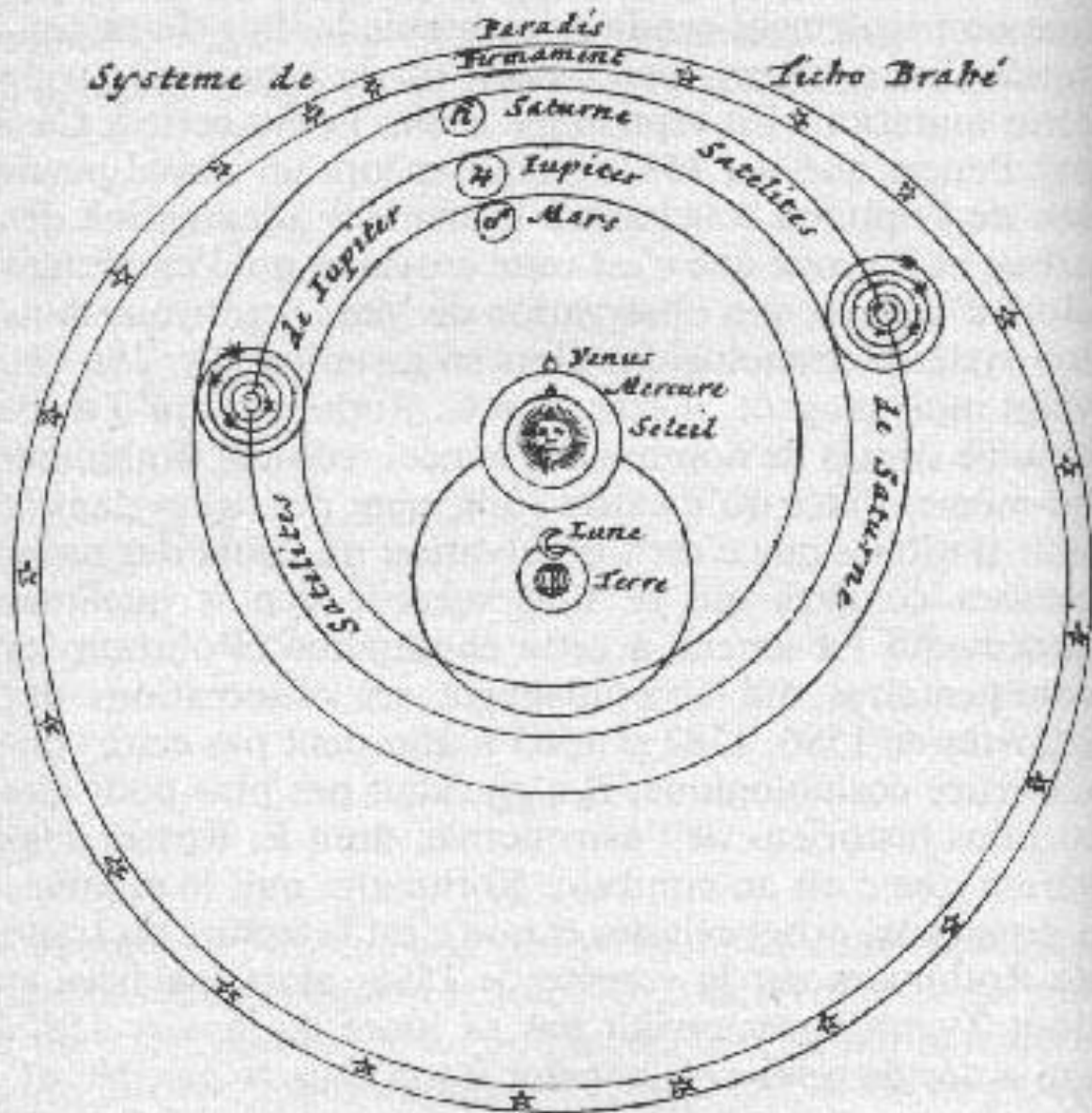
Le modèle de Copernic



Copernic (1473-1543)



Le modèle de Tycho Brahé

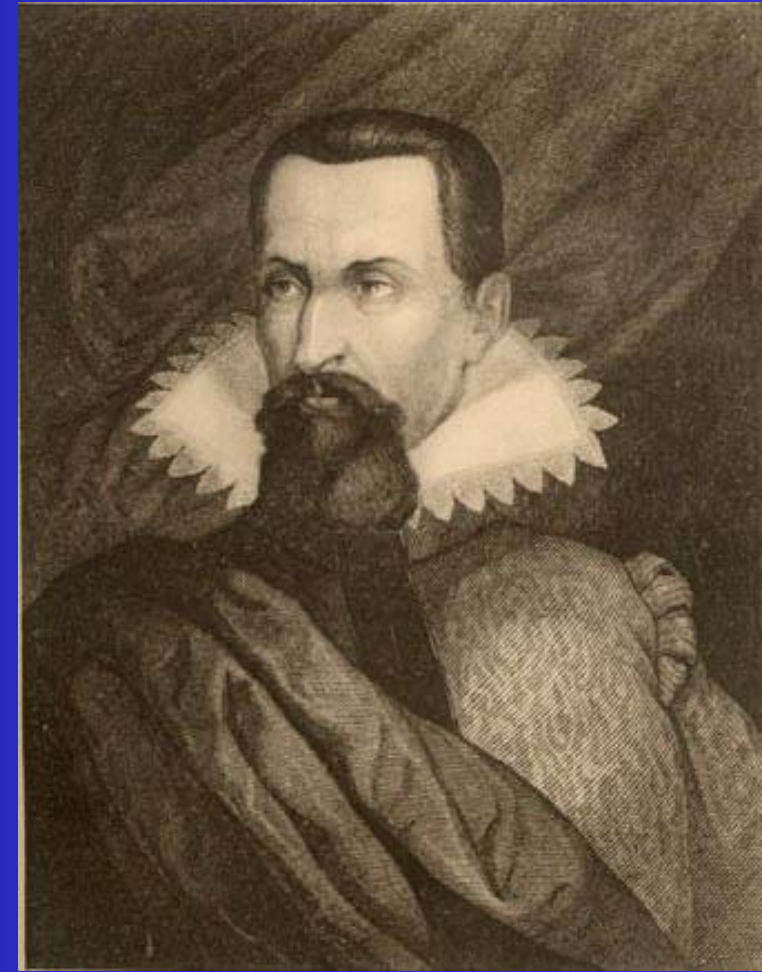


Tycho-Brahe (1546-1601)

Galilée et Képler

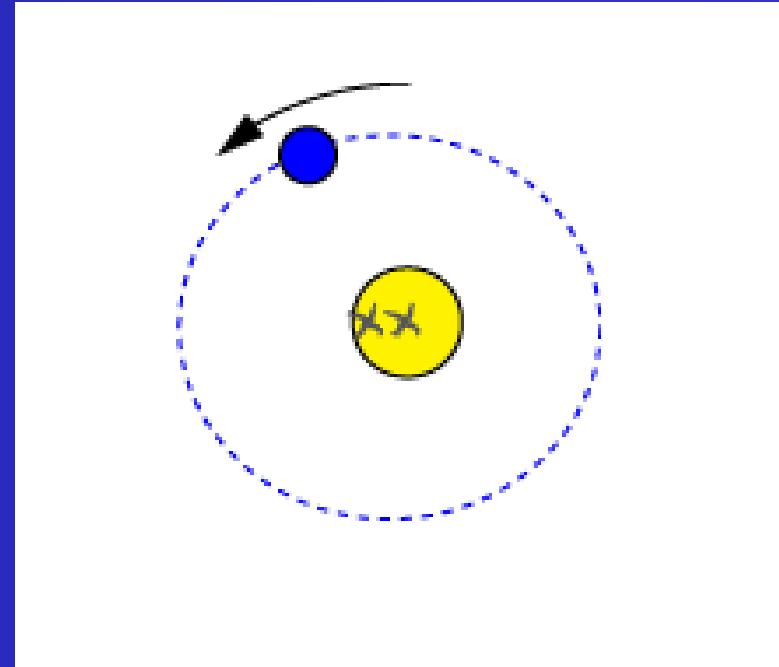
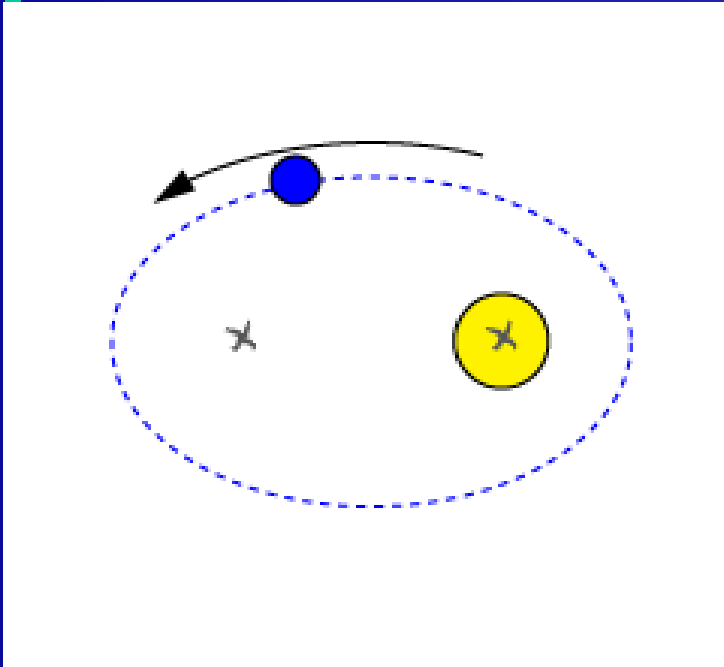


Galilée (1564-1642)



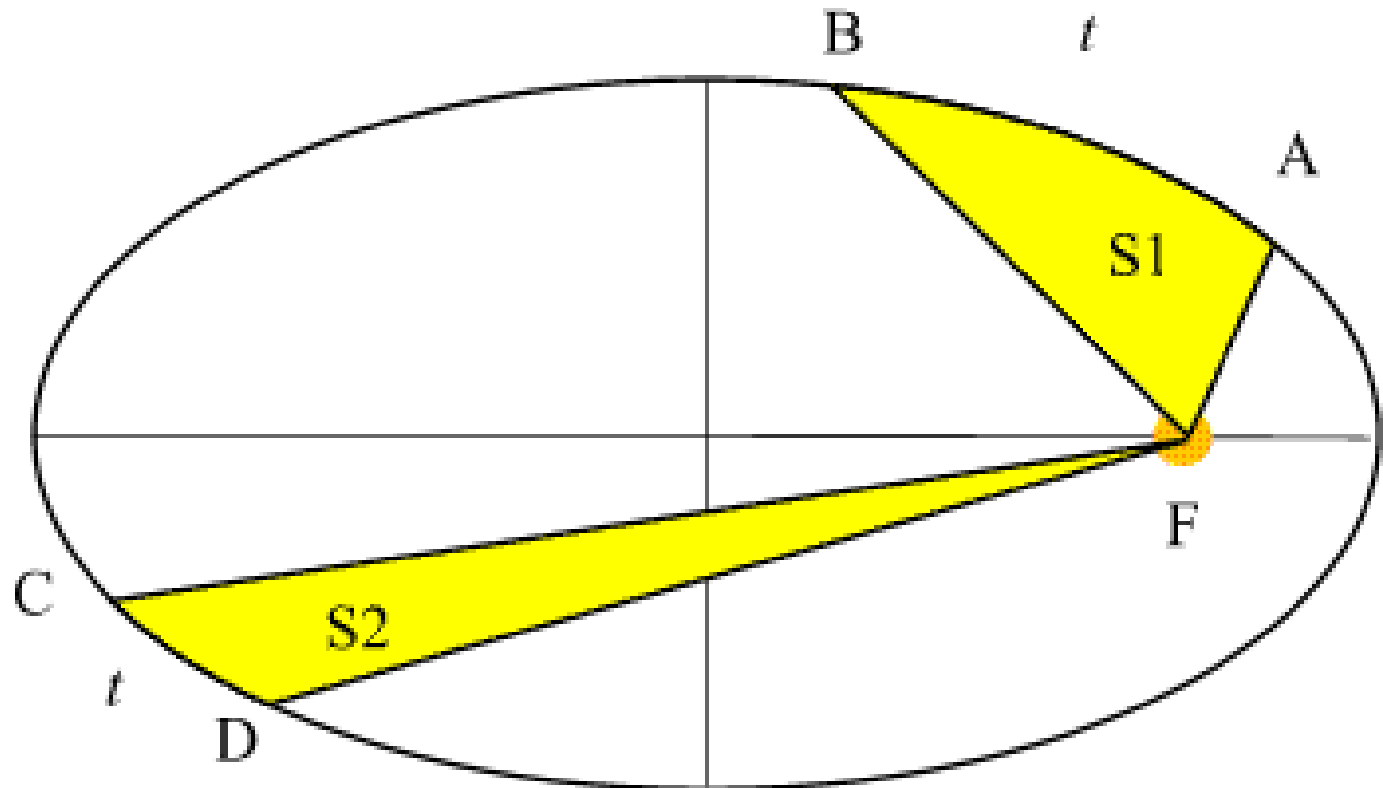
Kepler (1571-1630)

La première loi de Képler



Loi des aires

Deuxième loi de Kepler $S_1 = S_2$



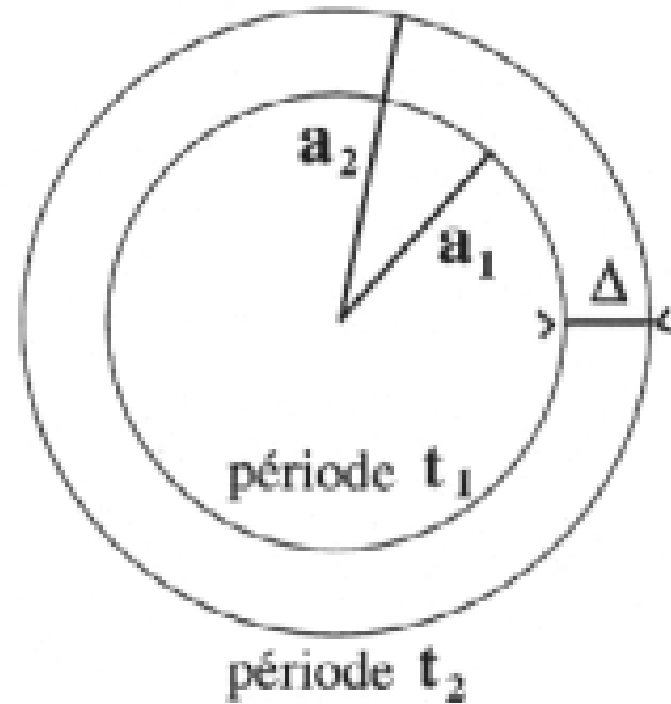
$$r^2 \frac{d\theta}{dt} = C = n a b = \frac{2\pi a b}{T}$$

Troisième loi de Képler

$$\frac{a_1^3}{t_1^2} = \frac{a_2^3}{t_2^2}$$

$$a_1 = a_2 - \Delta$$

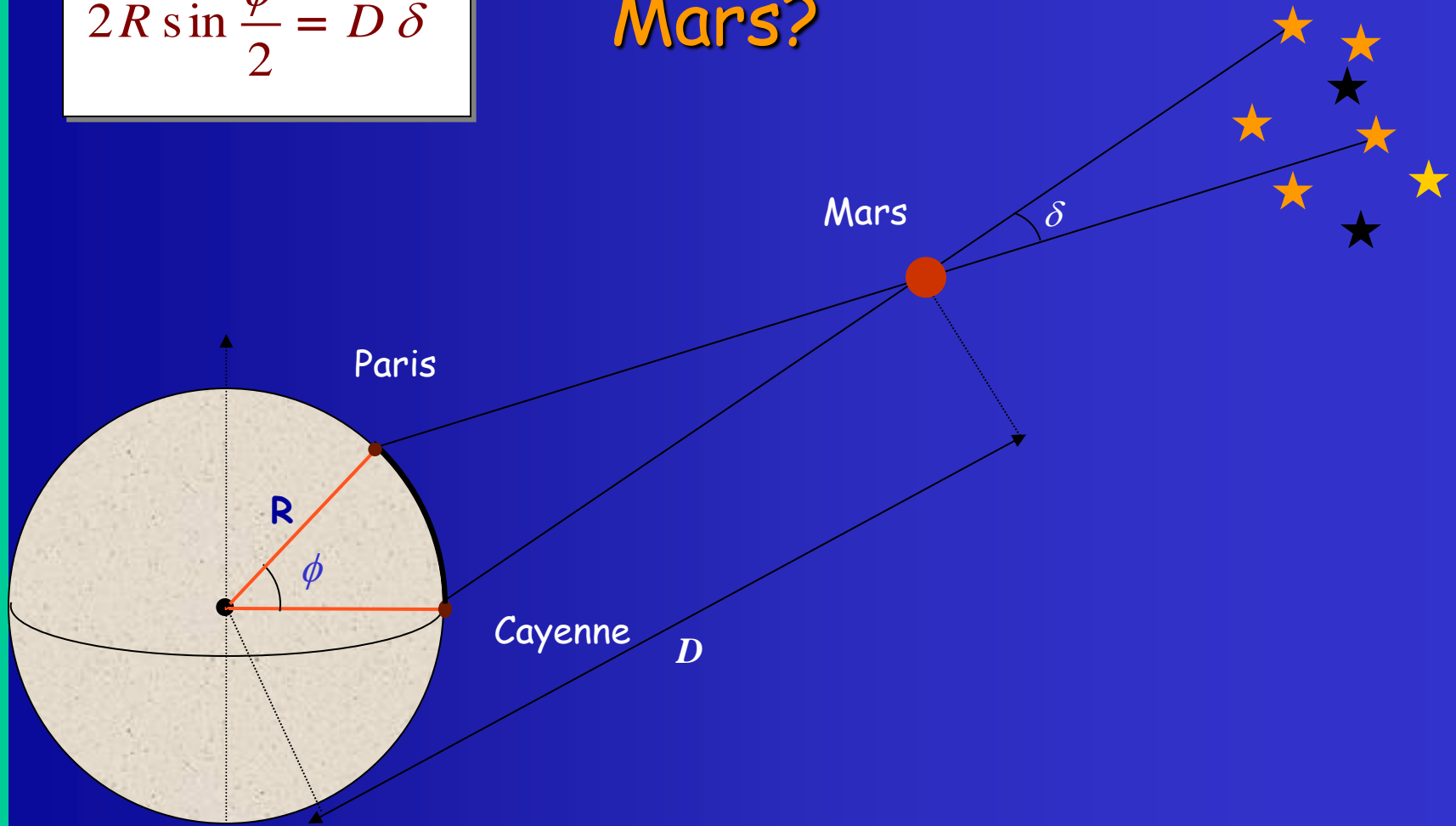
→ a_1 et a_2



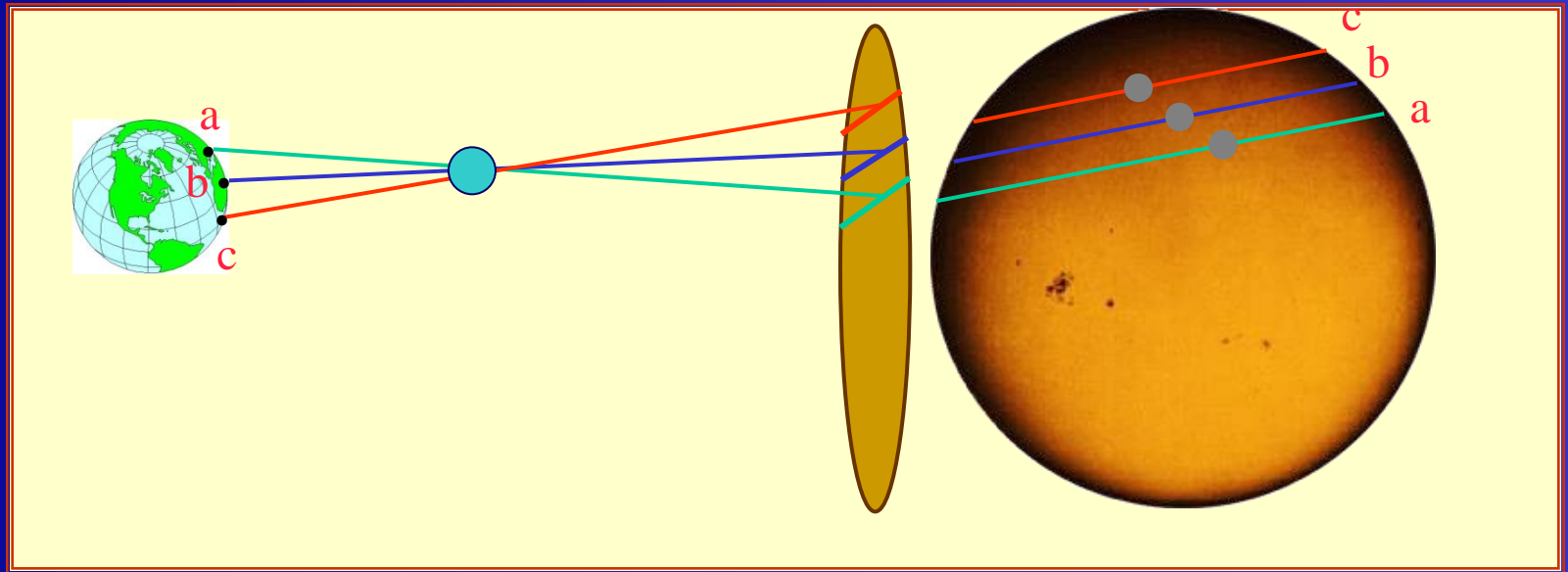
Il suffit de mesurer la distance d'une planète proche

$$2R \sin \frac{\phi}{2} = D \delta$$

Mars?



Parallaxe de Vénus



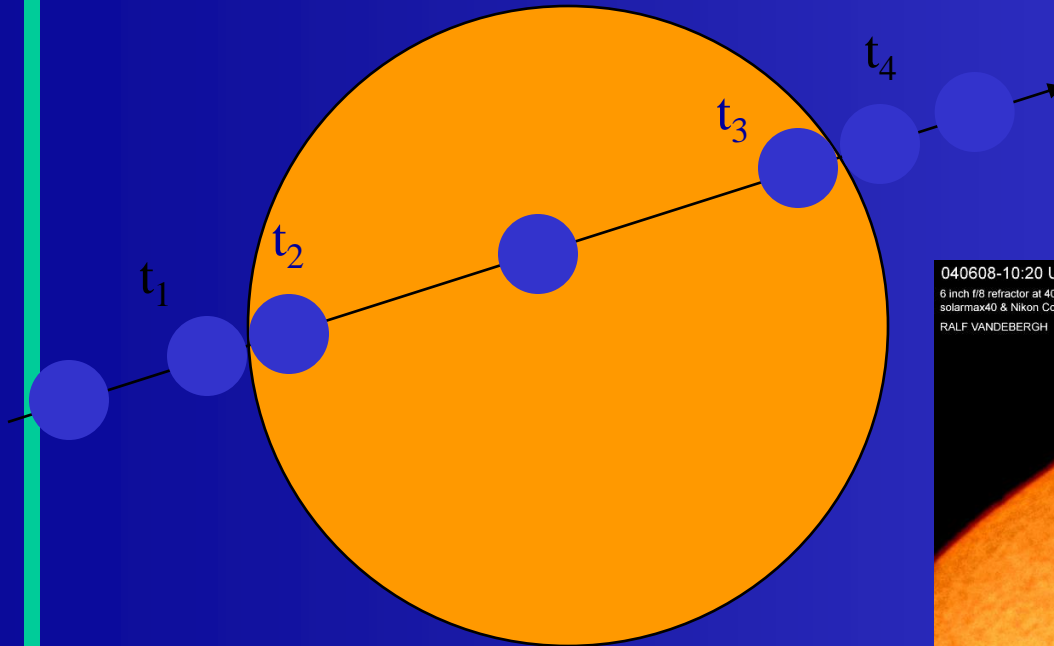
- Les positions relatives des cordes donnent la parallaxe de Vénus
- On remplace une mesure d'angle par une mesure de temps
 - méthode de Halley: mesurer la durée d'un passage
 - méthode de Delisle: mesurer l'instant des contacts

ou Vénus?

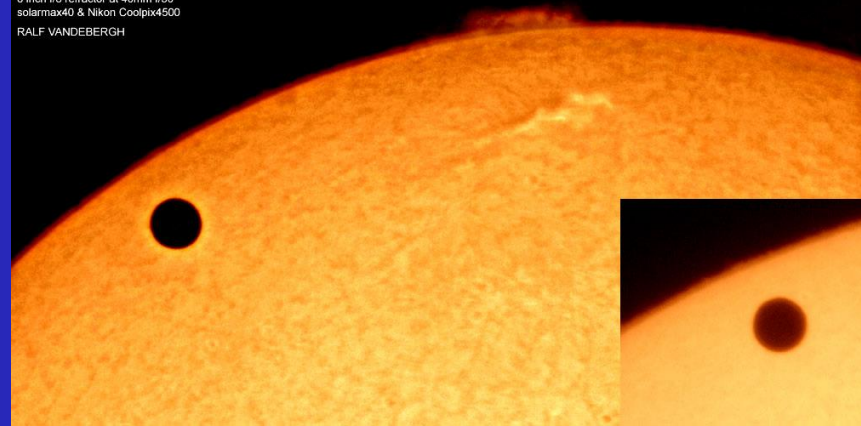
Que mesure-t-on lors d'un passage de Vénus?

- Un phénomène rare: 1639, 1761, 1769, 1874, 1882, 2004, 2012
- Une opportunité pour mesurer facilement la distance Terre-Soleil (ua)
- Une chaîne de procédures scientifiques de l'observation au calcul

t_1 : 1^e contact
 t_2 : 2^e contact
 t_3 : 3^e contact
 t_4 : 4^e contact

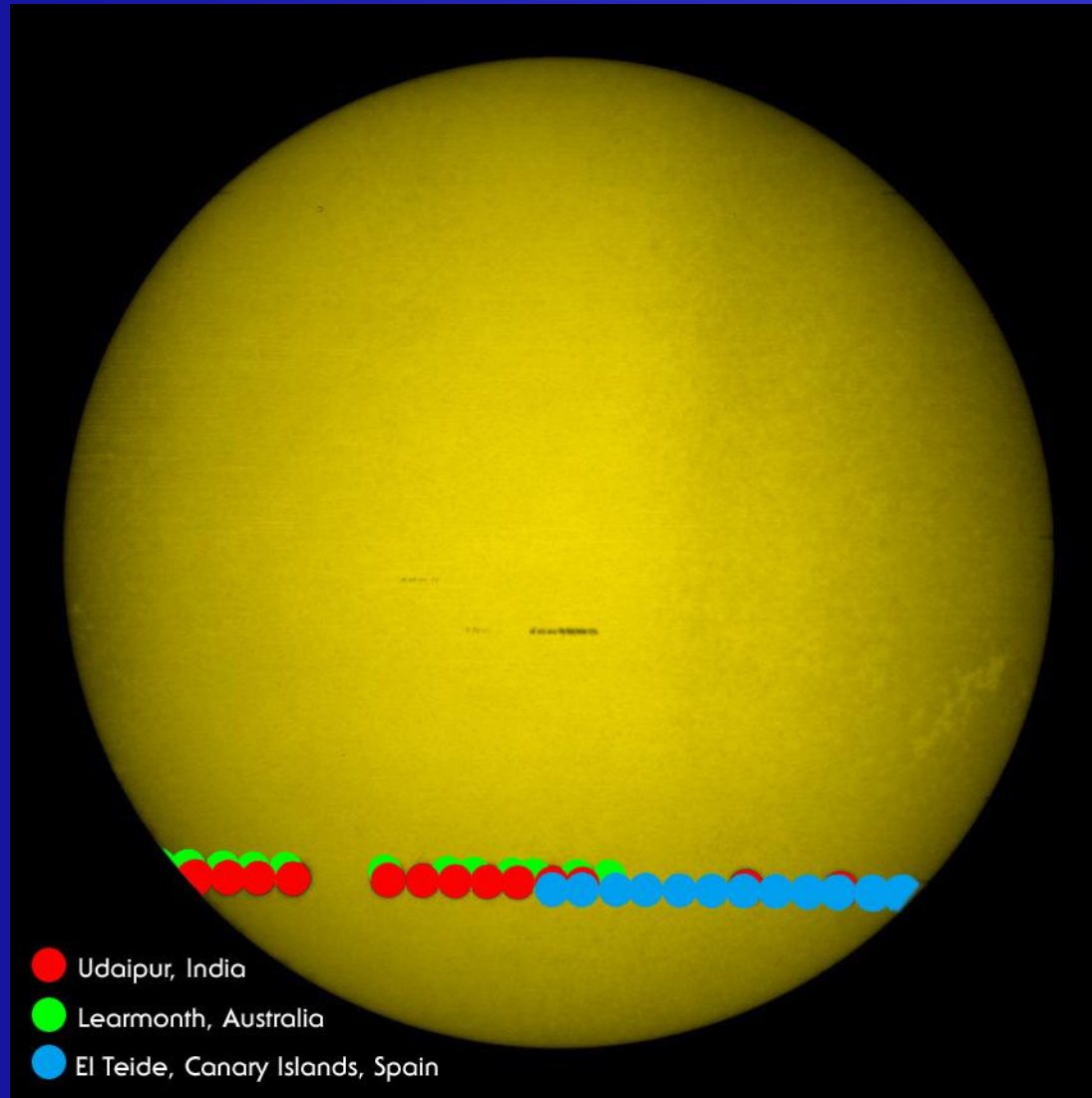


040608-10:20 UT Venus transit Ha
6 inch f/8 refractor at 40mm f/30
solarmax40 & Nikon Coolpix4500
RALF VANDEBERGH



Observer c'est mesurer l'instant des contacts en Temps Universel

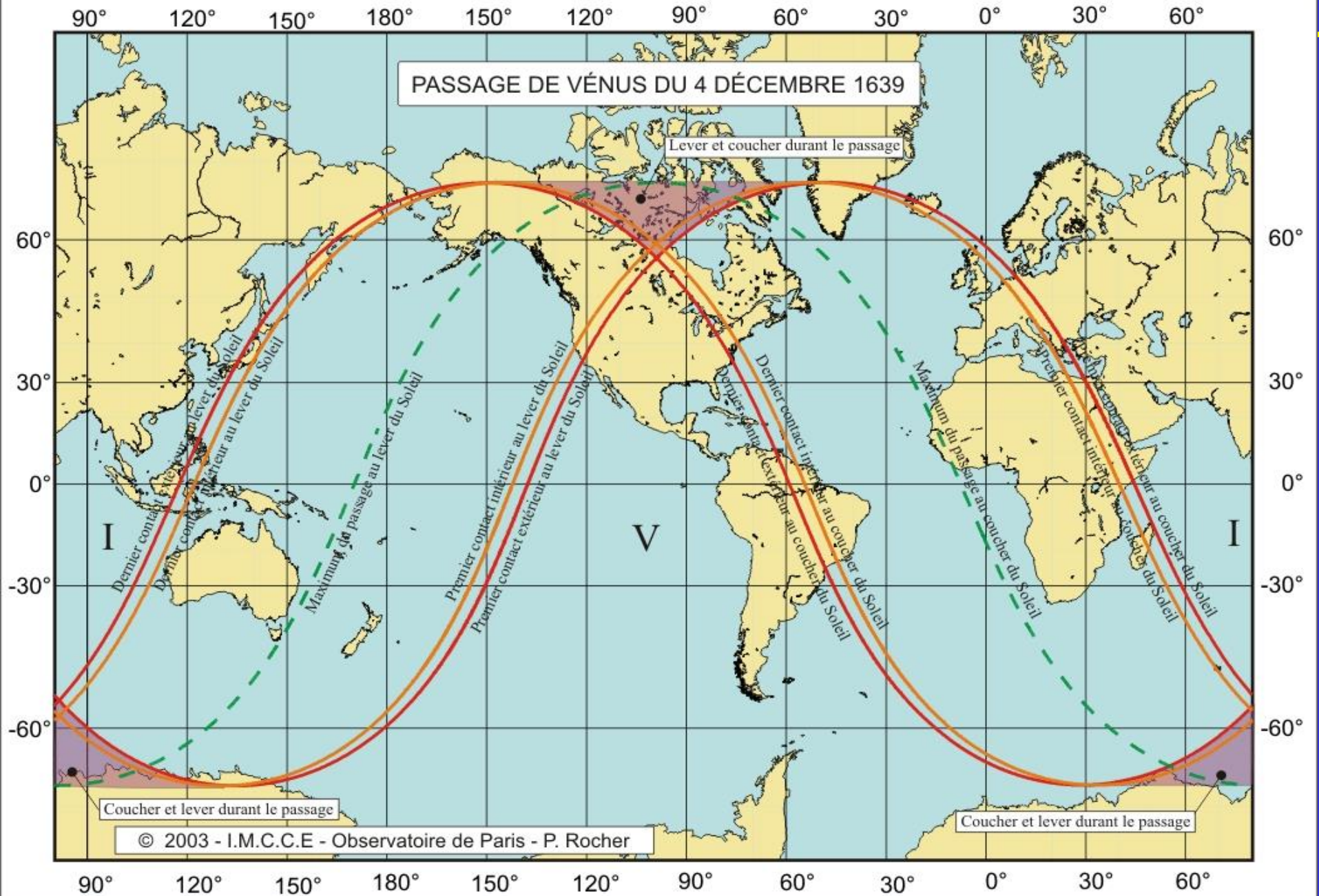
Le passage de Vénus devant le Soleil



1639: Horrocks confirme les lois de Kepler

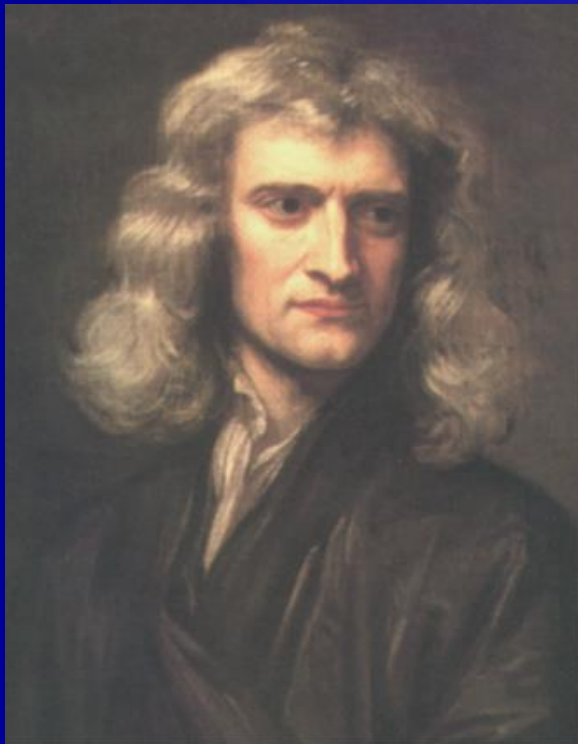


Un passage difficilement visible en Europe



Le XVIIIème siècle: Newton et Laplace

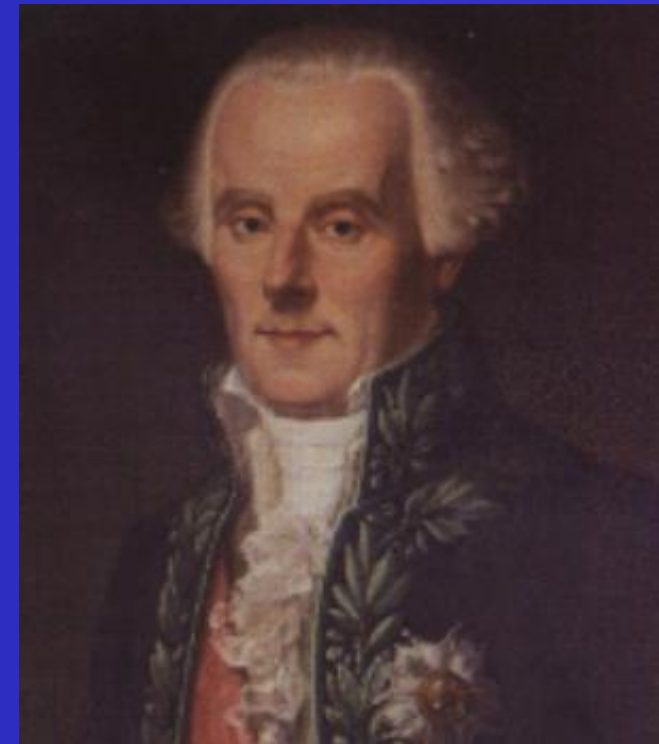
- Ce que Galilée et Kepler auront pressenti sera démontré par Newton et Laplace
- La mécanique céleste va tout expliquer pendant plusieurs siècles
- Le modèle d'univers permettra de prévoir les mouvements des astres, les marées, l'aplatissement de la Terre, ...



Newton (1642-1727)



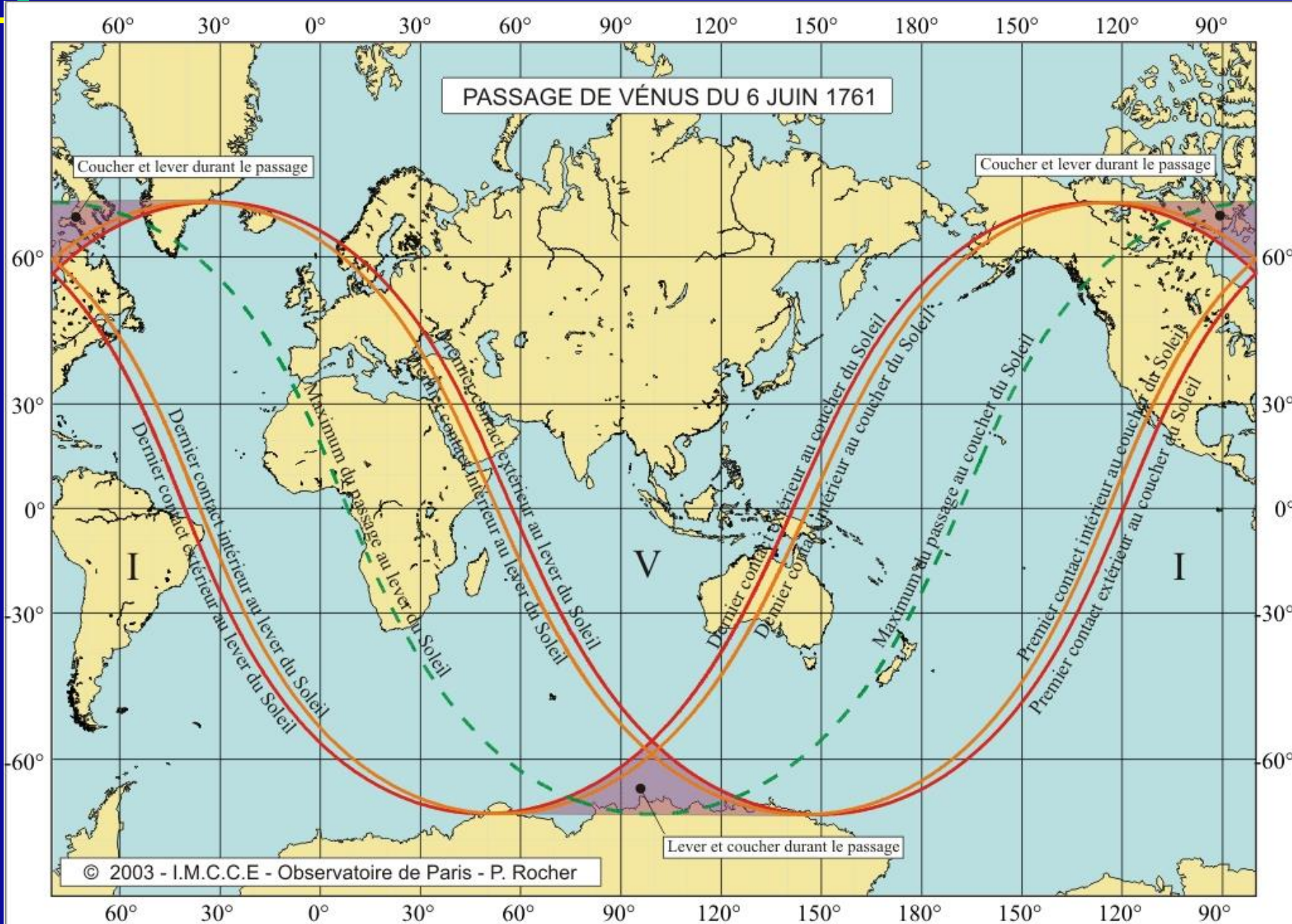
Halley (1656-1742)



Laplace (1749-1827)

En 1716, Halley propose d'observer le prochain passage de Vénus de 1761 pour mesurer la distance Terre-Soleil

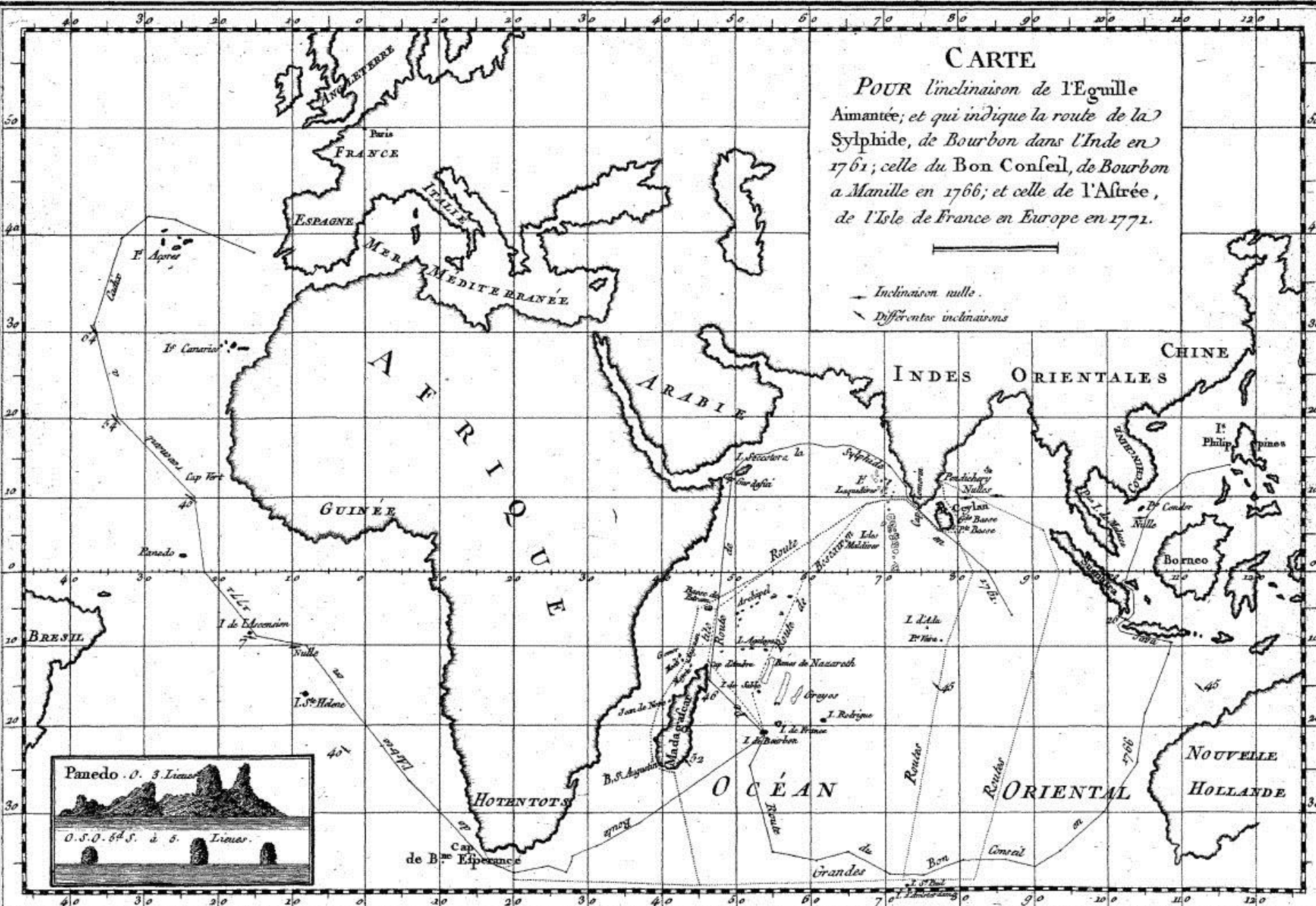
XVIIIème siècle: la mobilisation générale



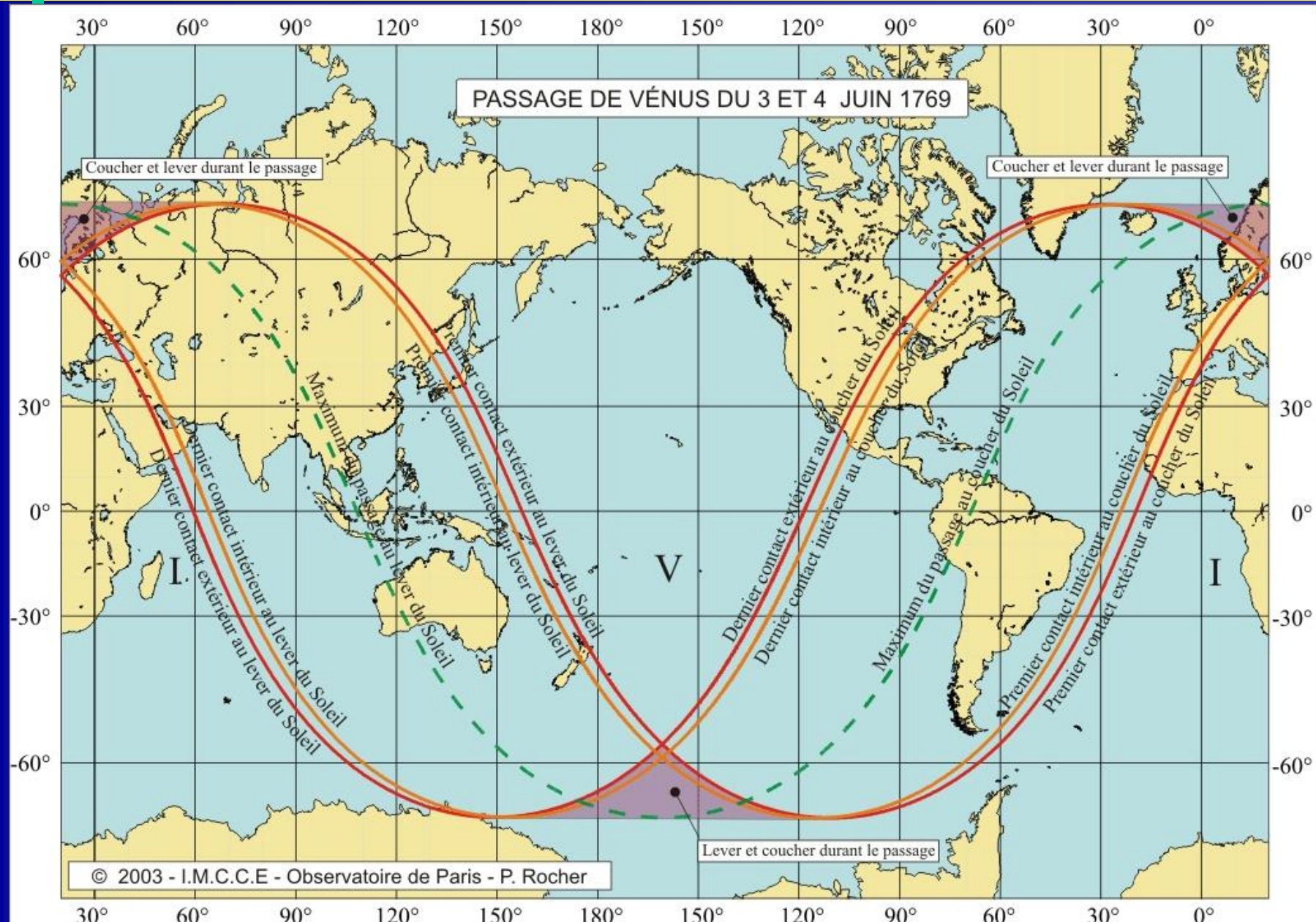
Le passage de 1761: la guerre de 7 ans (1756-1763)



Des astronomes explorateurs



La nécessité de voyages lointains

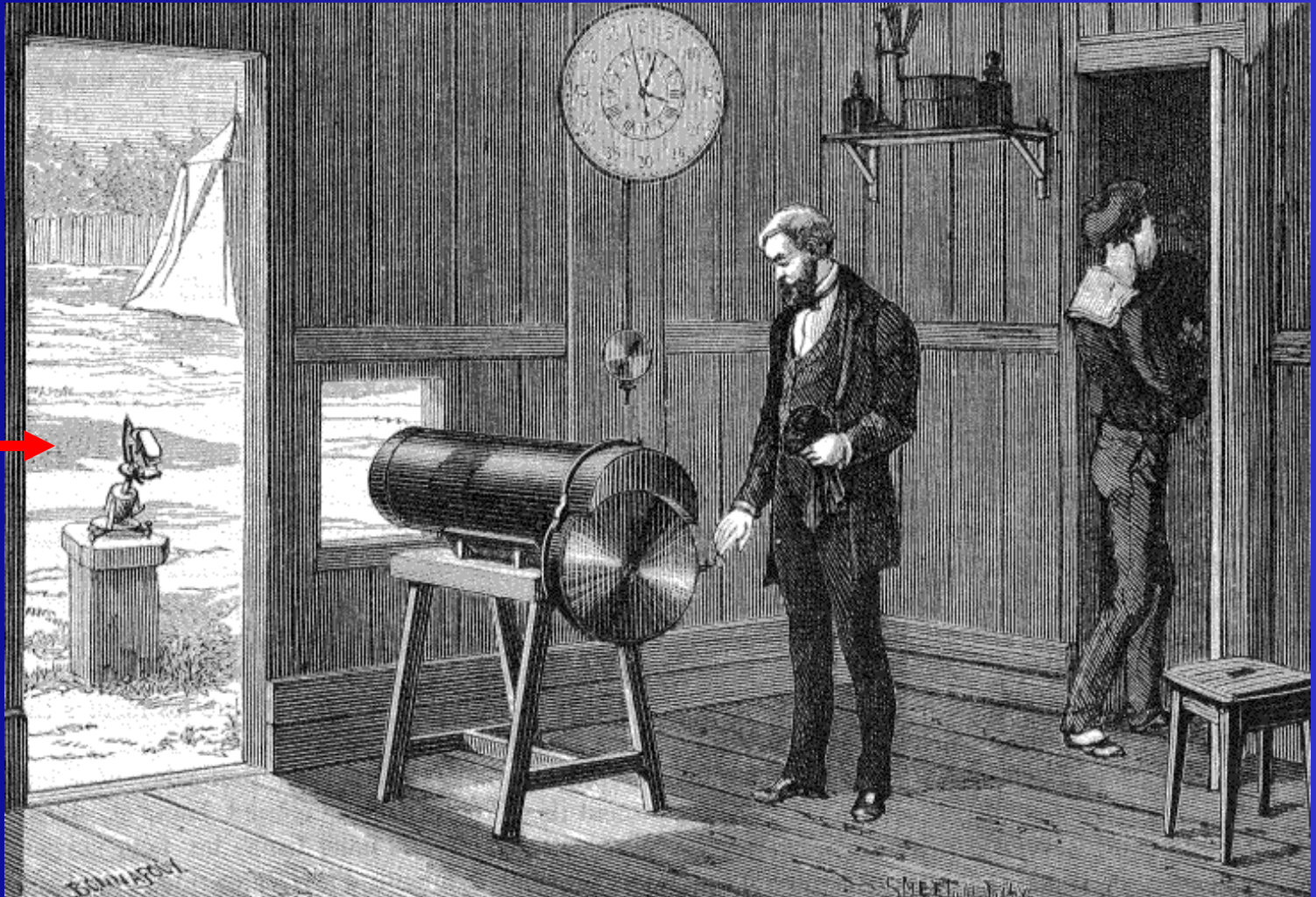


Le passage de 1769

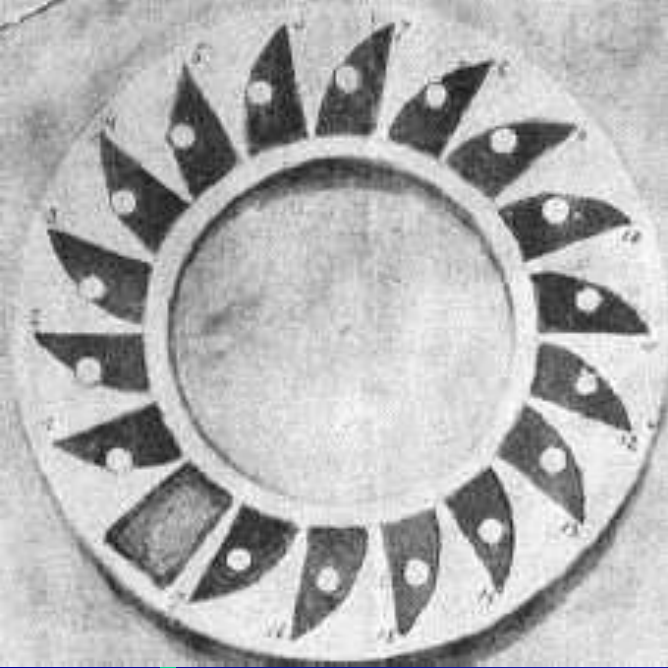


Le capitaine Cook à Tahiti à « Point Venus »

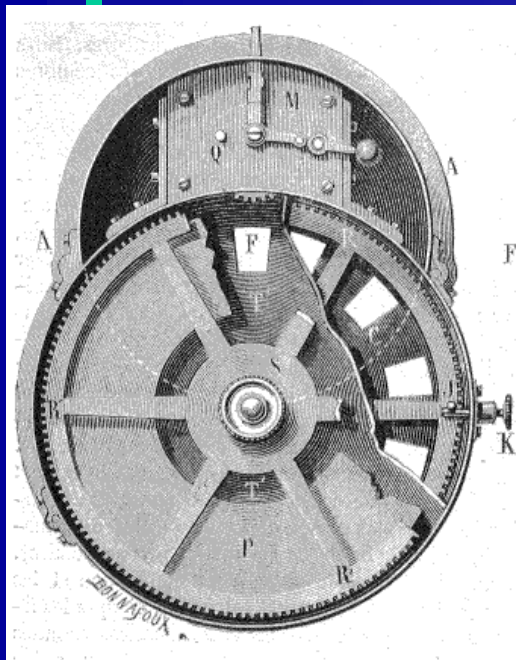
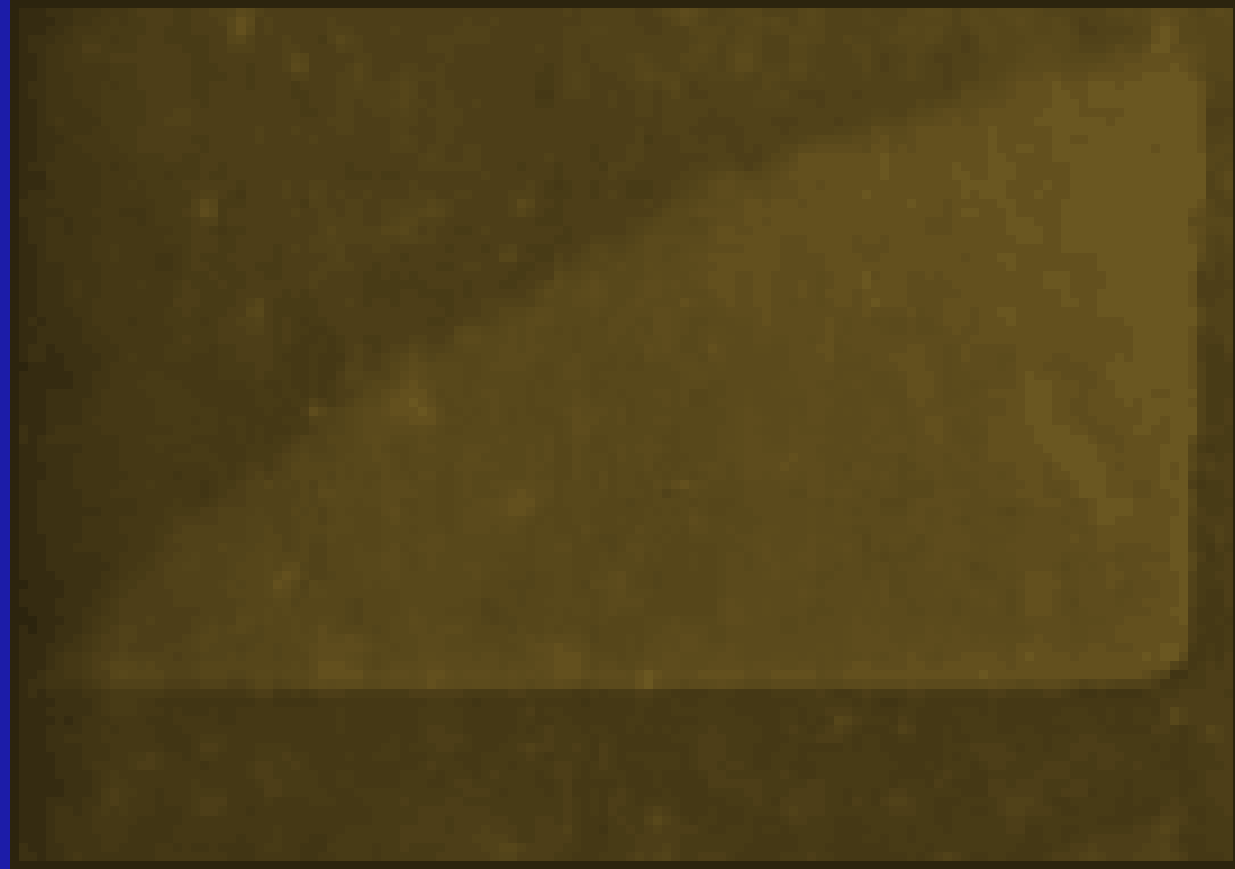
Au XIXème siècle: l'avènement de la technique



L'invention du sidérostas par Léon Foucault est désormais utilisée par les astronomes pour capter les rayons solaires



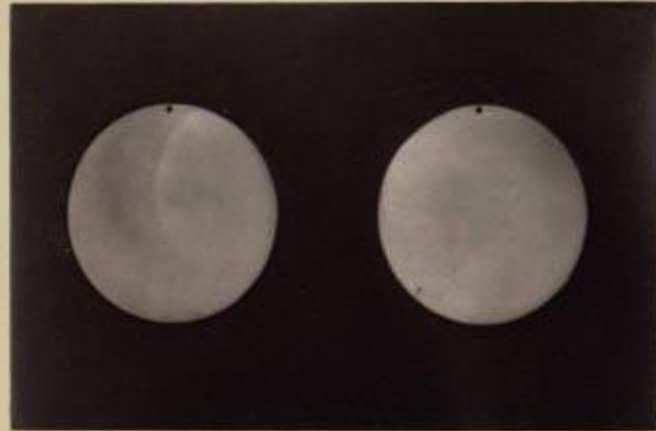
Observation de 1874 au Japon par Janssen



Les daguerréotypes du XIXème siècle

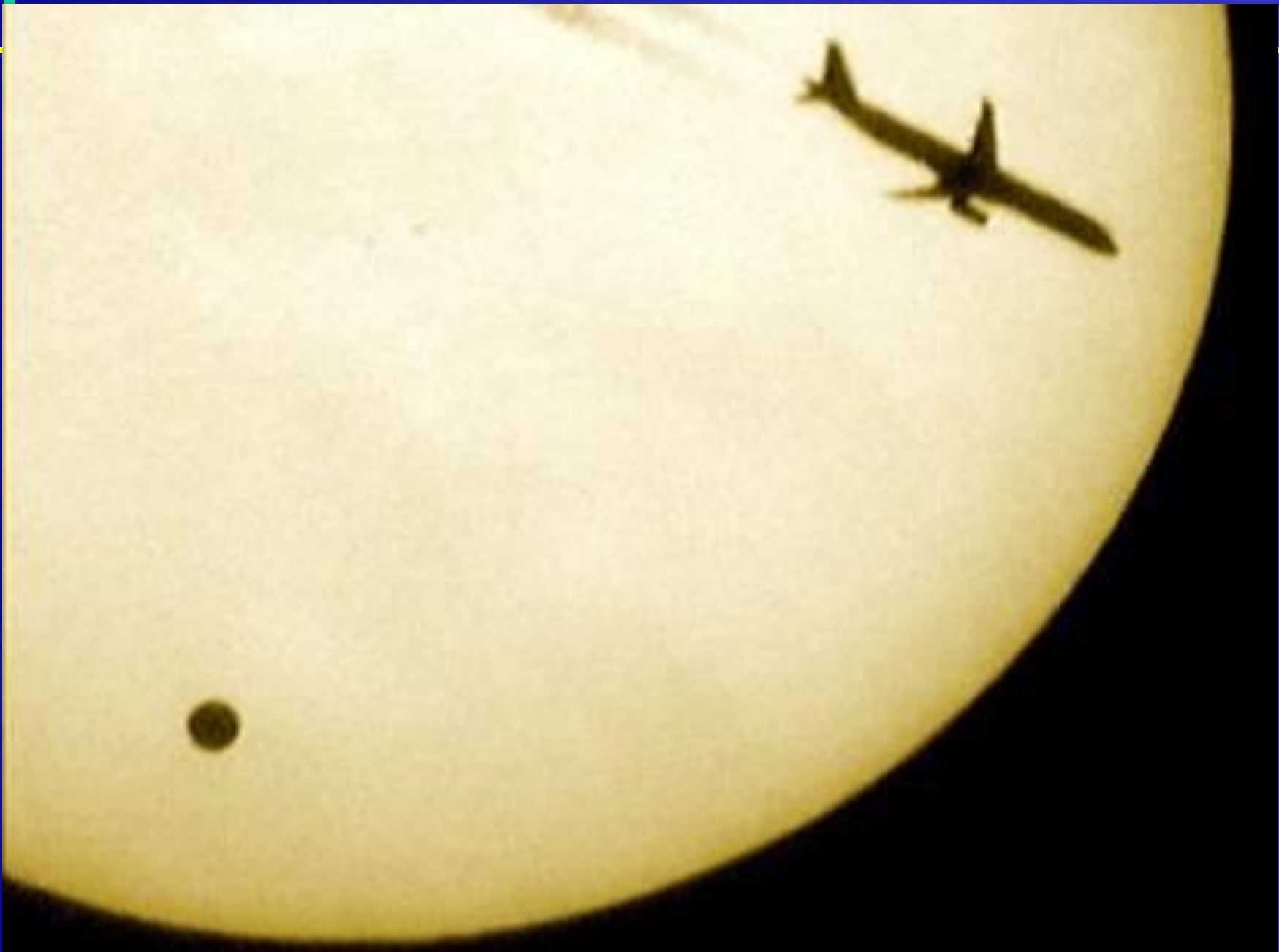
Passage de Vénus. Mission de l'île St-Paul.

T. II. 1^{re} Partie Pl. 16 (Astronomie)

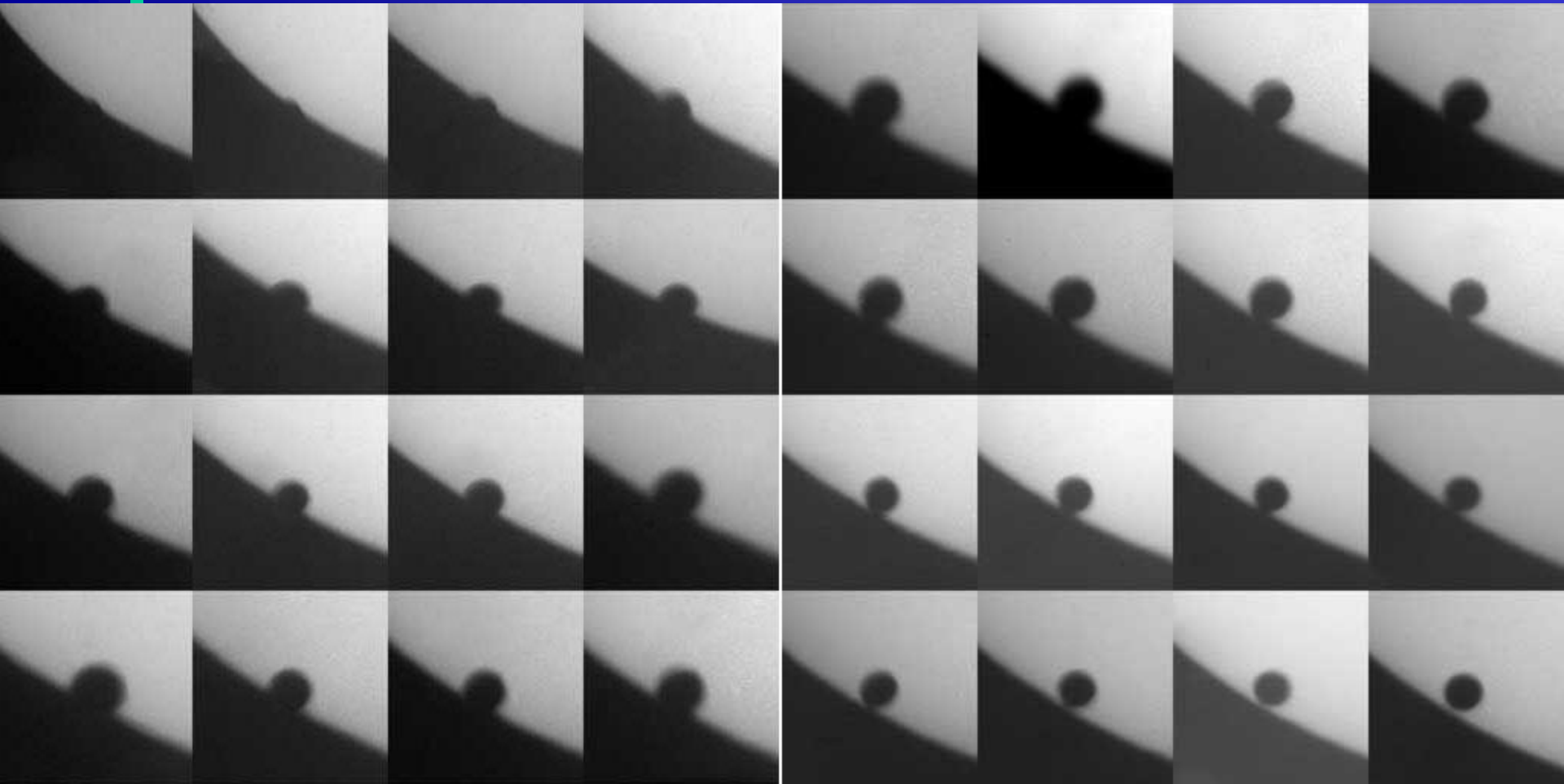


Reproduction en vraie grandeur de deux clichés photographiques du Soleil, obtenus avec l'appareil de la Commission du Passage de Vénus.

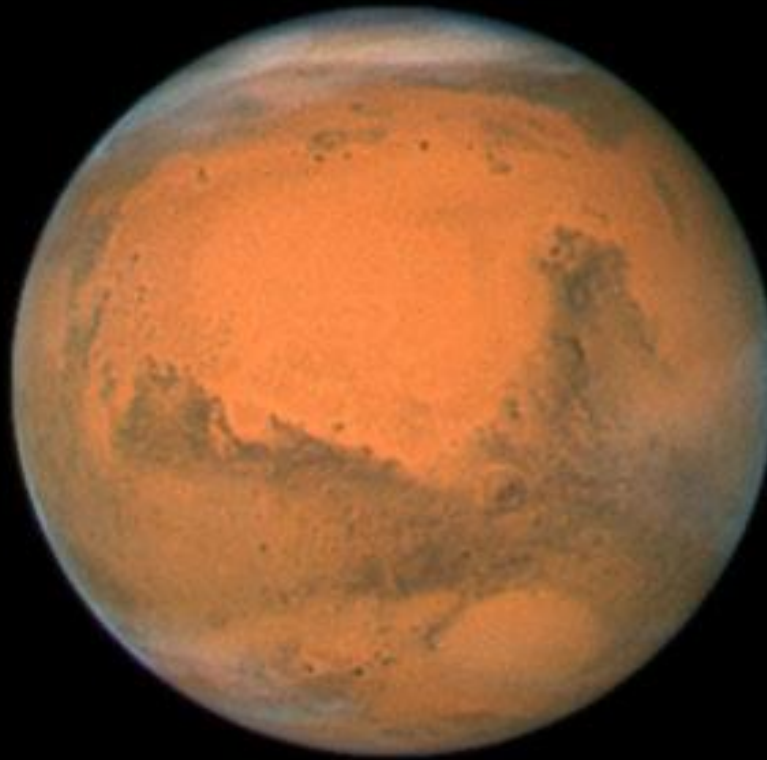
Le passage de Vénus en 2004



Les passages de Vénus en 2004 et 2012



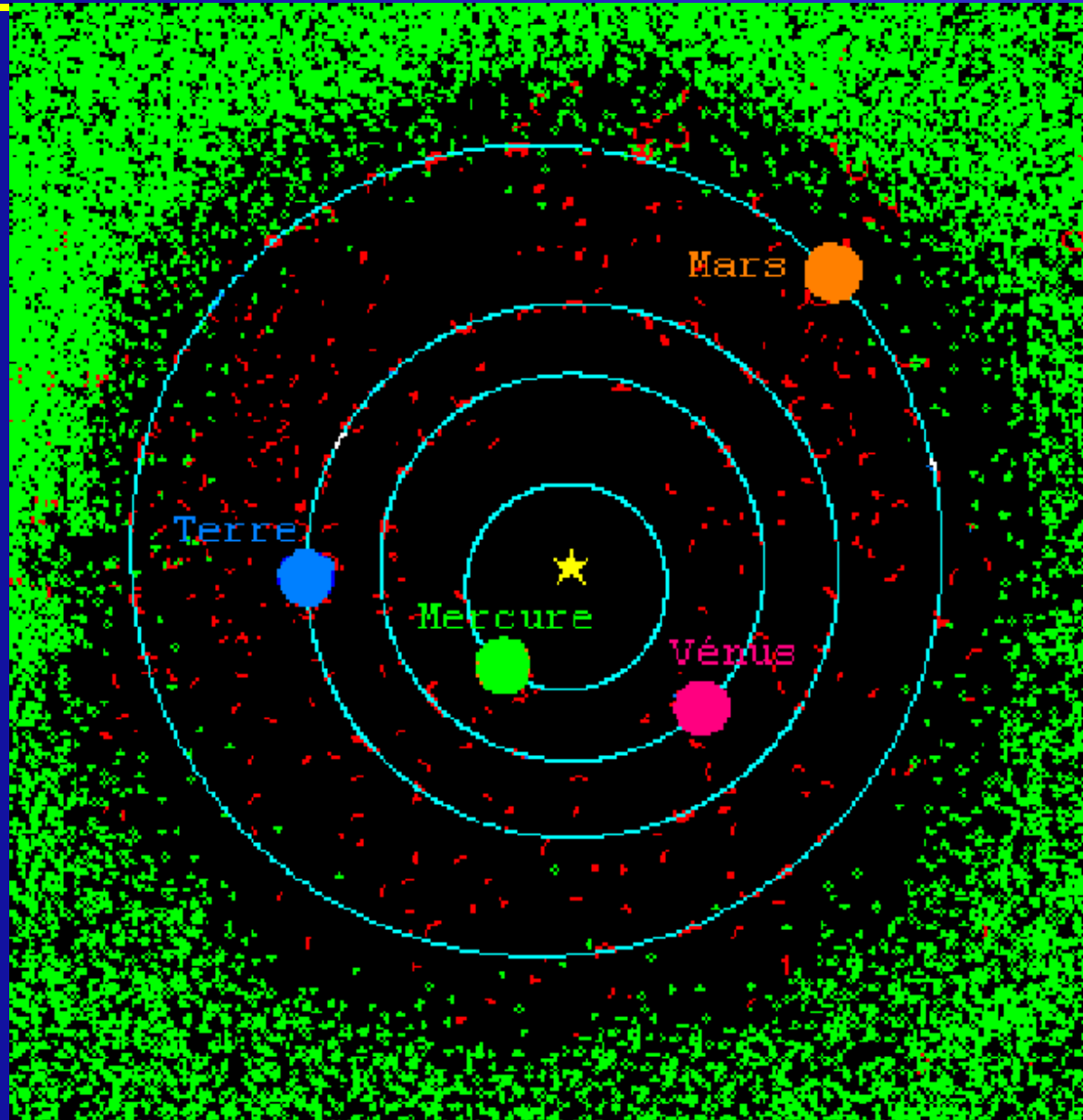
Mars est accessible par radar: sa distance est connue à quelques mètres près et donc toutes les distances dans le système solaire grâce aux lois de Képler



Utilisation de Viking pour localiser la planète Mars



Il y a d'autres « planètes » proches de la Terre



L'unité astronomique

Epoque	ua en km	Diff. à la « vraie » ua	Méthode
1639	94 000 000	55 597 871	Vénus: Horrocks
1672	135 000 000	14 597 871	Mars
1761	138 540 000	11 057 871	Vénus: Pingré & Short
1761 & 1769	151 000 000	1 402 129	Vénus: Lalande & Pingré
1862	149 000 000	597 871	Mars
1875	148 000 000	1 597 871	Flora
1874 & 1882	149 670 000	72 129	Vénus: Newcomb
1885	150 000 000	402 129	Mars
1900	149 400 000	197 871	Eros
1930	149 700 000	102 129	Eros
1970	149 597 800	71	Mars: radar
2000	149 597 870,691	référence	Mars: sonde Viking+radar
2004	149 608 708	10 838	Vénus: « VT-2004 »

Définitions de l'unité astronomique

La distance Terre-Soleil dépend du mouvement de la Terre

Introduire une définition indépendante de la Terre

L'unité astronomique est le demi grand axe de l'orbite d'un corps de masse négligeable non perturbée dont le moyen mouvement est égal à k radians par jour (k : constante de Gauss)

$$k \text{ (radian/jour)} = 0.01720209895 \text{ ua}^{3/2} \text{ d}^{-1} \text{ S}^{-1/2}$$

$$k = 0.985607668601425 \text{ deg/jour}$$

La distance Soleil-Terre reste donc une inconnue

Aujourd'hui: **une unité astronomique = 149 597 870 700 mètres**

Ce qui revient à considérer désormais la constante de la gravitation universelle comme une inconnue

Et les étoiles?



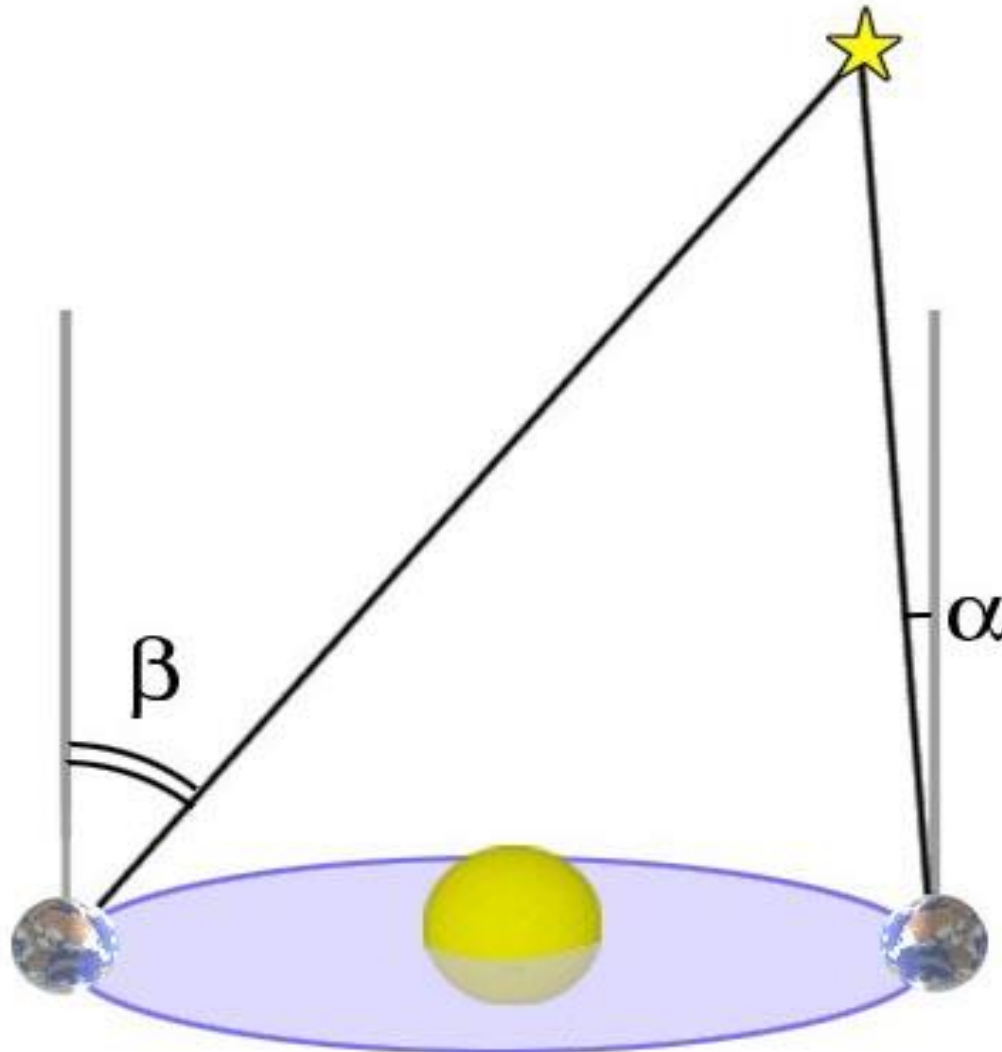
Quelques définitions

- 1 UA (Unité Astronomique) = 150 millions de km
= distance moyenne Terre-Soleil
- 1 année lumière = distance parcourue par la lumière en 1 année $\approx 10^{16}$ m
- 1 pc (parsec) = distance d'une étoile dont la parallaxe est 1 seconde de degré = 3,25 année lumière = $3,09 \cdot 10^{16}$ m
- 1 kpc = 10^3 pc
- 1 Mpc = 10^6 pc

Quelques exemples de distances: le problème change de nature

	<i>Distance à partir de la Terre</i>
Lune	1,3 seconde-lumière
Soleil	8 minutes-lumière
Pluton	5,5 heures-lumière
Proxima du Centaure	4 années-lumière
Centre de la Voie Lactée	26 000 années-lumière
Nuages de Magellan	150 000 années-lumière = 50 kpc
Galaxie d'Andromède (Messier 31)	2,6 millions d'années-lumière
Amas de galaxies de la constellation de Coma	330 millions d'années-lumière
Horizon cosmologique (galaxies les plus éloignées)	14 milliards d'années-lumière

La distance des étoiles:
la parallaxe annuelle pour les étoiles proches
(d'où l'importance de l'unité astronomique)



Pour aller plus loin, distinguons les différents types d'astres



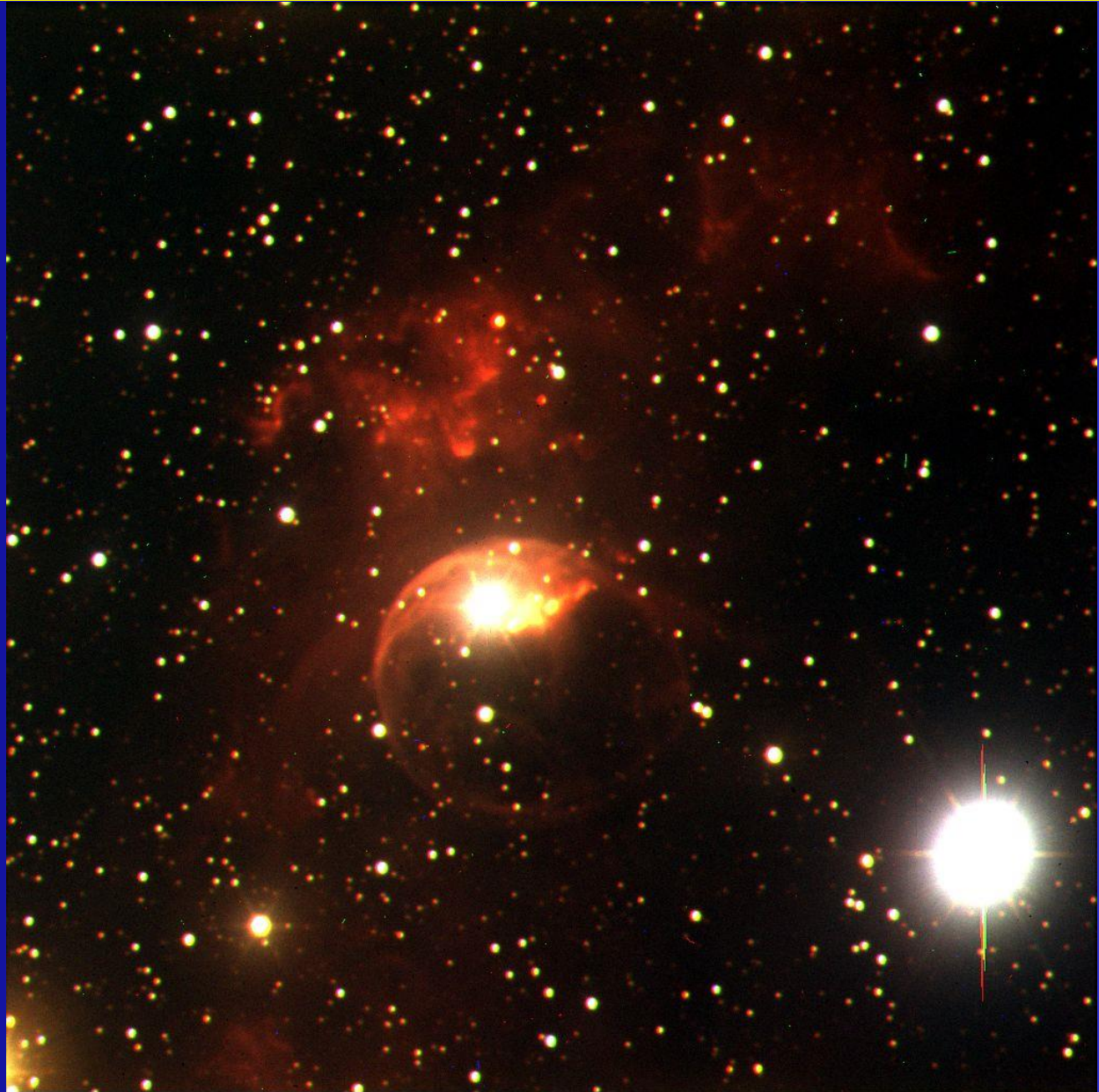
Observons et classons les objets

Les étoiles



L'étoile double « Mu »
de la constellation du Bouvier:
les étoiles brillantes sont-elles plus
proches que les étoiles faibles?

Nébuleuse NGC 7635: où sont les nébuleuses?



Les galaxies (comme la Voie Lactée): des milliards d'étoiles:
ce n'est qu'en 1920 que l'on comprend l'existence des galaxies...



Hipparcos



L'observation des positions
les étoiles depuis l'espace
permettra de mesurer la
distance de très nombreuses
étoiles et de « voir » la
galaxie en relief



10 kpc

1000 million objects
measured to $l = 20$

20 kpc

>20 globular clusters
Many thousands of Cepheids and RR Lyrae

Horizon for proper motions
accurate to 1 km/s

Mass of galaxy from
rotation curve at 15 kpc

Sun

30 open clusters
within 500 pc

Dark matter in disc measured
from distances/motions of K giants

Horizon for detection of
Jupiter mass planets (200 pc)

Dynamics of disc,
spiral arms, and bulge

Proper motions in LMC/SMC
individually to 2-3 km/s

Horizon for distances
accurate to 10 per cent

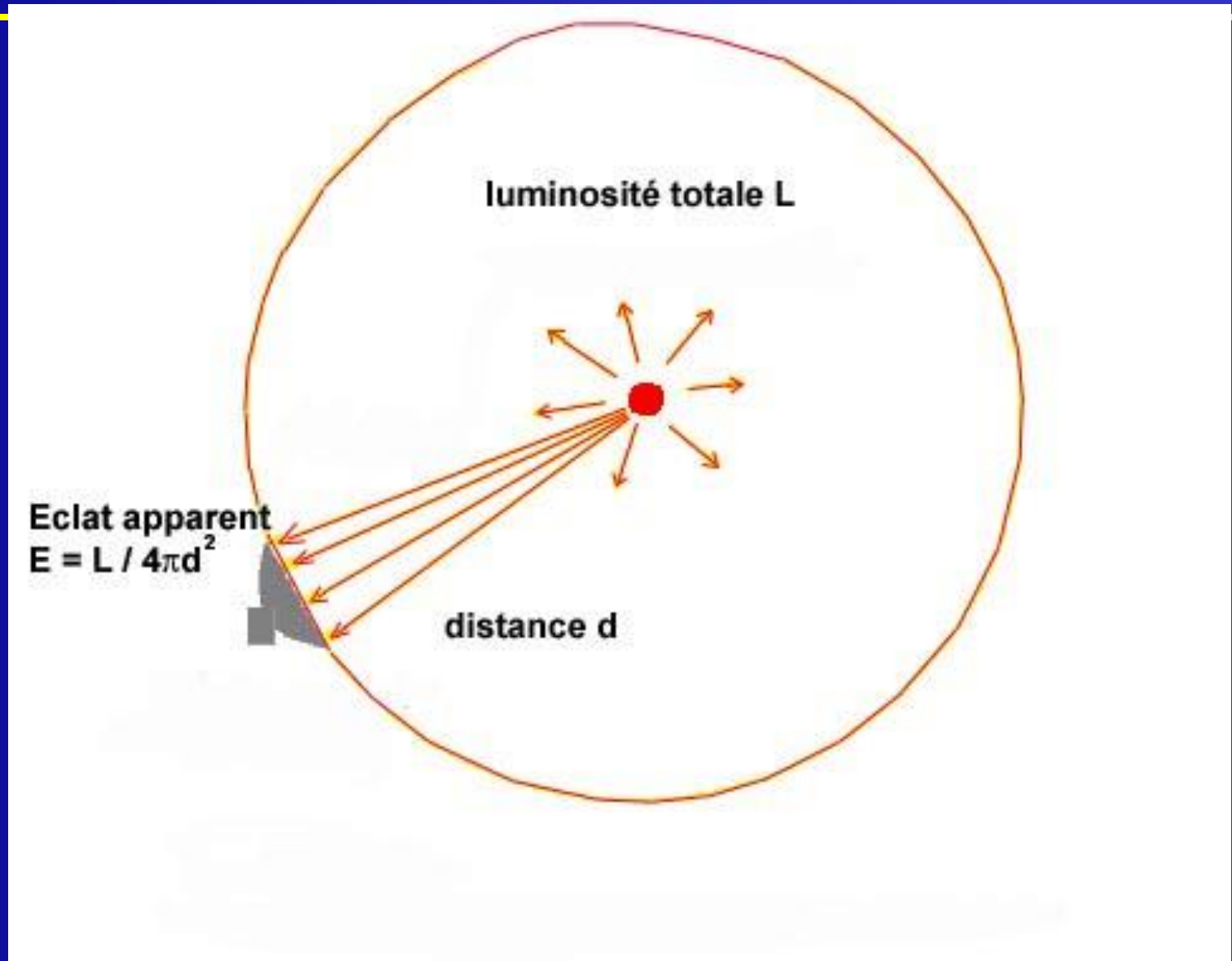
General relativistic light-bending determined to 1 part in 10^6

1 microarcsec/yr = 300 km/s at $z = 0.03$
(direct connection to inertial)

La mesure des distances

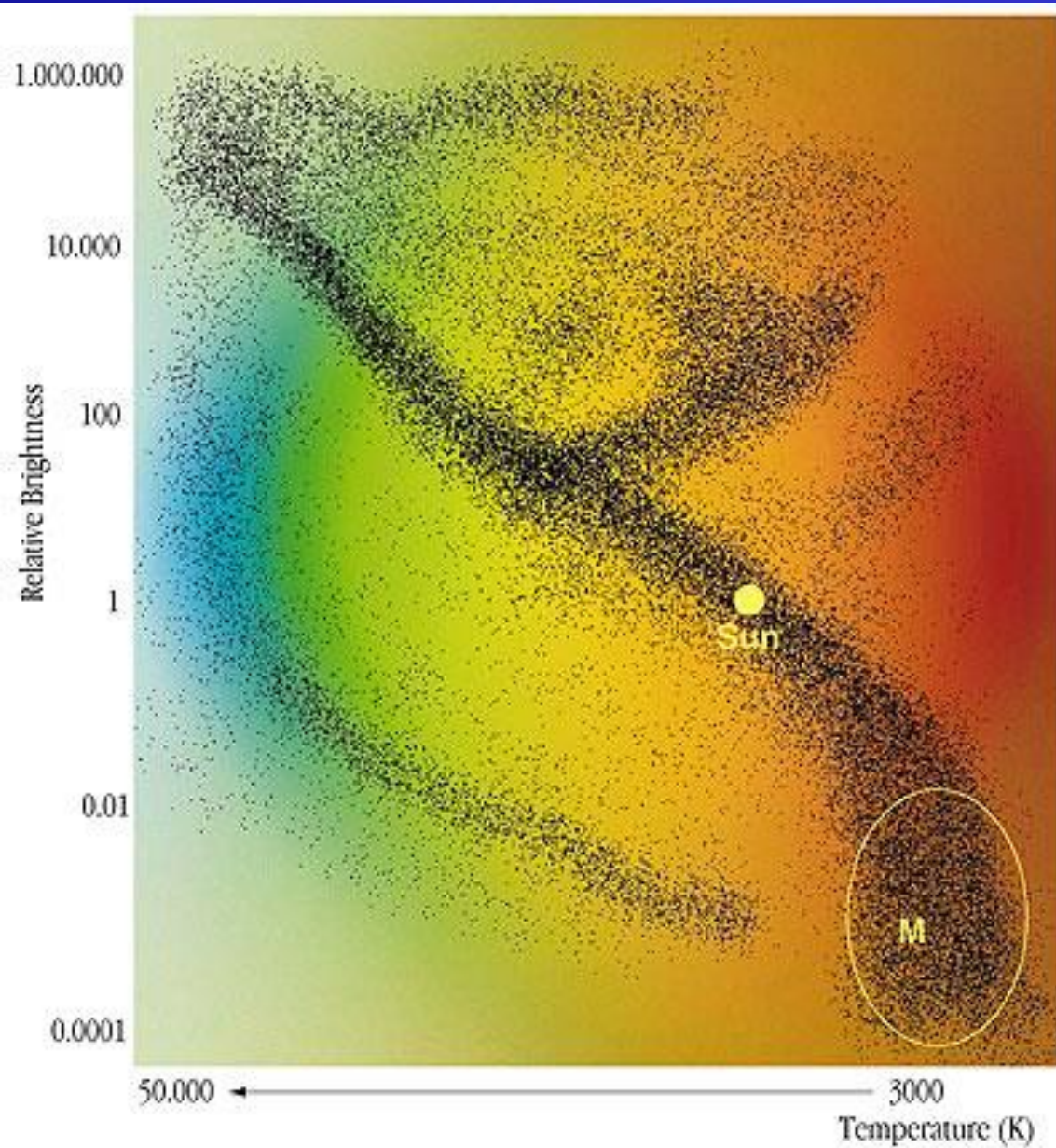
- On mesure la distance des étoiles proches (de notre Galaxie) par leur parallaxe
- Pour déterminer la distance des galaxies, on a ensuite construit une échelle de distances de proche en proche grâce à une succession d'indicateurs dans notre Galaxie d'abord, puis dans les galaxies proches
 - Indicateurs primaires : certains types d'étoiles variables : les Céphéides, les RR Lyrae, les novae
 - Indicateurs secondaires : les régions HII, les étoiles supergéantes, les amas globulaires
 - Indicateurs tertiaires : les diamètres et luminosités des galaxies

La luminosité des étoiles comme critère

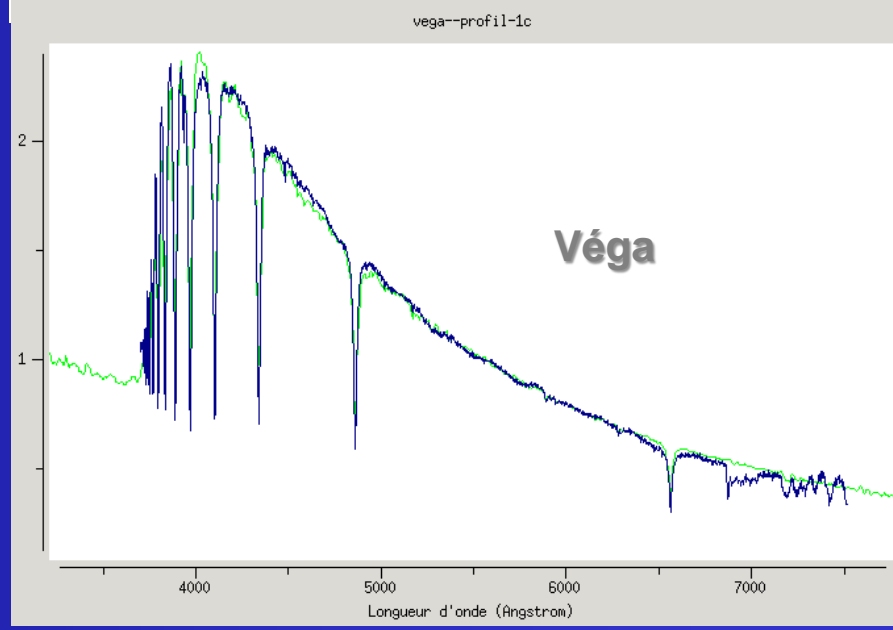
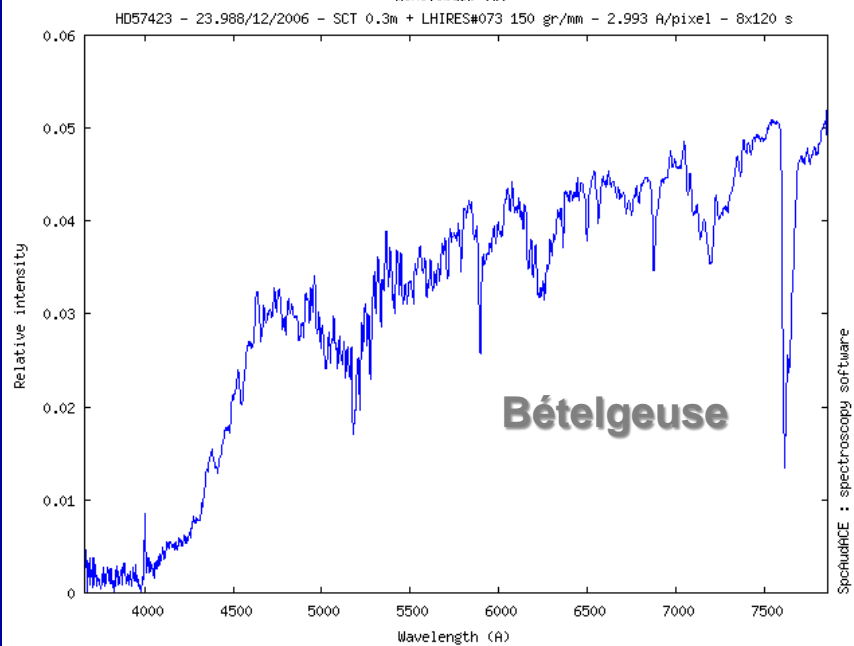
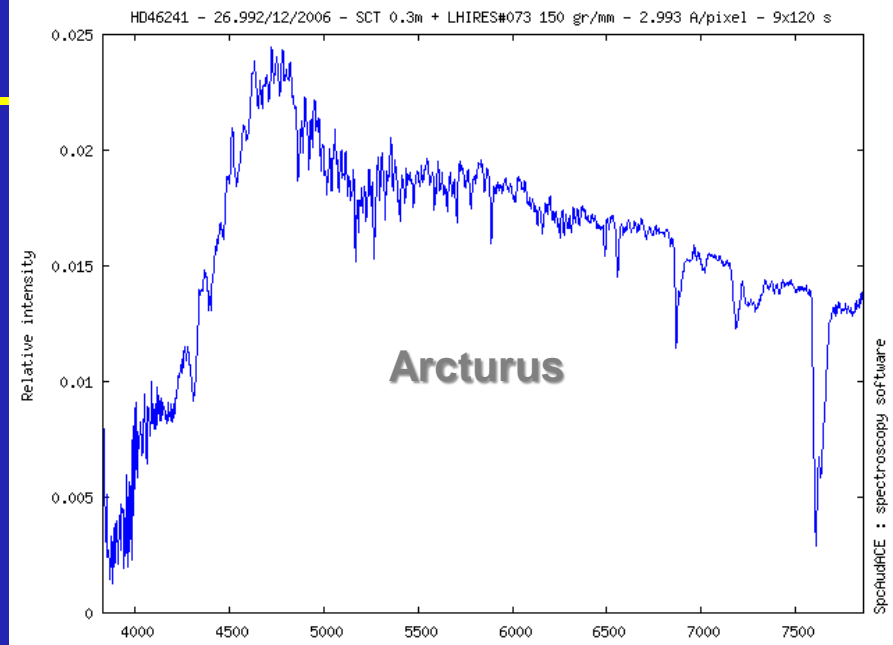
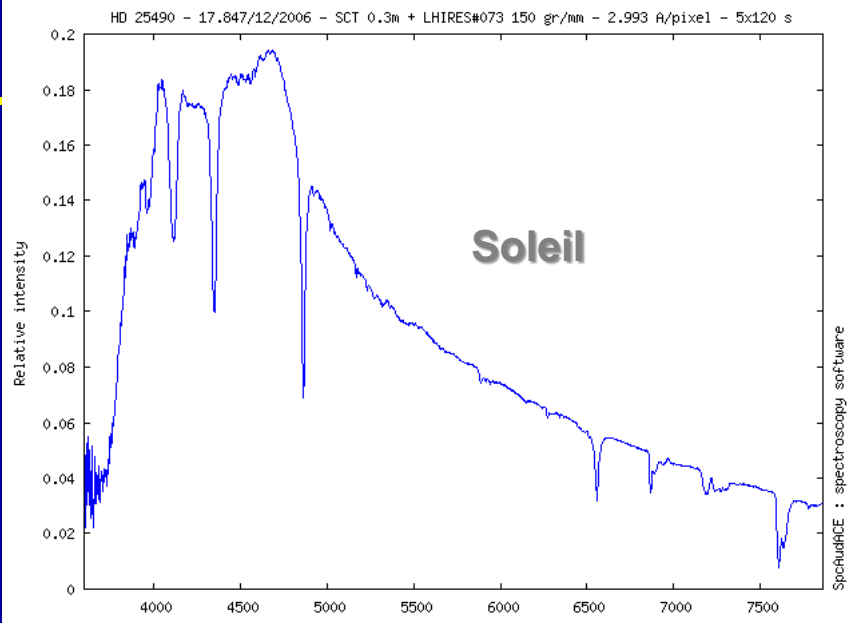




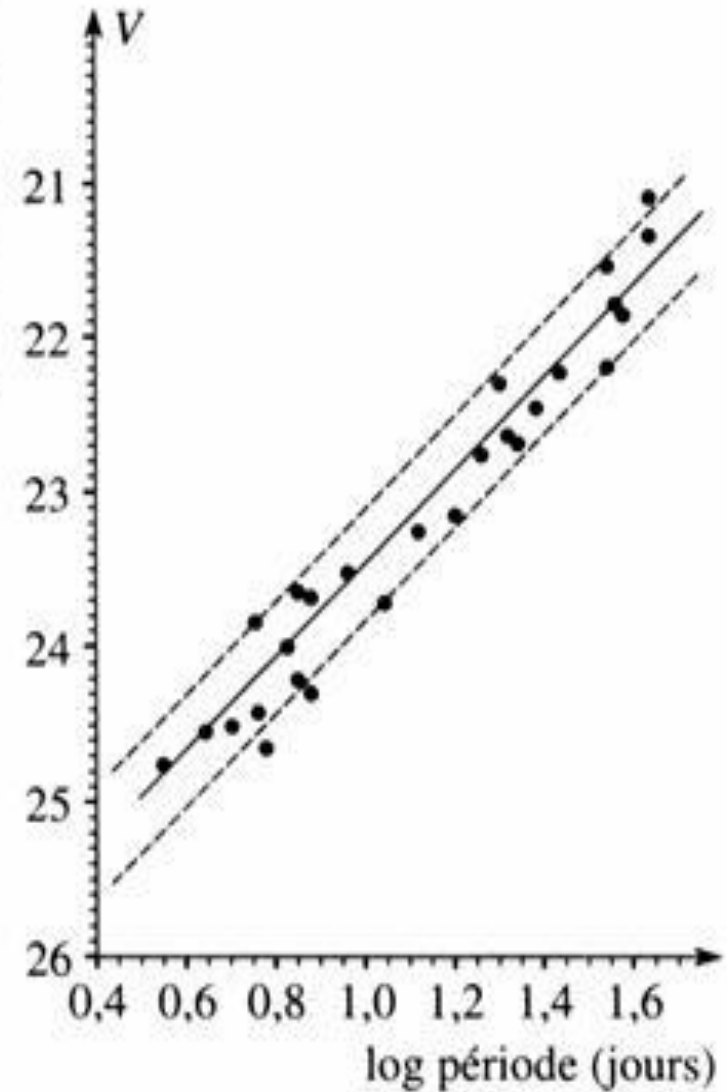
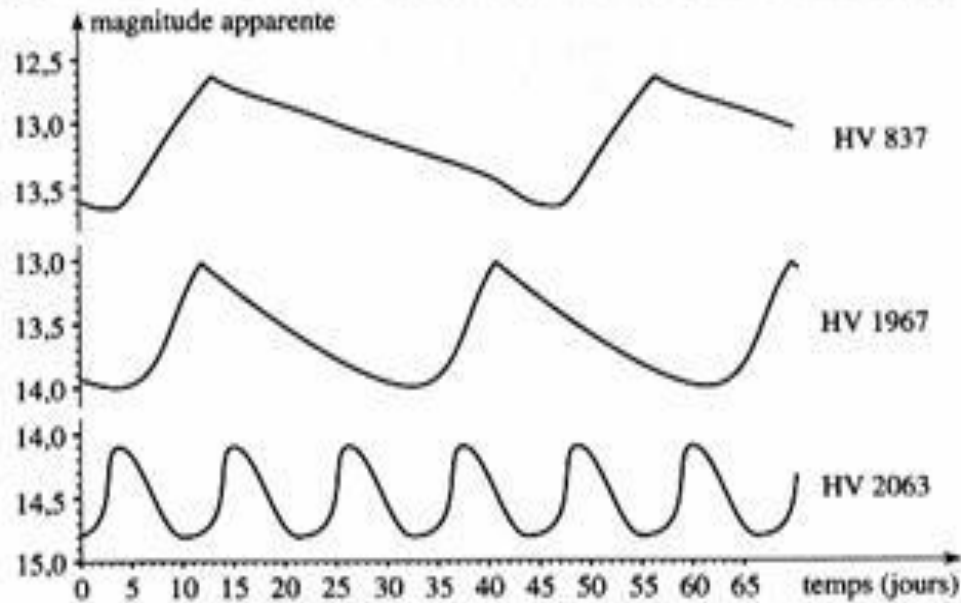
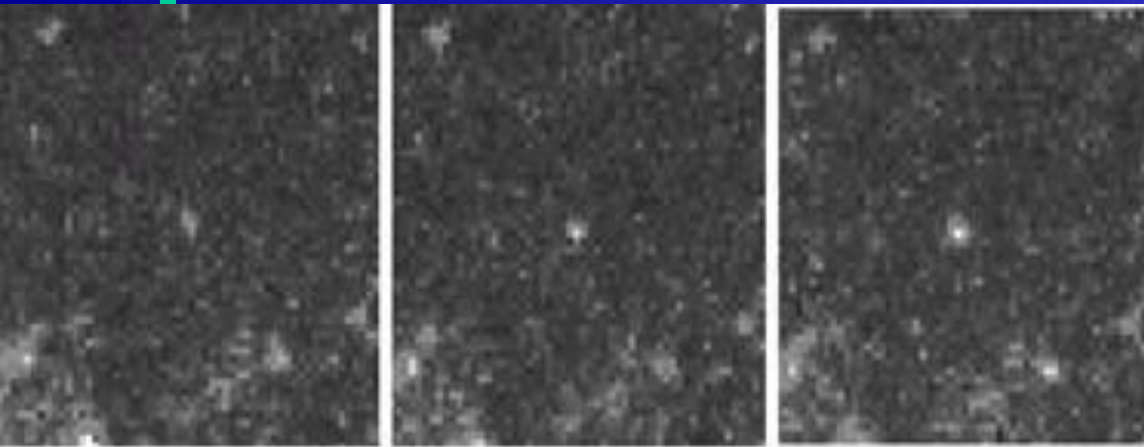
La classification des étoiles



The "Hertzsprung-Russell" Diagram of Stars



Des étoiles variables, les « céphéides »



Et les galaxies?

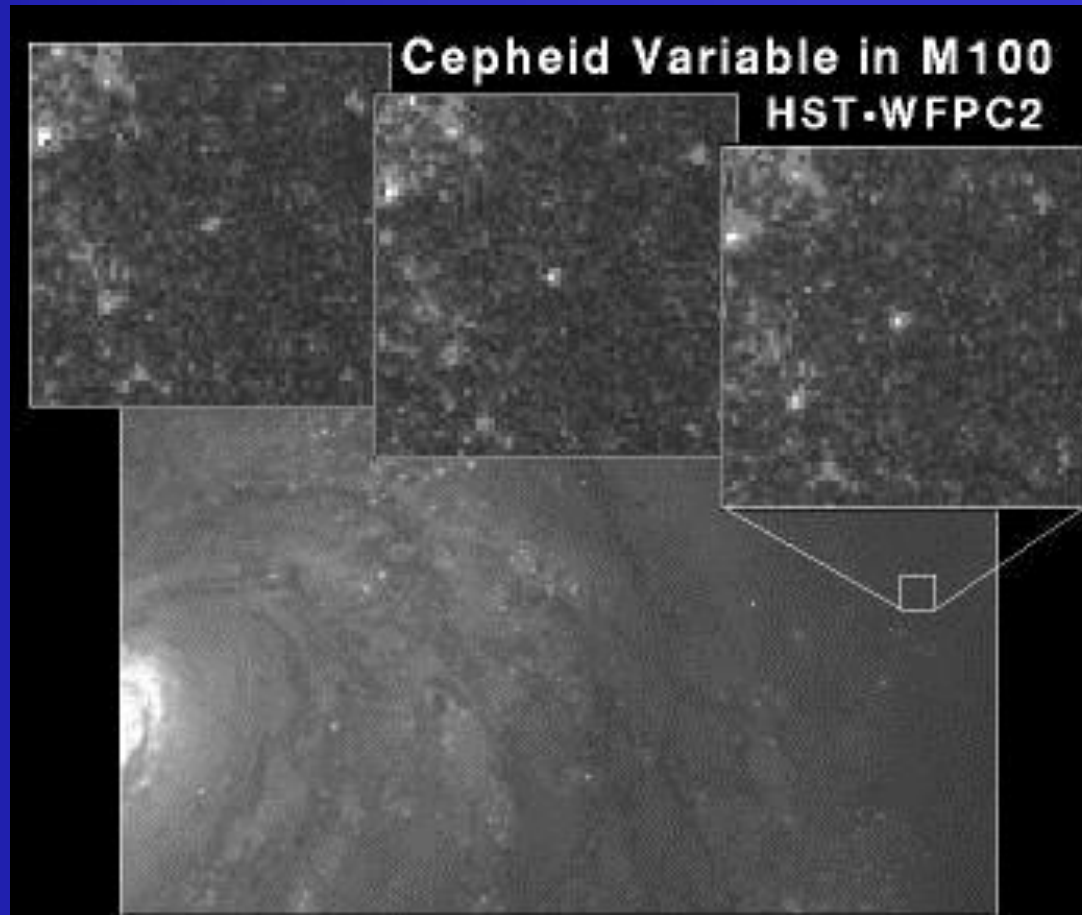
- On distingue très difficilement les étoiles individuellement

→ les étoiles variables
« céphéides » sont visibles
dans les galaxies proches

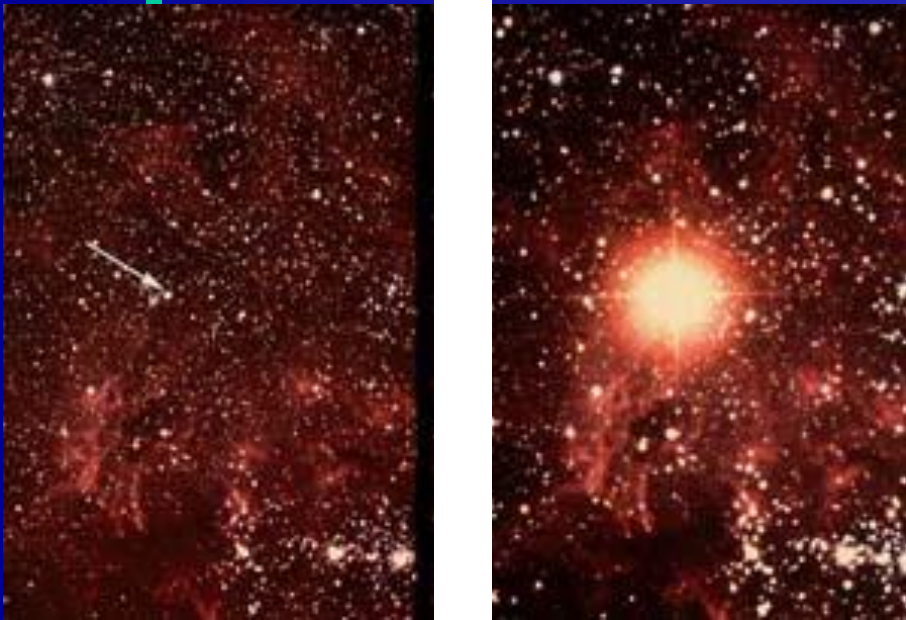
Si m est la mag apparente
alors

$$m - M = 5 \log D - 5$$

où D est la distance
en parsec



Et les galaxies?



→ les novae et les supernovae sont des étoiles en fin de vie très brillantes visibles dans les galaxies lointaines (une supernova par galaxie et par siècle)

Ainsi, la magnitude absolue des SNIa au maximum de leur éclat est -19.5
En mesurant leur magnitude apparente au maximum d'éclat on en déduit leur distance.

Et les galaxies?



→ la rotation des galaxies donne une idée de leur taille et de leur distance. MAIS, ça ne colle pas vraiment bien!

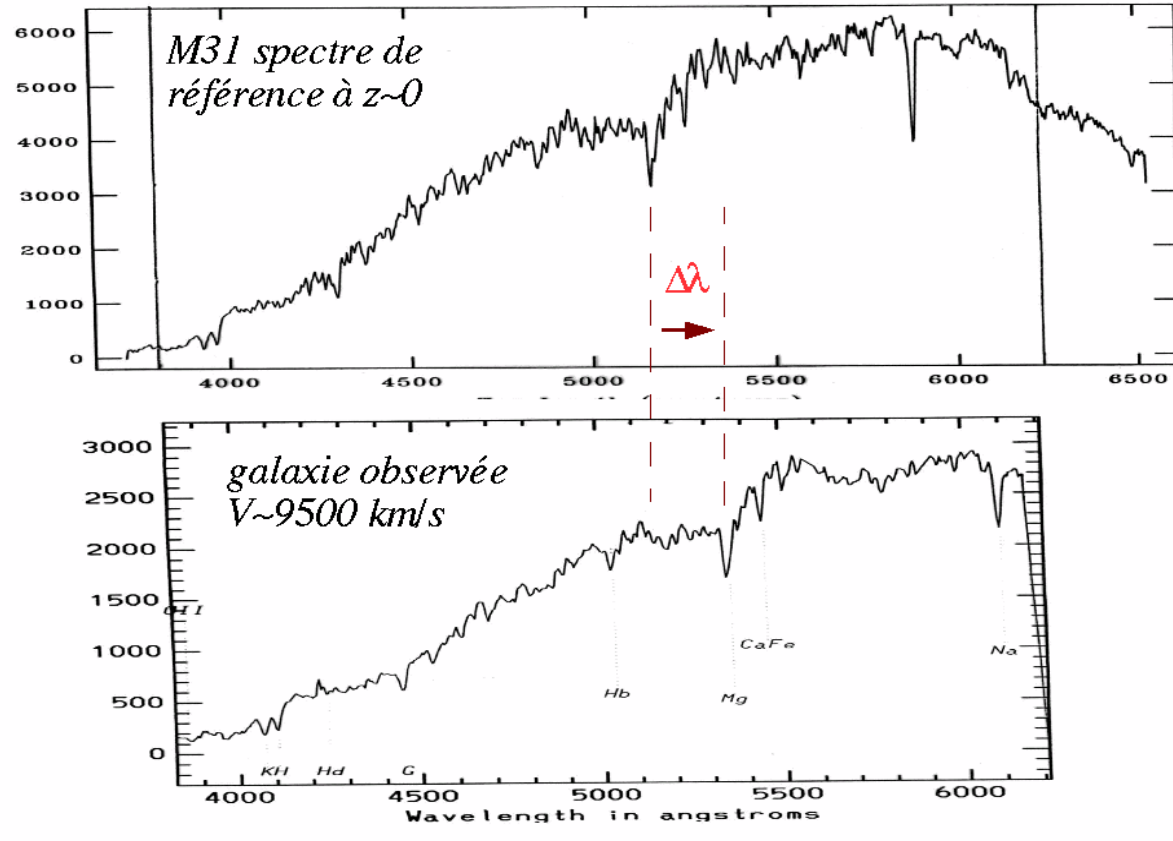
Toutes les étoiles tournent à la même vitesse...

→ matière noire

La fuite des galaxies: l'effet Doppler?

La mesure du redshift

$$z = V/c = \Delta\lambda/\lambda$$



→ le modèle d'univers qui prévoit l'expansion des galaxies va pouvoir servir à comparer les distances relatives des galaxies, même les plus éloignées. MAIS, l'expansion semble accélérer!

Un univers très vaste...

	km	temps de lumière
Lune	400 000	1 seconde
Soleil	150 millions	8 minutes
Jupiter	700 millions	40 minutes
Pluton	6 milliards	4 heures
Alpha du Centaure	40 000 milliards	4 années
Centre galactique	400 millions de milliards	35 000 années
Galaxie d'Andromède	12 milliards de milliards	1 million d'années
Galaxie très éloignée	120 000 milliards de milliards	10 milliards d'années
Horizon cosmologique	168 000 milliards de milliards	14 milliards d'années

La taille de l'univers?

- On ne mesure les distances que pour les objets que l'on voit...
- L'horizon est à 14 milliards d'années lumière
- Et pendant que la lumière voyageait jusqu'à nous, l'univers a évolué, il s'est agrandi...
- La taille de l'univers? De 50 milliards d'année lumière à...?
- Mais si l'univers a « une taille », il n'a pas de frontière! Il remplit tout l'espace...
- Rendez-vous au cours de cosmologie

Conclusion

- La quête n'est pas finie: la taille de l'univers est encore incertaine
 - Un modèle théorique d'univers est nécessaire:
 - Aristote
 - Ptolémée
 - Newton et l'héliocentrisme
 - La relativité générale
 - L'augmentation de la précision des mesures remet en cause les modèles admis
- c'est l'observation précise des distances qui confirme la validité d'un modèle qui nous permet d'aller plus loin
- nous n'aurons jamais que des représentations très imparfaites de l'univers