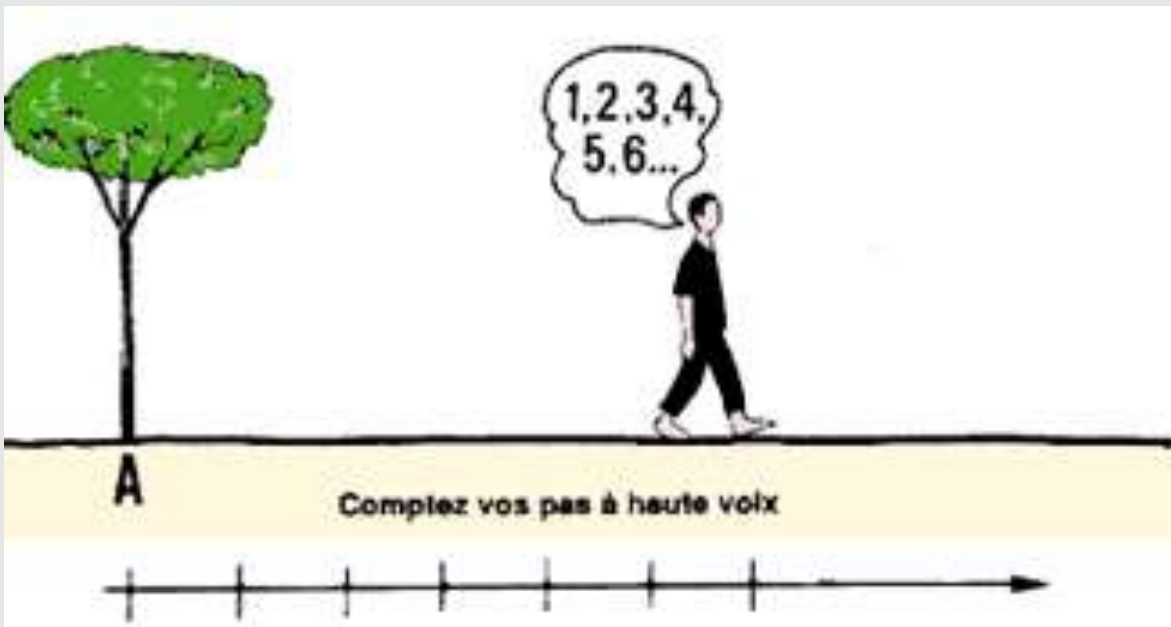


La mesure des distances dans l'univers

Cours de J.E. Arlot
SAPCB - juin 2023

Comment mesurer une distance?

La mesure d'une distance entre deux points se fait en comptant un nombre d'unités de mesure entre ces deux points. On peut tendre une ficelle entre deux points puis mesurer la longueur de la ficelle...



Comment mesurer une distance?

On utilise une unité: le mètre, le kilomètre, ...

On doit toujours évaluer une marge d'erreur: la **précision et l'exactitude de la mesure**

Précision: calculée à partir de l'écart entre des mesures successives

Exactitude: comparaison entre mesures faites indépendamment les unes des autres avec des méthodes différentes

Le ciel nocturne: la « voûte céleste »



Les étoiles nous paraissent être toutes à la même distance



Dragon

Grande Ours

Petite Ours

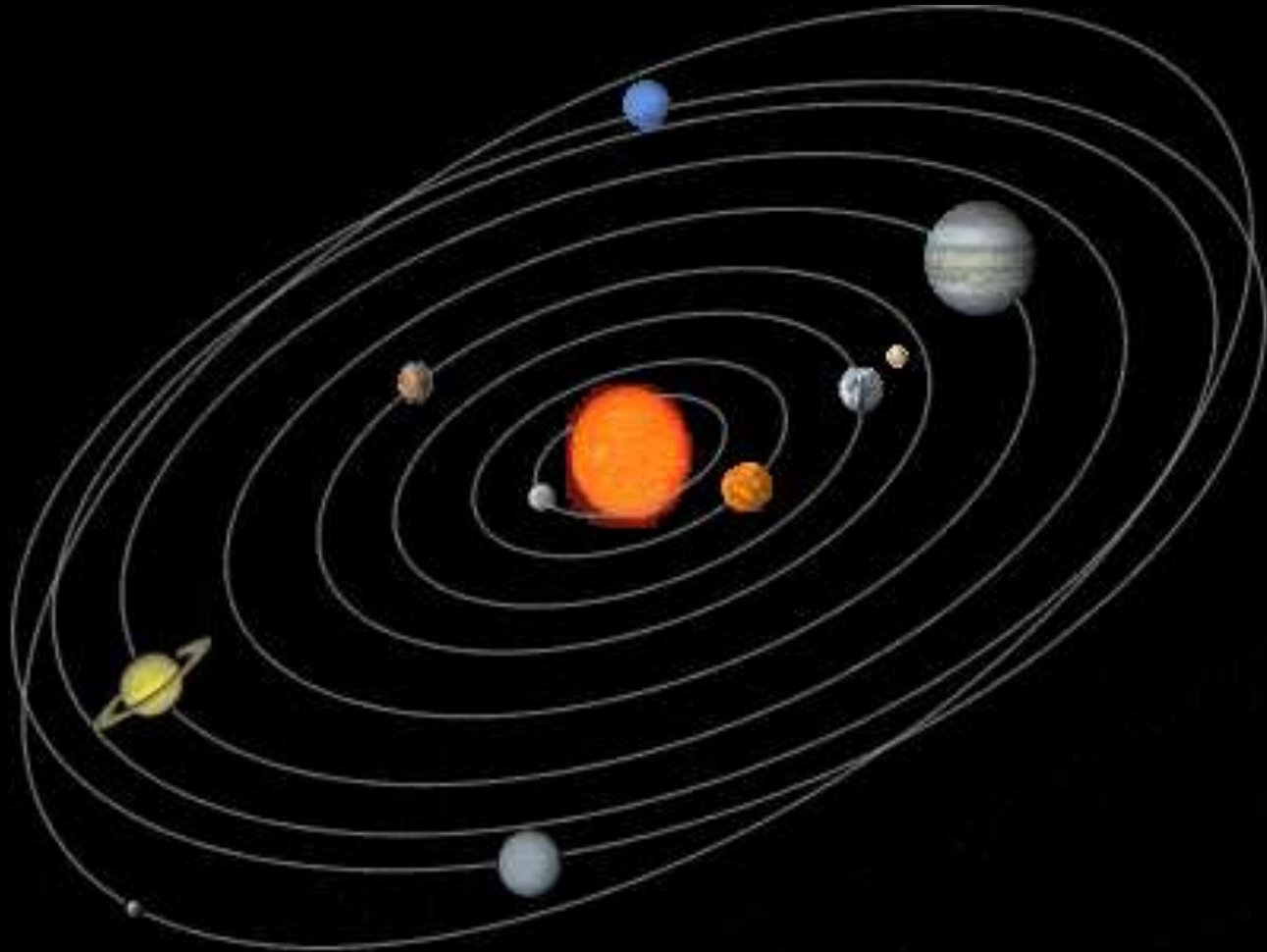
Polaris

Céphée

Cassiopée

Des constellations pour se repérer

Le système solaire

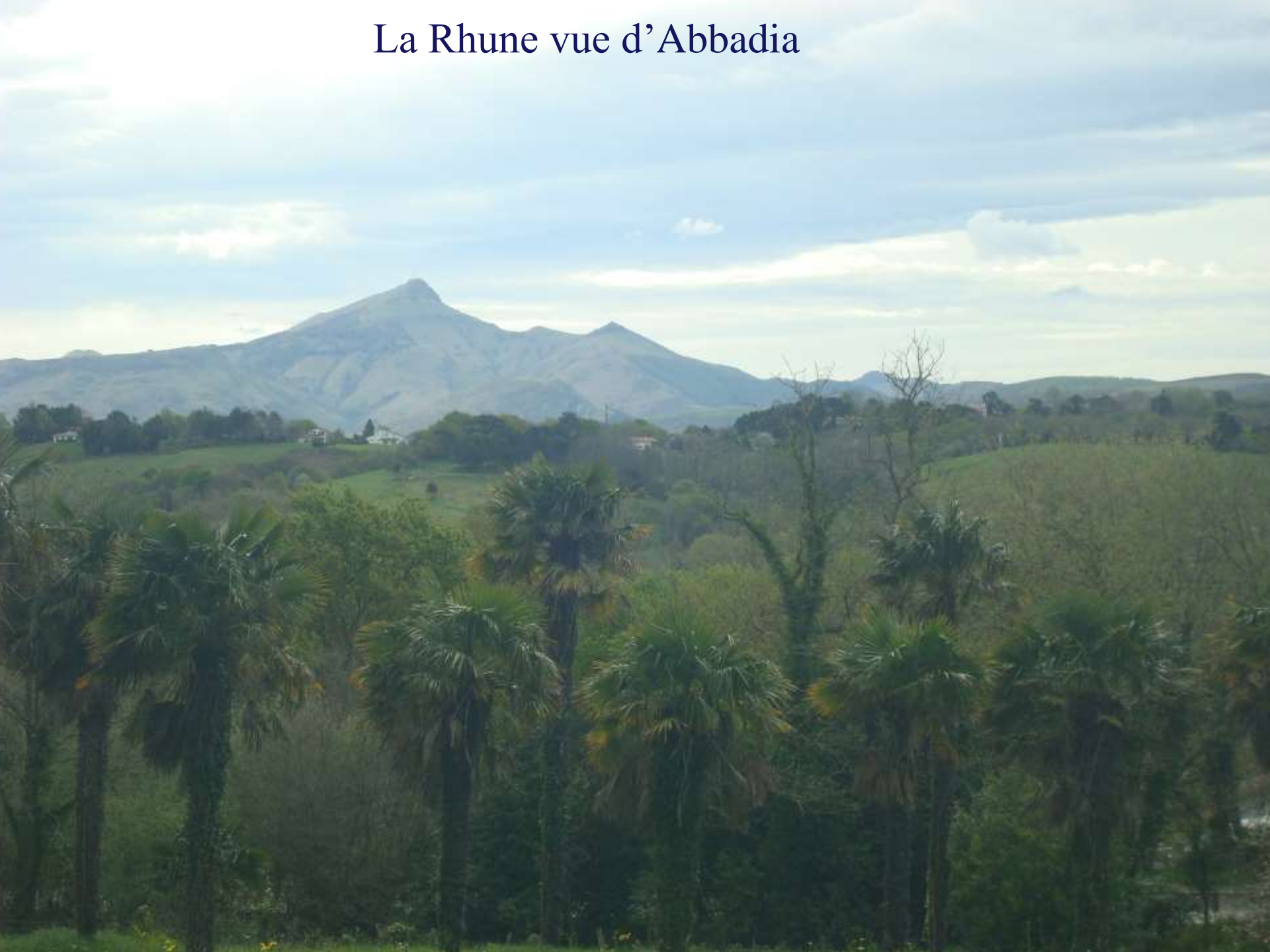


Comment passer des positions changeantes des planètes en angle sur la voûte céleste à cette représentation en relief?



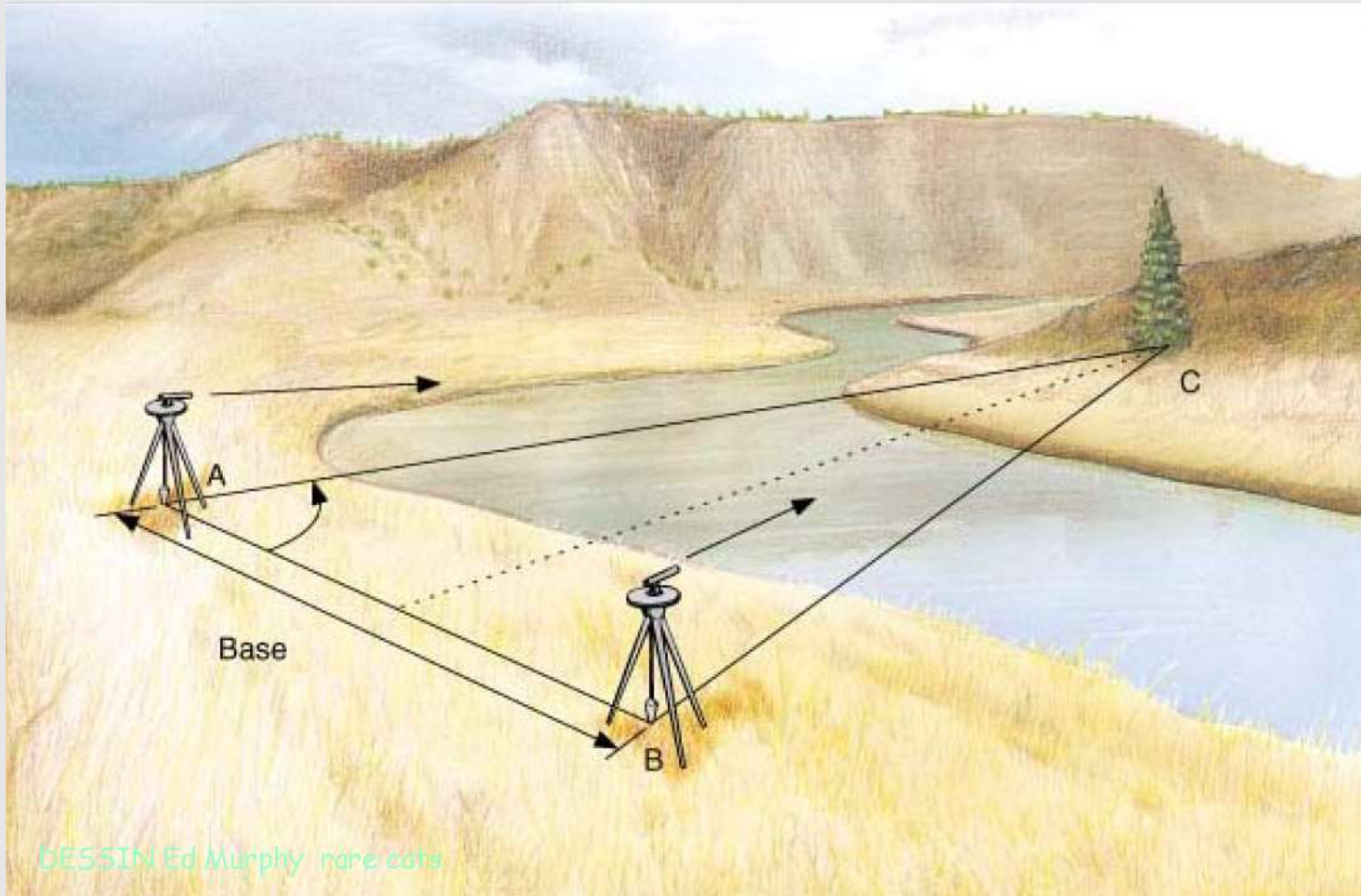
La Lune: proche? Mais comment connaître sa taille et sa distance

La Rhune vue d'Abbadia



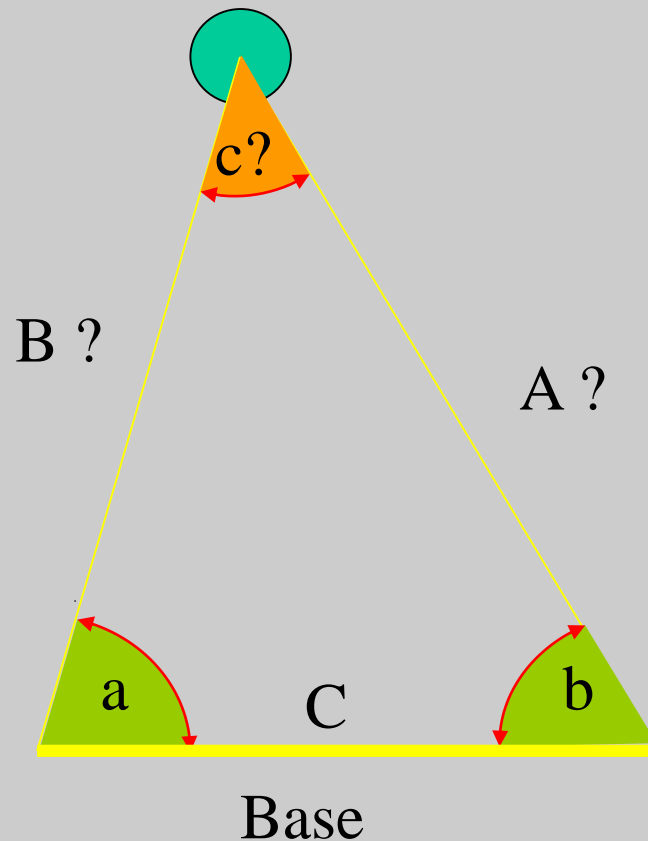
La triangulation

ou comment une mesure d'angle se transforme en distance



Un calcul connu depuis l'antiquité mesurer une distance sans la parcourir

La triangulation

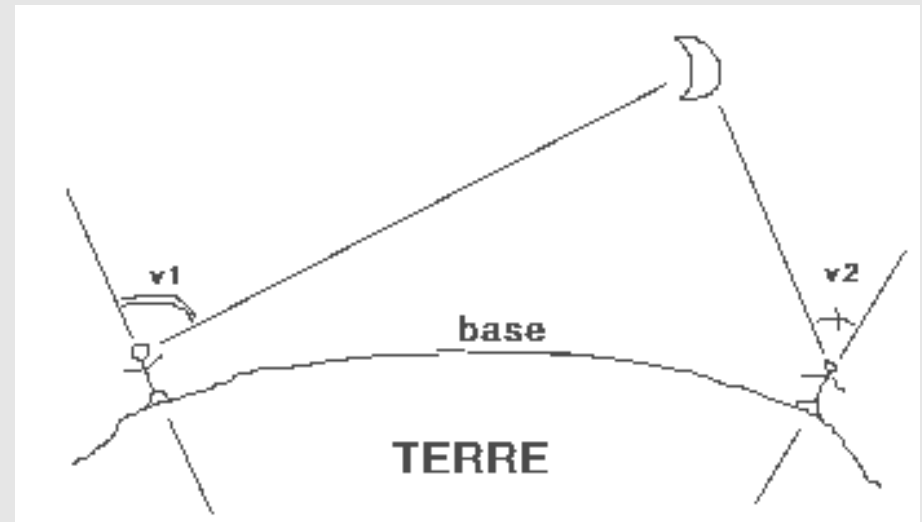
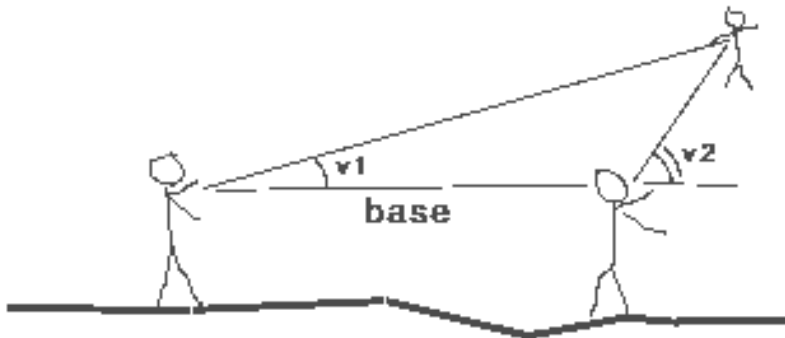


$$c = 180^\circ - (a + b)$$

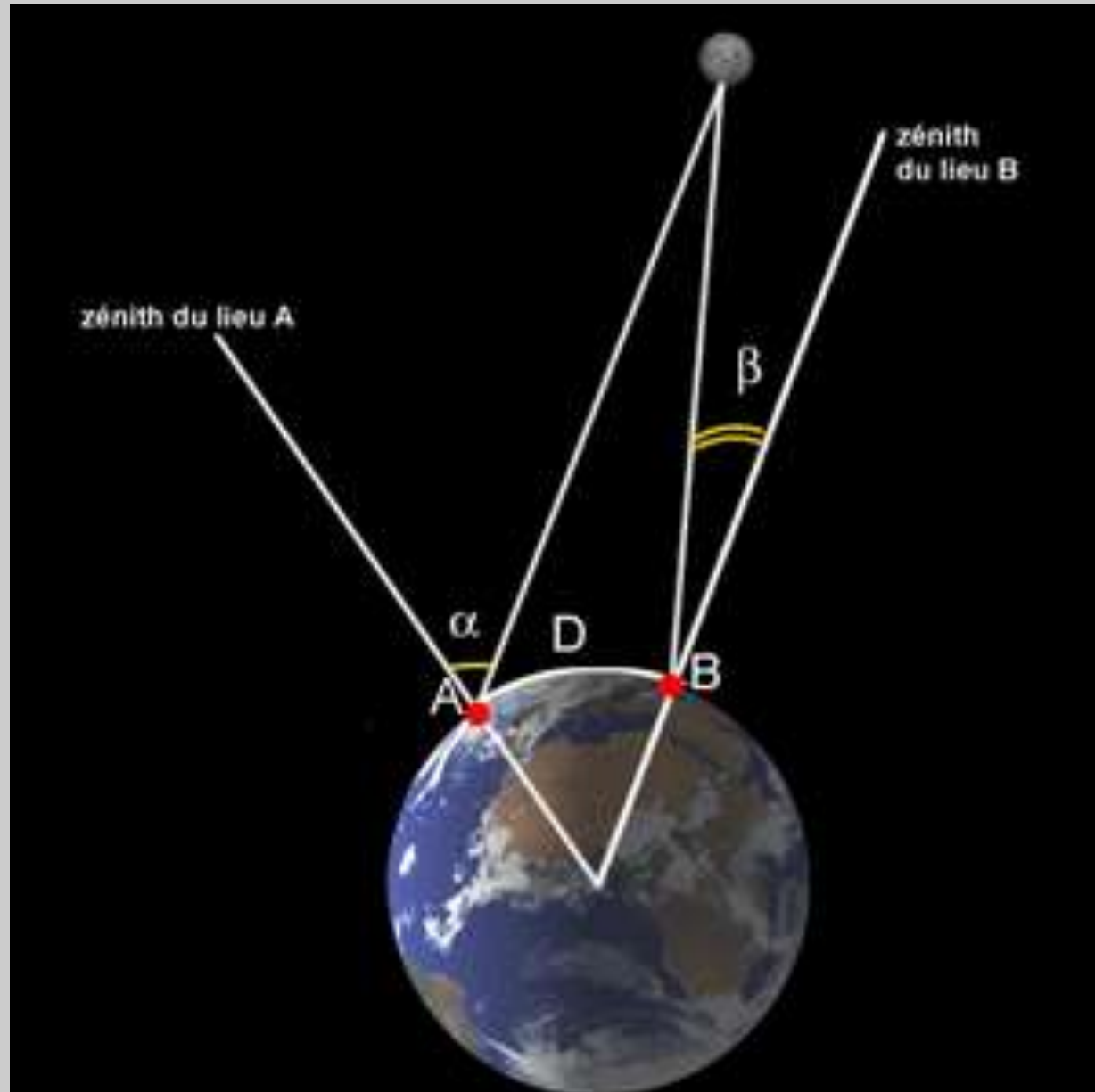
$$\frac{\sin c}{C} = \frac{\sin b}{B} = \frac{\sin a}{A}$$

La mesure des distances grâce à la triangulation

Triangulation ou parallaxe
ou comment mesurer une distance à un lieu
inaccessible...



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



La distance de la Terre au Soleil ?

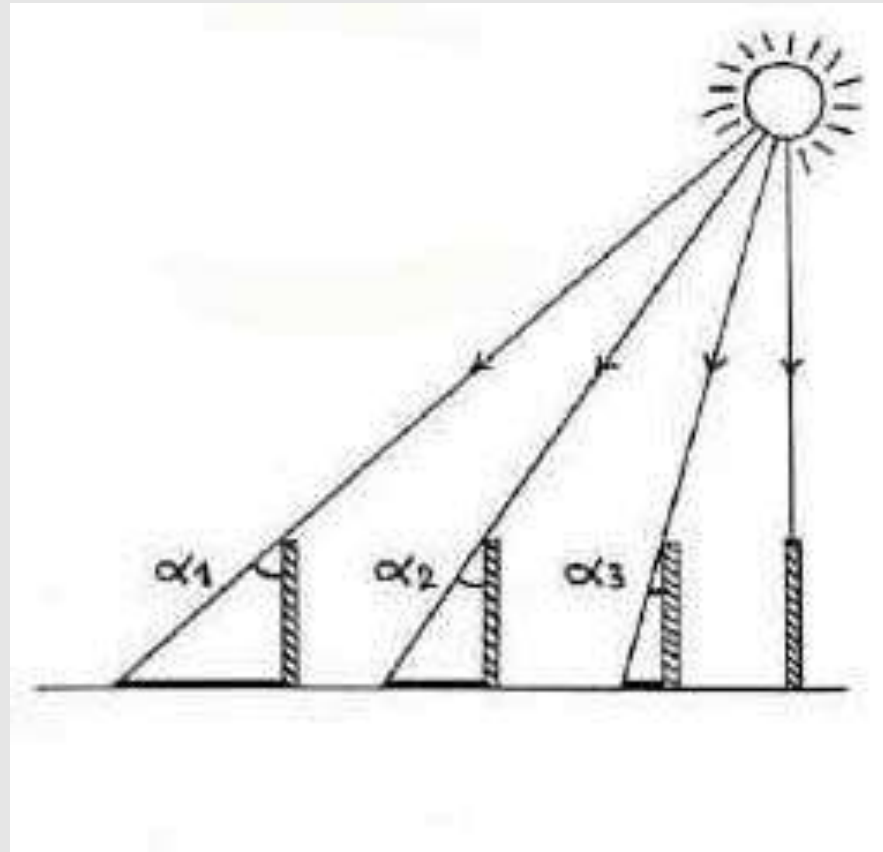


Des questions dès l'antiquité

- 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 ?

Première explication

Pourquoi la direction du Soleil n'est-elle pas la même depuis deux lieux différents ?

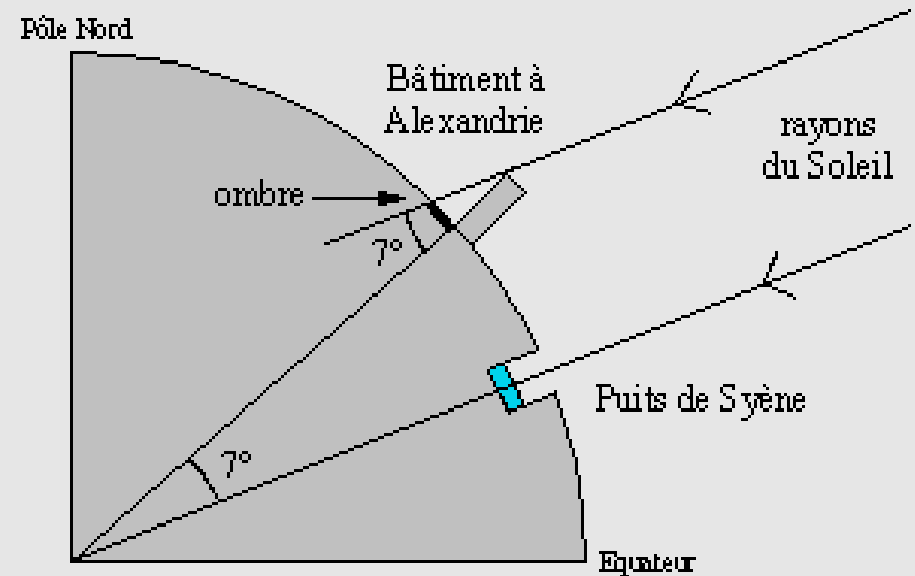


Le calcul de triangulation donne le Soleil à 6300 km de la Terre

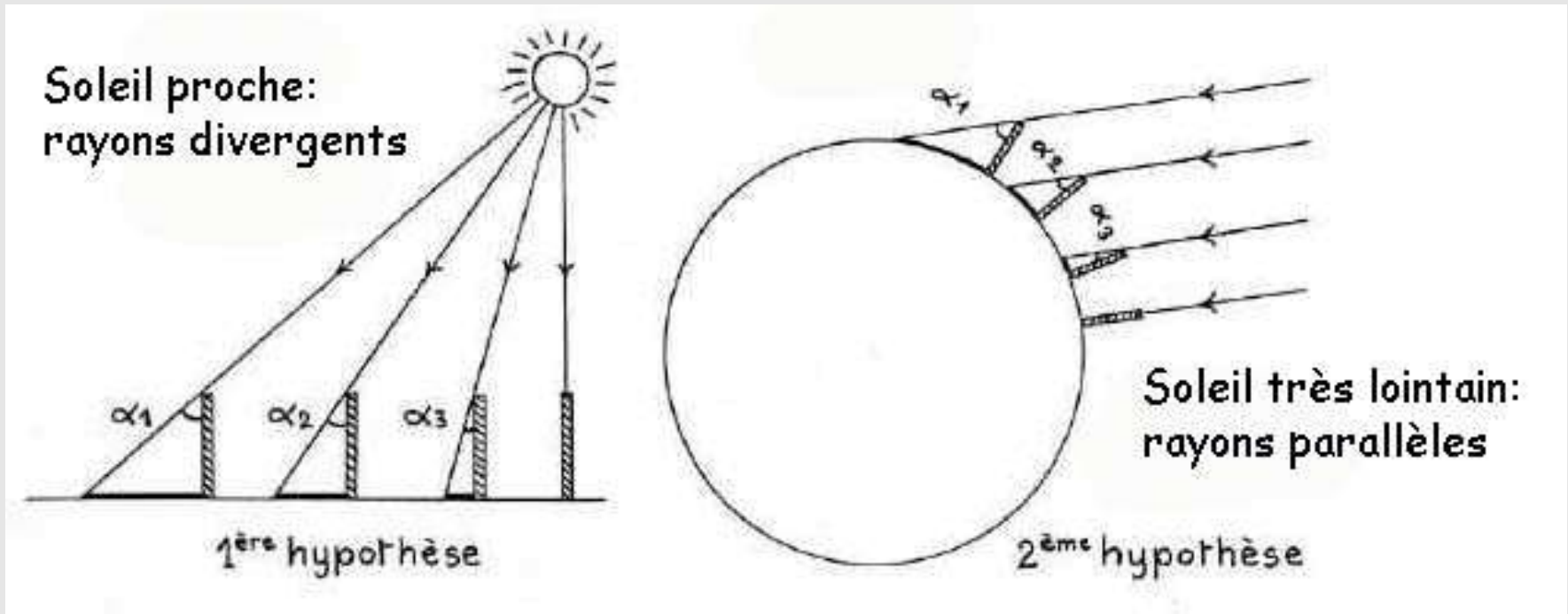
Une interprétation différente



Eratosthène
(276 - 194 av. J.C)



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

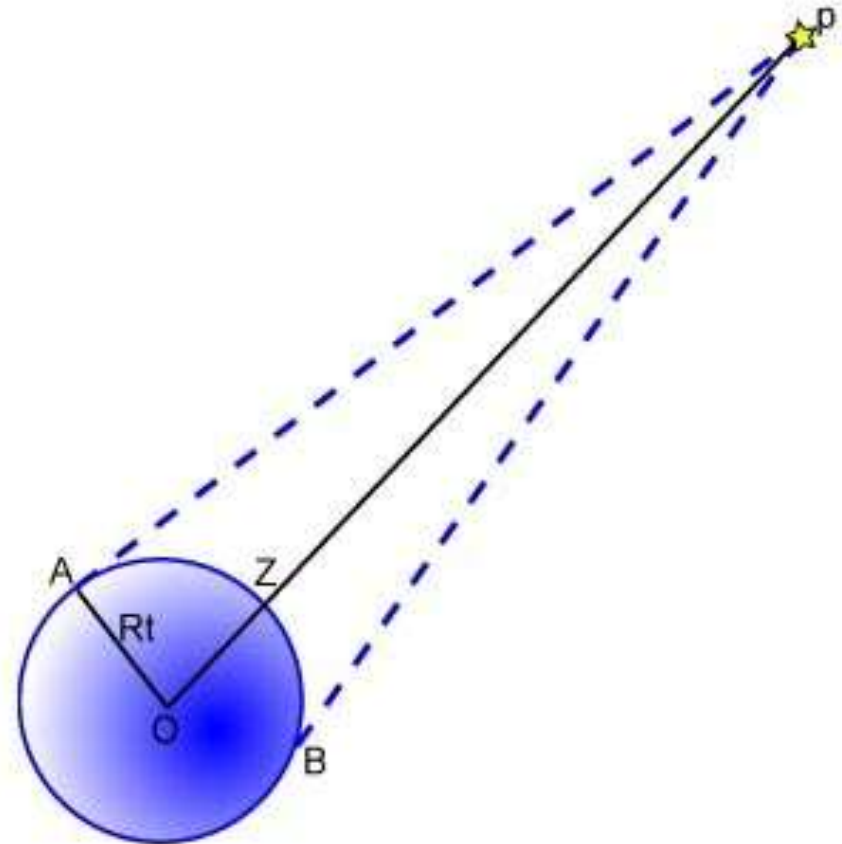


Conclusion: la Terre est plate, le Soleil est proche à 6300 km
ou bien:
la Terre est ronde, son rayon est de 6300 km et le Soleil
est très loin!

Le passage d'un angle à une distance: parallaxe horizontale = distance

- Utilisons la rotation de la Terre autour de son axe pour avoir la plus grande base possible sans se déplacer

Quand la Terre tourne, l'étoile proche semble changer de place dans le ciel: cette variation est appelée la parallaxe

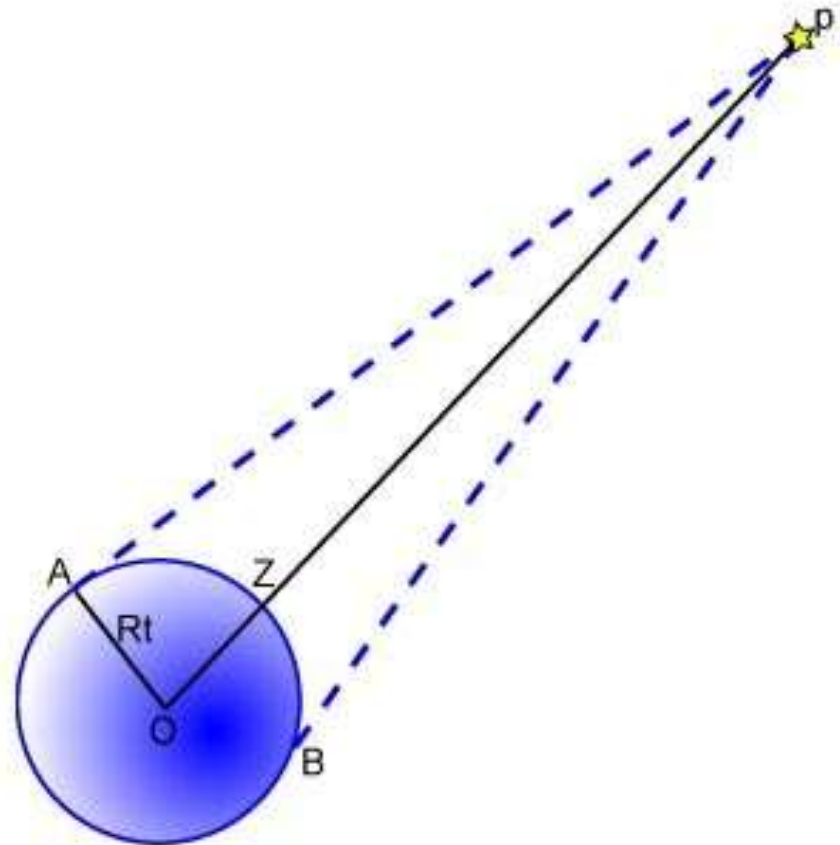


parallaxe horizontale = distance

- Utilisons la rotation de la Terre autour de son axe pour avoir la plus grande base possible sans se déplacer

Le maximum de parallaxe est appelé « parallaxe horizontale »
C'est l'angle sous lequel on voit le rayon terrestre depuis l'astre concerné

Parallaxe de la Lune = $57' = 3420''$
Parallaxe du Soleil = $8''$
Parallaxe de Jupiter = $1,5''$



Historique de la précision de mesure

À l'œil nu:

- Hipparque (-150): 1000 secondes de degré (~15 minutes)
- Tycho Brahé (1630): 20 secondes de degré
- Flamsteed (1700): 10 secondes de degré

À rapprocher de la **parallaxe solaire: 8 secondes de degré**

Avec un télescope ou une lunette:

- Argelander (1850): 1 seconde de degré
- XIXème siècle (micromètre): 0.1 à 0.5 seconde de degré
1 seconde de degré = 1000 mas
- Début du XXème siècle (photo, FK): 100 à 300 mas
- Fin du XXème siècle (CCD, UCAC2): 50 mas
- Hipparcos (1995): 0.1 mas
- Gaia (2015): 0.001 mas

De très petits angles à mesurer

1 degré = 60 minutes de degré (')

1 ' = 60 secondes de degré (")

1 " = 1000 milliseconde de degré (mas)

Parallaxe de la Lune = 57 ' = 3420 "

Parallaxe du Soleil = 8 "

Parallaxe de Jupiter = 1,5 "

Parallaxe de Vénus = 3 "

Parallaxe de Mars = 5 "

Parallaxe de Saturne = 0,7 "

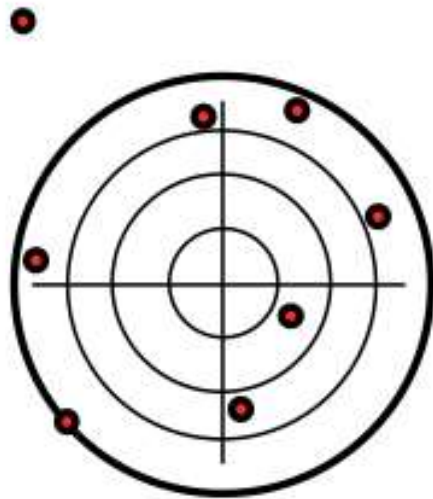
Parallaxe d'Uranus = 0,4 "

Parallaxe de Neptune = 0,25 "

Angle apparent + taille → distance

Précision et exactitude

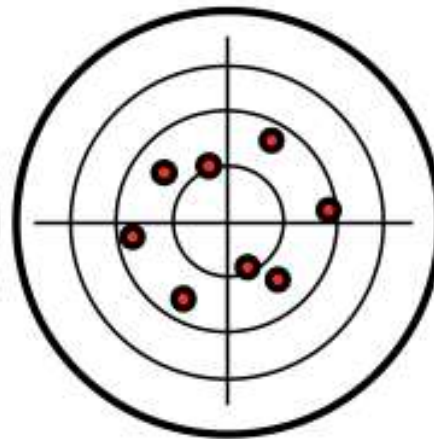
Ni précis ni exact



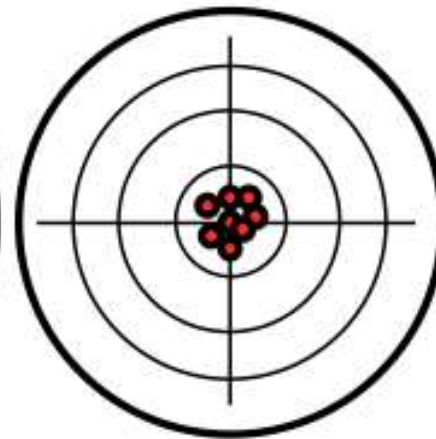
Précis mais... pas exact



Exact mais... pas précis



Exact et précis



La mesure de la distance Terre-Lune



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

Le Soleil est 400 fois plus éloigné de la Terre que la Lune...

Peut-on appliquer la triangulation aux objets célestes?
Ne sont-ils pas trop loin?

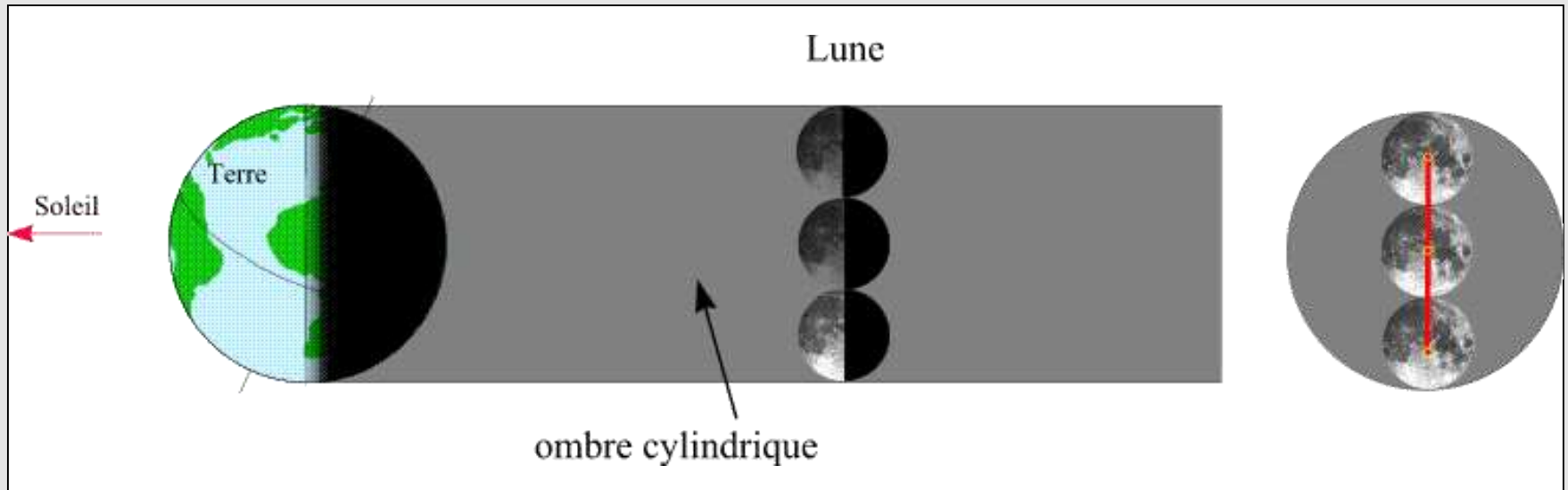
Dans l'antiquité, on utilisera une autre technique pour mesurer la distance Terre-Lune

- Observer une éclipse de Lune nous apprend plusieurs choses...



Une éclipse de Lune nous donne 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 3 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 $32'$ ($0,5^\circ$), sa distance est 107 fois son diamètre. $d = 0,3 T \times 107 = 32,1 T = 64,2$ rayons terrestres = environ 400 000 km

$$2\pi d = 360^\circ / 0,5^\circ \times 0,3 T \rightarrow d = 720 / 2\pi \times 0,3 T = 107 \times 0,3 T = 64,2 T = 400\,000 \text{ km}$$

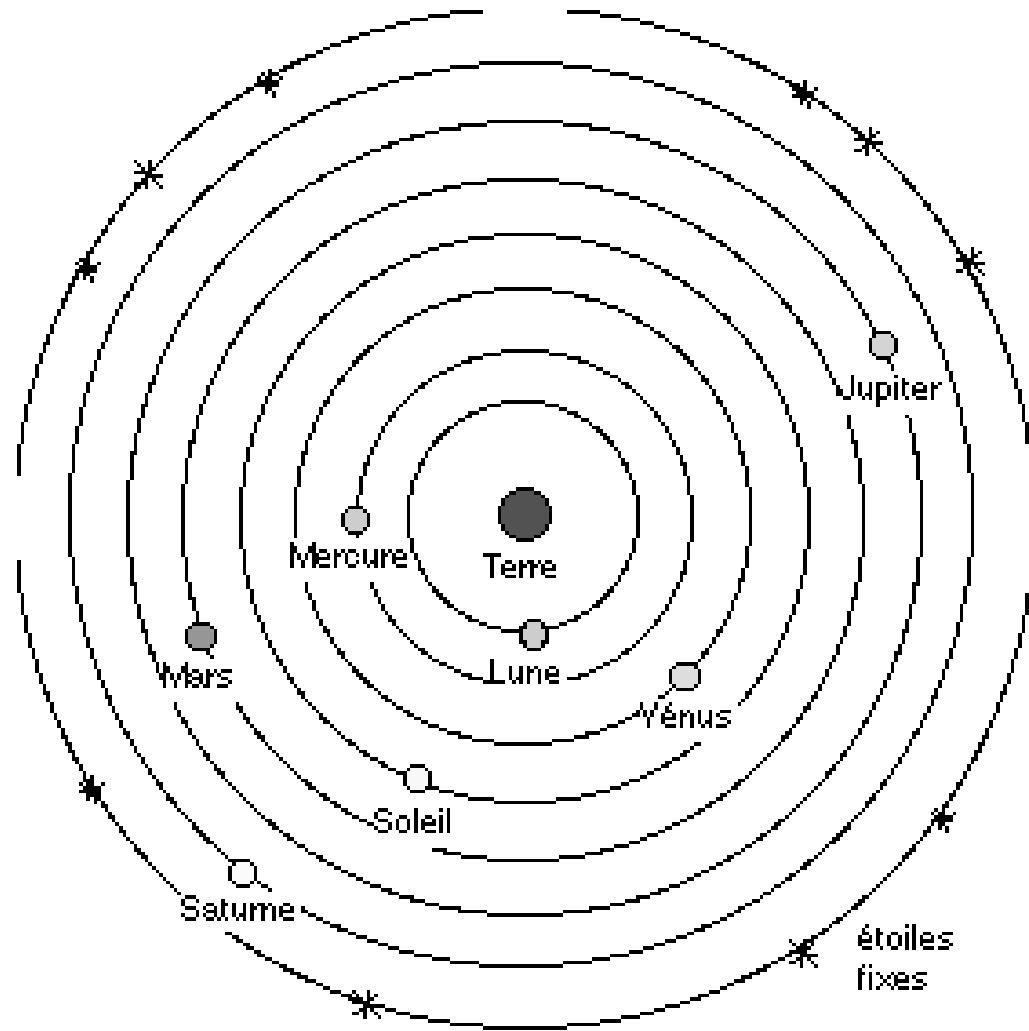
Sur la voûte céleste: des astres plus ou moins brillants et plus ou moins rapides, mais à quelle distance de nous?



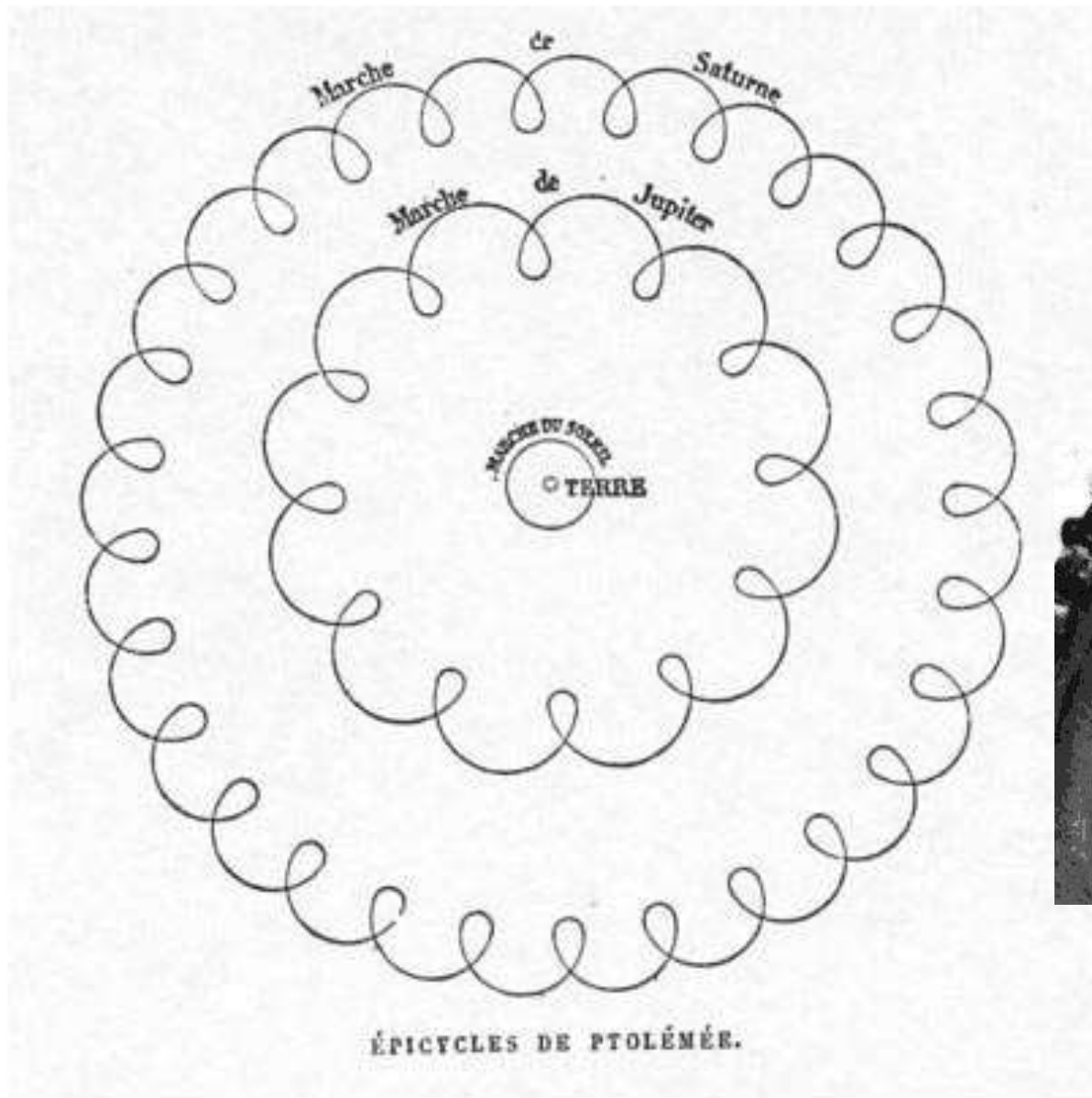
La distance au Soleil et aux planètes

- Un raisonnement simple: plus les planètes semblent aller vite, plus elles sont proches ! Mais à quelle distance ?
- On ne connaîtra la distance au Soleil que près de 2000 ans après avoir déterminé celle de la Lune!
- Il faut avoir un modèle d'univers pour pouvoir déterminer sa taille et vérifier par l'observation les spéculations des théoriciens.

Le modèle d'univers d'Aristote

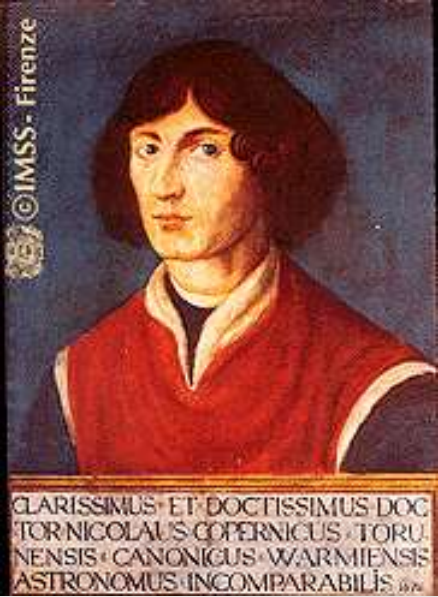


Le modèle de Ptolémée

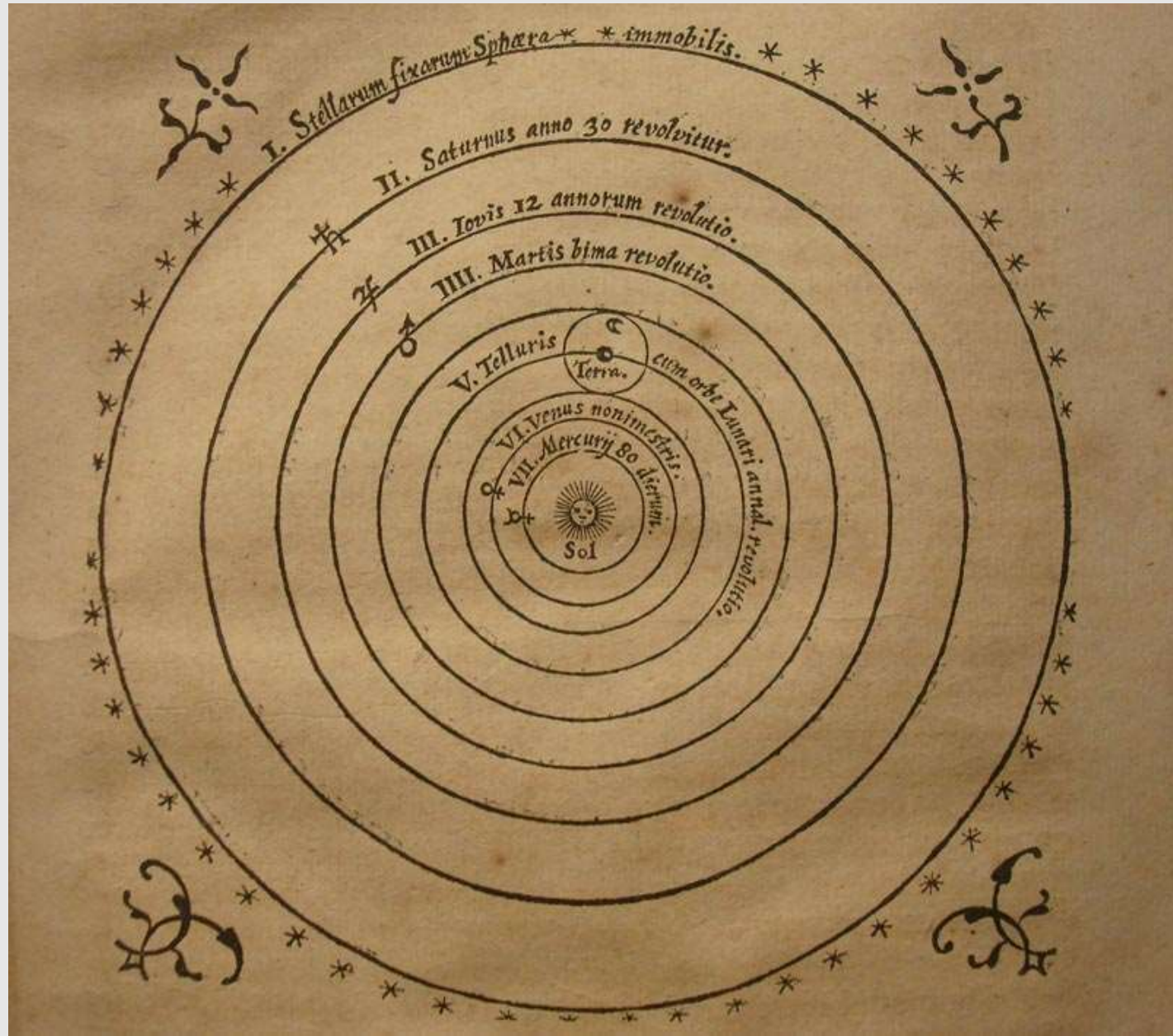


Ptolémée (100-170)

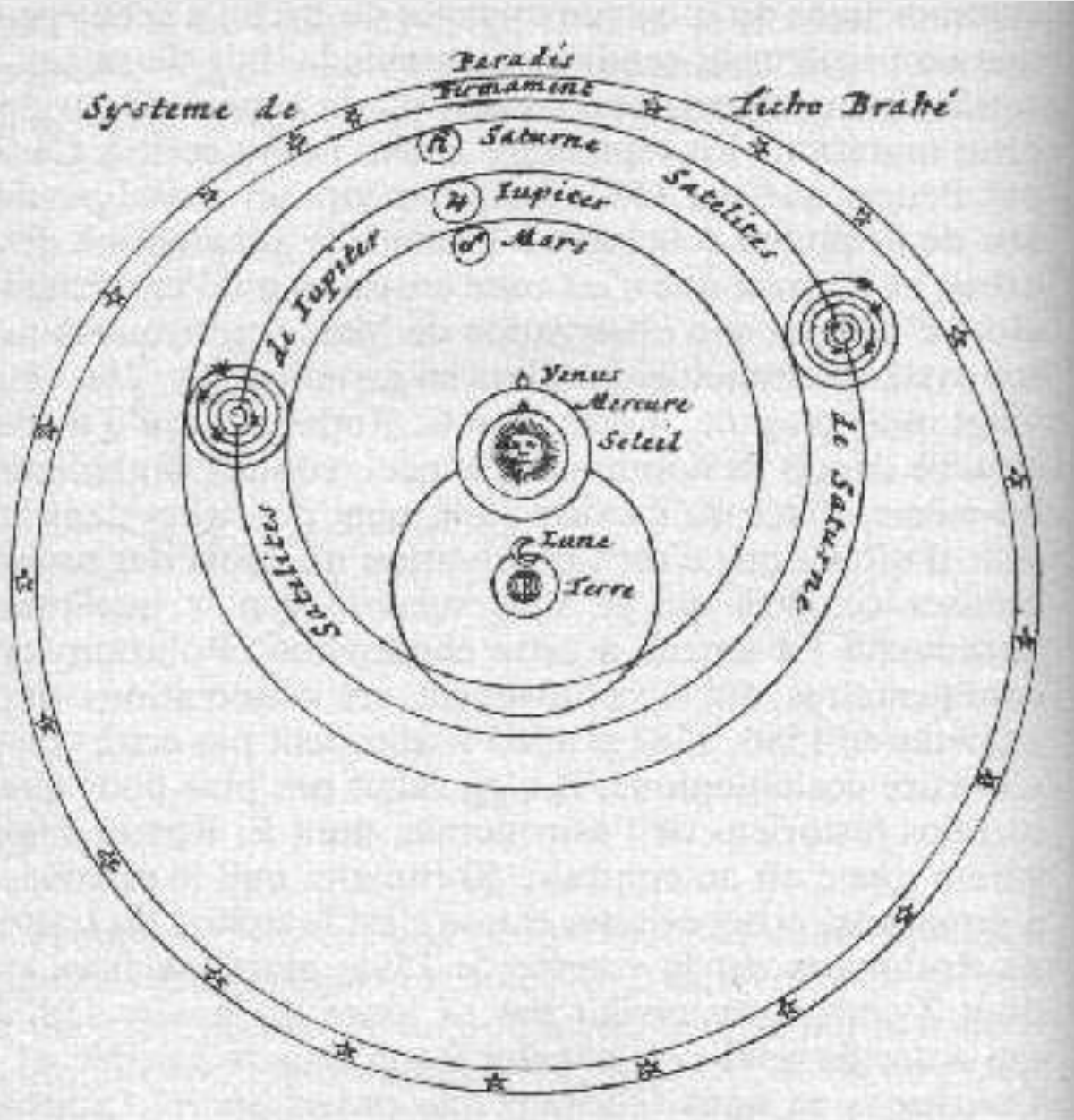
Le modèle de Copernic



Copernic (1473-1543)



Le modèle de Tycho Brahé



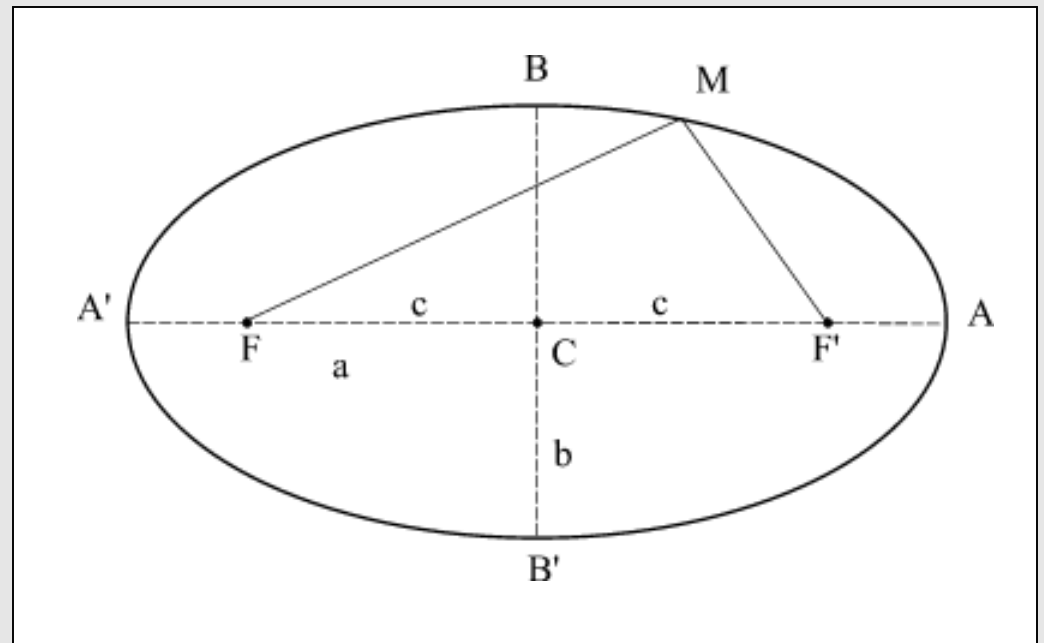
Tycho-Brahe (1546-1601)

Le modèle de Kepler: une révolution

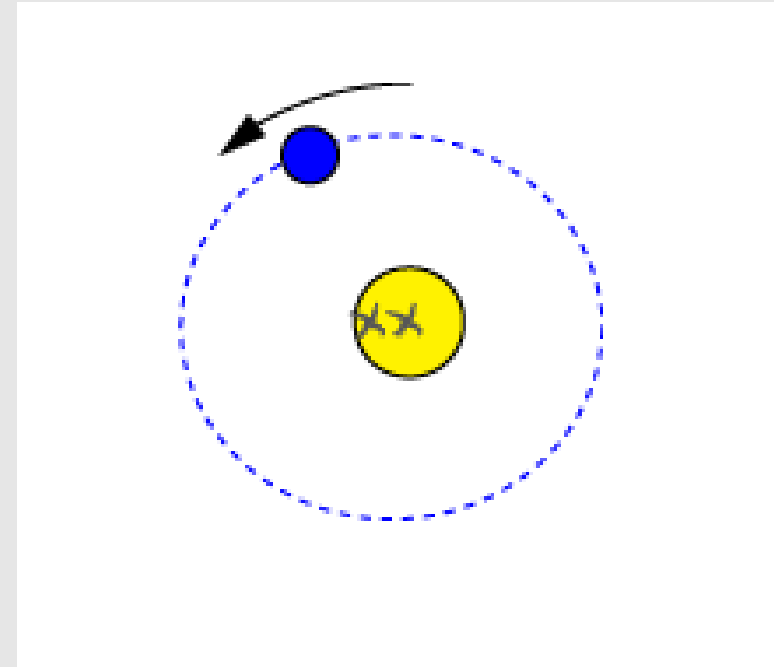
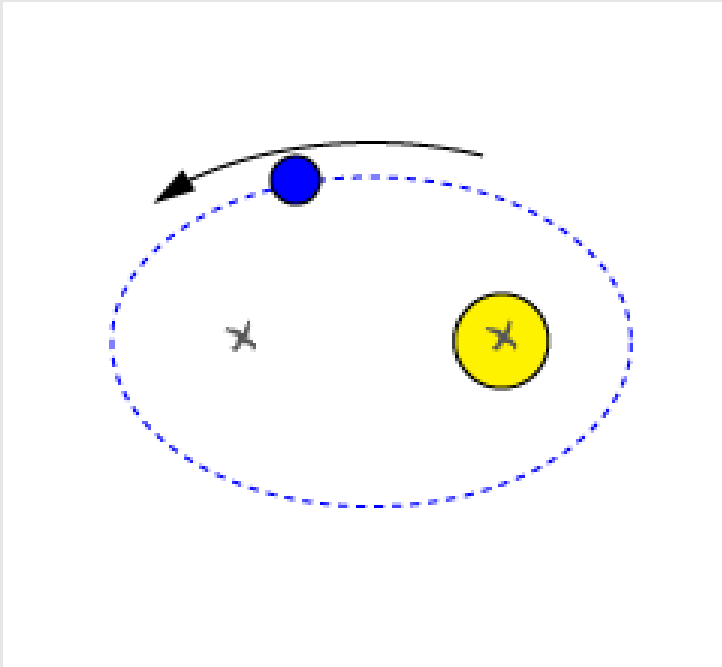
Kepler utilisa les observations de Tycho Brahe pour montrer que la planète Mars parcourait une orbite elliptique et en déduire ses « lois ».



Kepler (1571-1630)

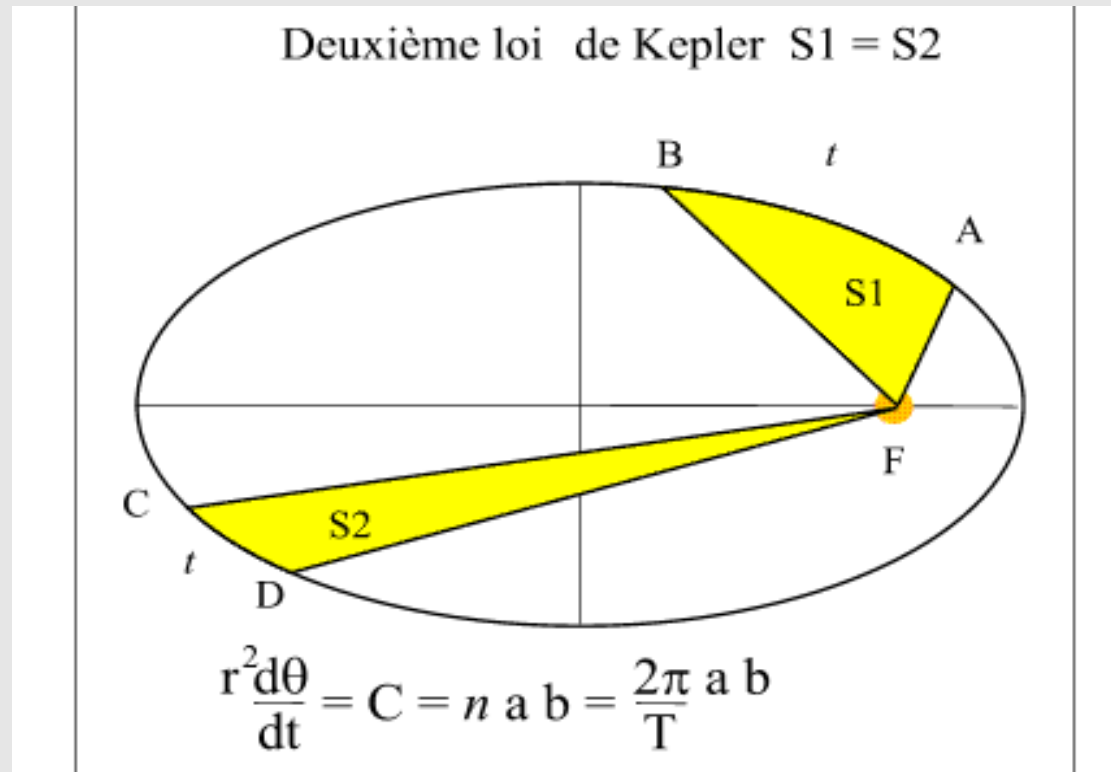


La première loi de Kepler



Chaque planète décrit **une ellipse** (et non un cercle) dont le Soleil occupe un des foyers (1605).

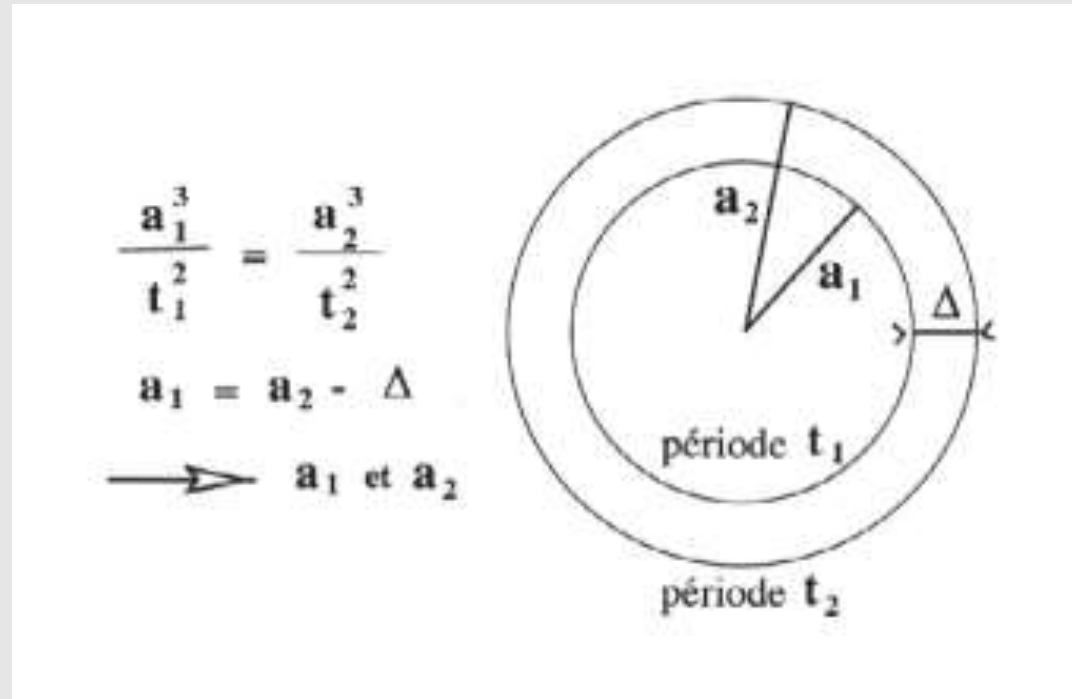
Loi des aires



- Les aires décrites par le rayon vecteur planète-Soleil sont proportionnelles aux temps employés à les décrire (*Astronomia Nova*, 1609);

La planète va plus vite quand elle est proche du Soleil et moins vite quand elle en est loin.

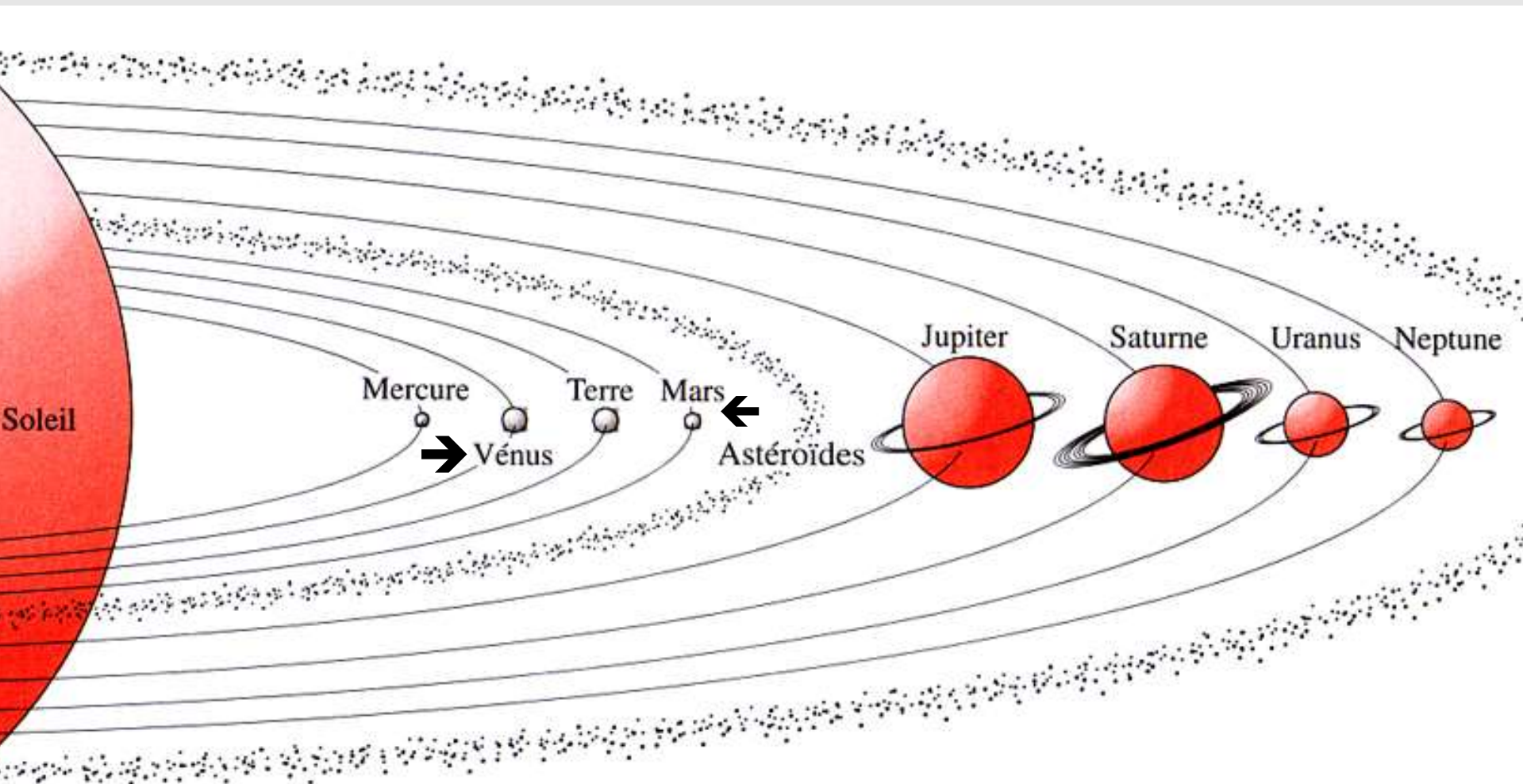
Troisième loi de Kepler



- Les demi-grands axes a et les périodes de révolution T sont reliés par $a^3/T^2 = \text{constante}$ pour toutes les planètes (1618).

On peut mesurer les périodes de révolution des planètes, si on connaît une distance entre le Soleil et une planète ou la distance entre deux planètes on peut les connaître toutes.

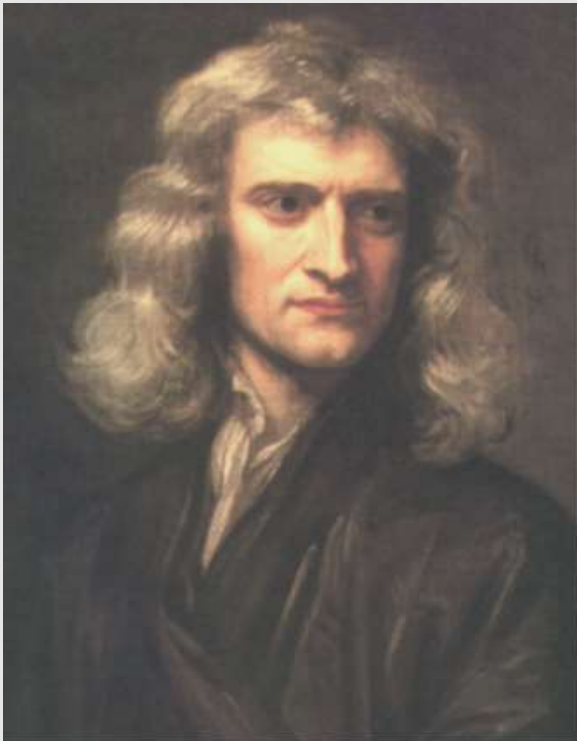
Avec les lois de Kepler, il suffit de mesurer la distance d'une seule planète proche pour connaître toutes les autres: mais comment faire ces mesures? Est-ce possible?



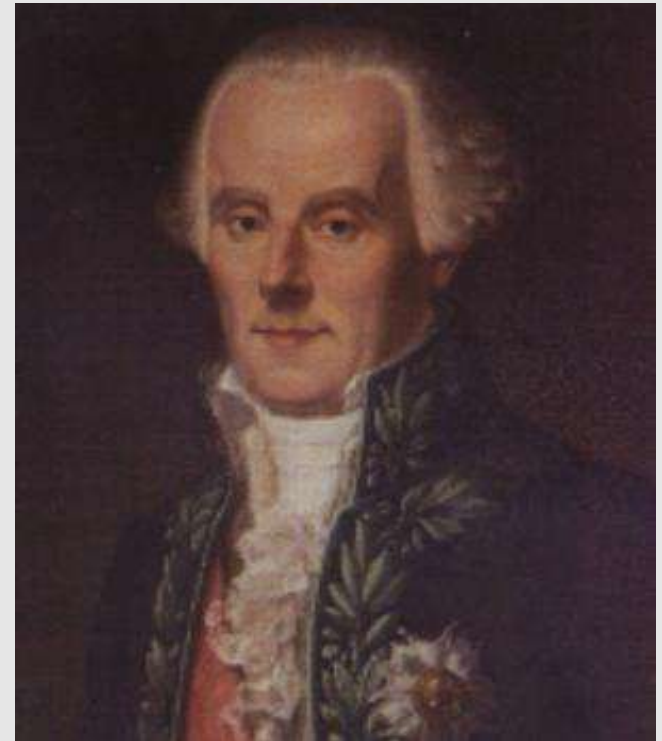
Mars et Vénus sont proches de la Terre: on va tenter de mesurer leur distance

Les astronomes qui ont donné une meilleure représentation de l'univers: Newton et Laplace

- Les « lois » de Kepler vont être démontrées et complétées par Newton et Laplace.
- La mécanique céleste va tout expliquer pendant plusieurs siècles et va permettre de **calculer les distances** dans le système solaire.



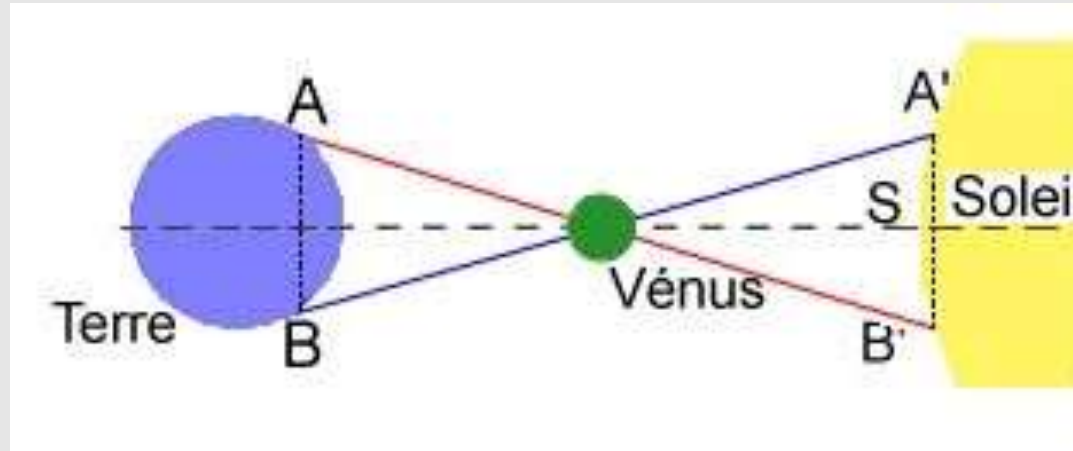
Newton (1642-1727)



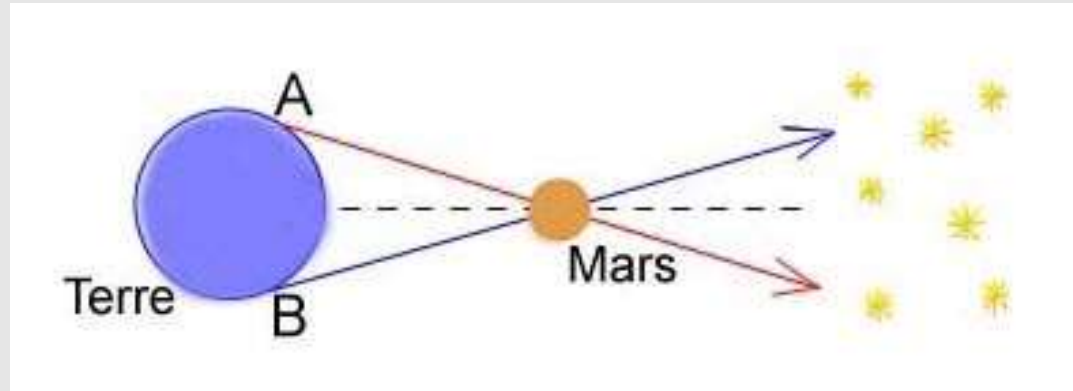
Laplace (1749-1827)

Grâce à Kepler, il suffit de mesurer une distance à un astre proche et on a toutes les autres !

Vénus



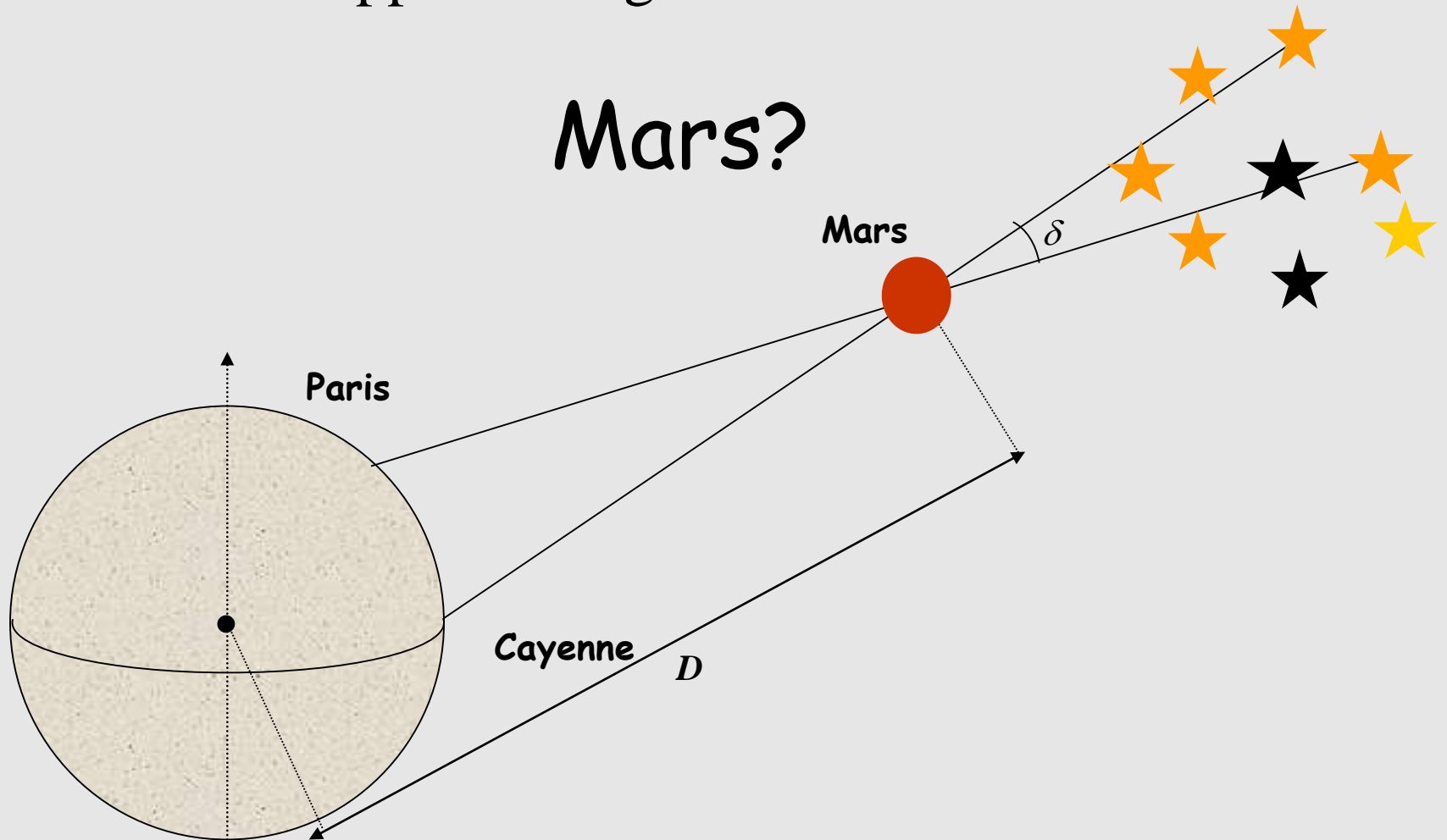
Mars



Les astres les plus proches sont Mars et Vénus:
est-ce possible de mesurer leur distance à la Terre?

Mars se rapproche régulièrement de la Terre

Mars?

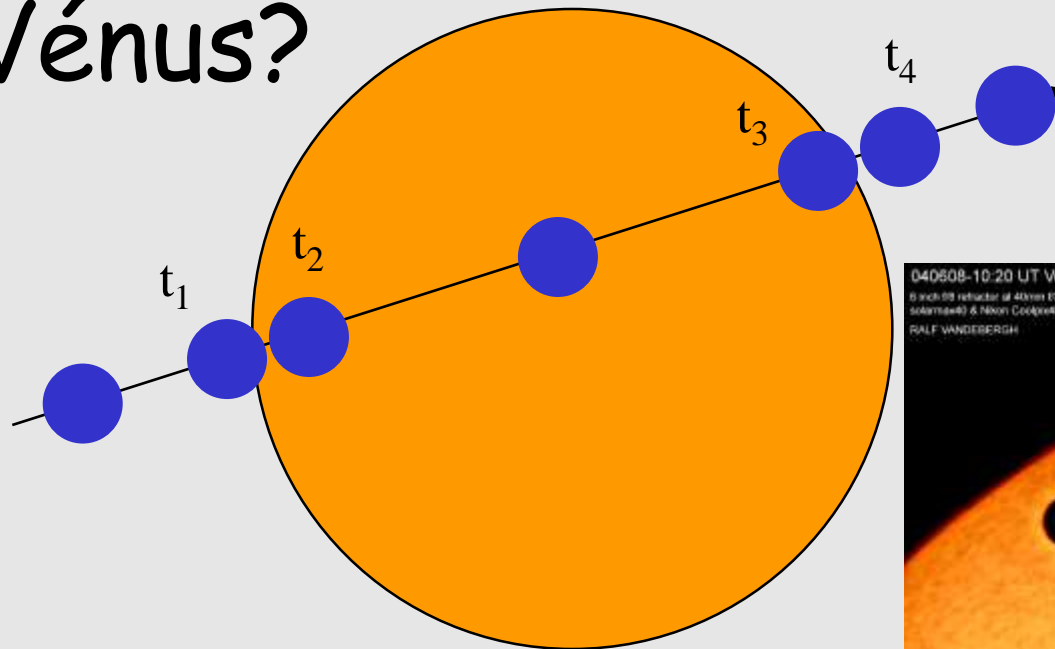


Vue de la Terre, la planète Mars n'est pas devant les mêmes étoiles selon le lieu d'observation mais les étoiles sont mal connues.

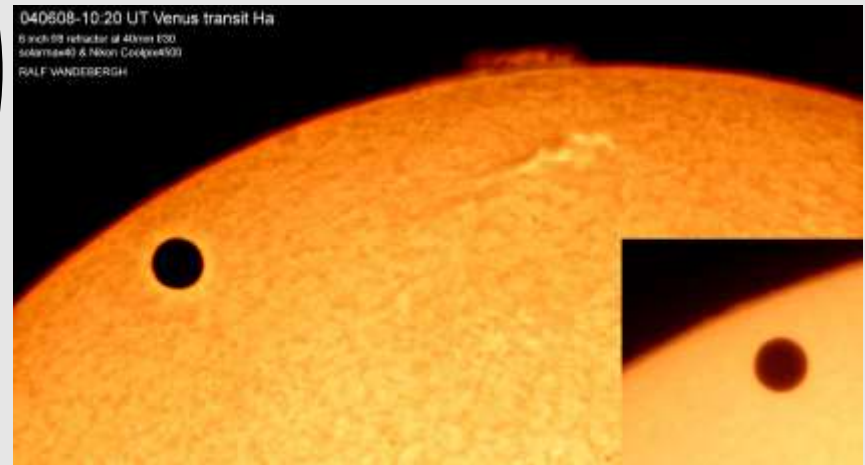
Vénus se trouve entre la Terre et le Soleil

- Vénus est plus difficile à observer car plus proche du Soleil mais Vénus passe entre la Terre et le Soleil

Vénus?



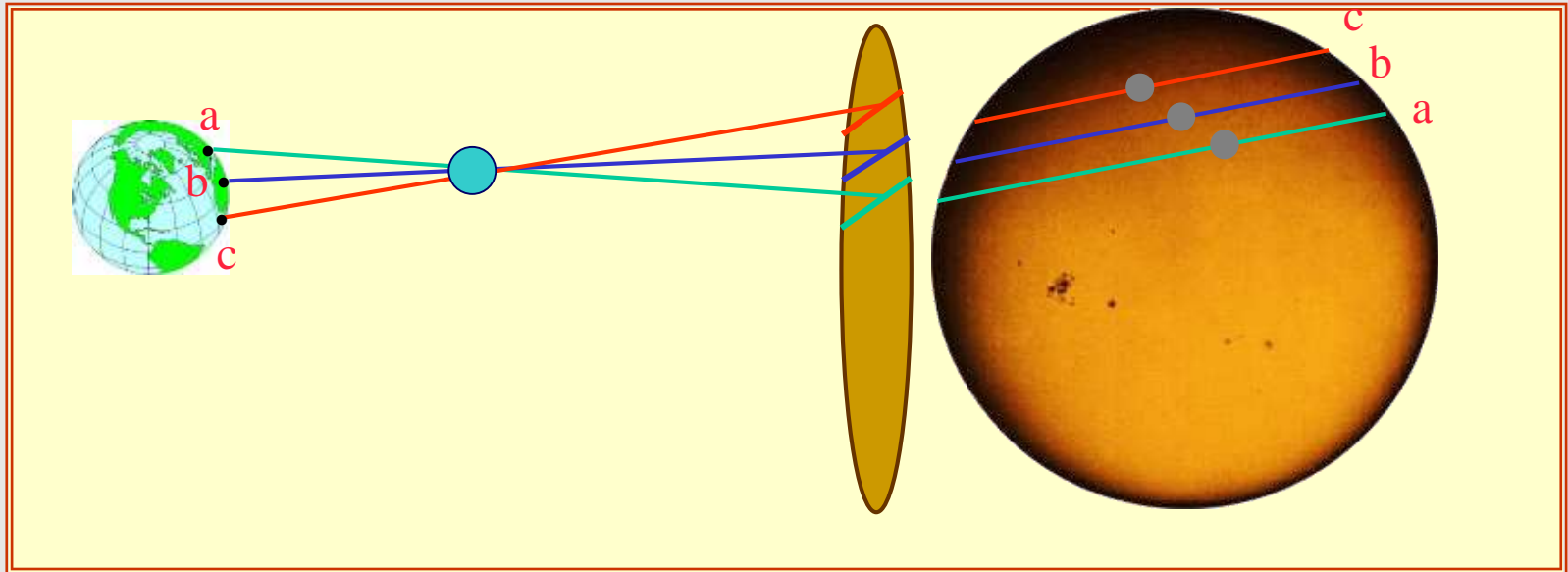
- t_1 : 1^e contact
- t_2 : 2^e contact
- t_3 : 3^e contact
- t_4 : 4^e contact



Vénus peut passer devant le Soleil: une occasion à ne pas rater!

Vénus se trouve entre la Terre et le Soleil

- Un phénomène rare: 1639, puis 1761, 1769, puis 1874, 1882 puis 2004, 2012
- Une opportunité pour mesurer facilement la distance Terre-Soleil

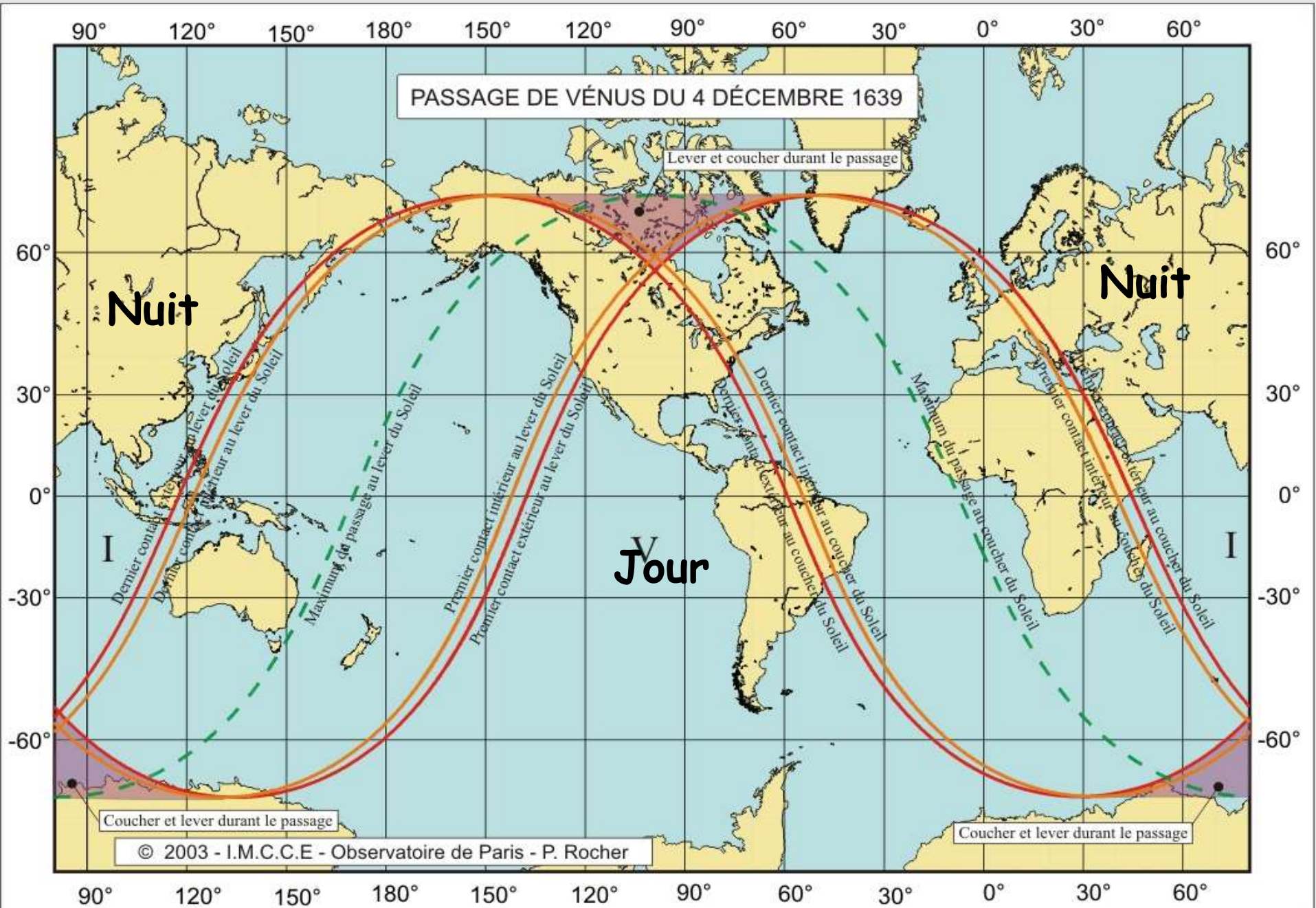


Vue depuis la Terre, Vénus ne passe pas devant la même zone du disque solaire: c'est l'effet de parallaxe! La durée du passage varie donc selon le lieu d'observation.

1639: Horrocks fait la prédiction et confirme les lois de Kepler



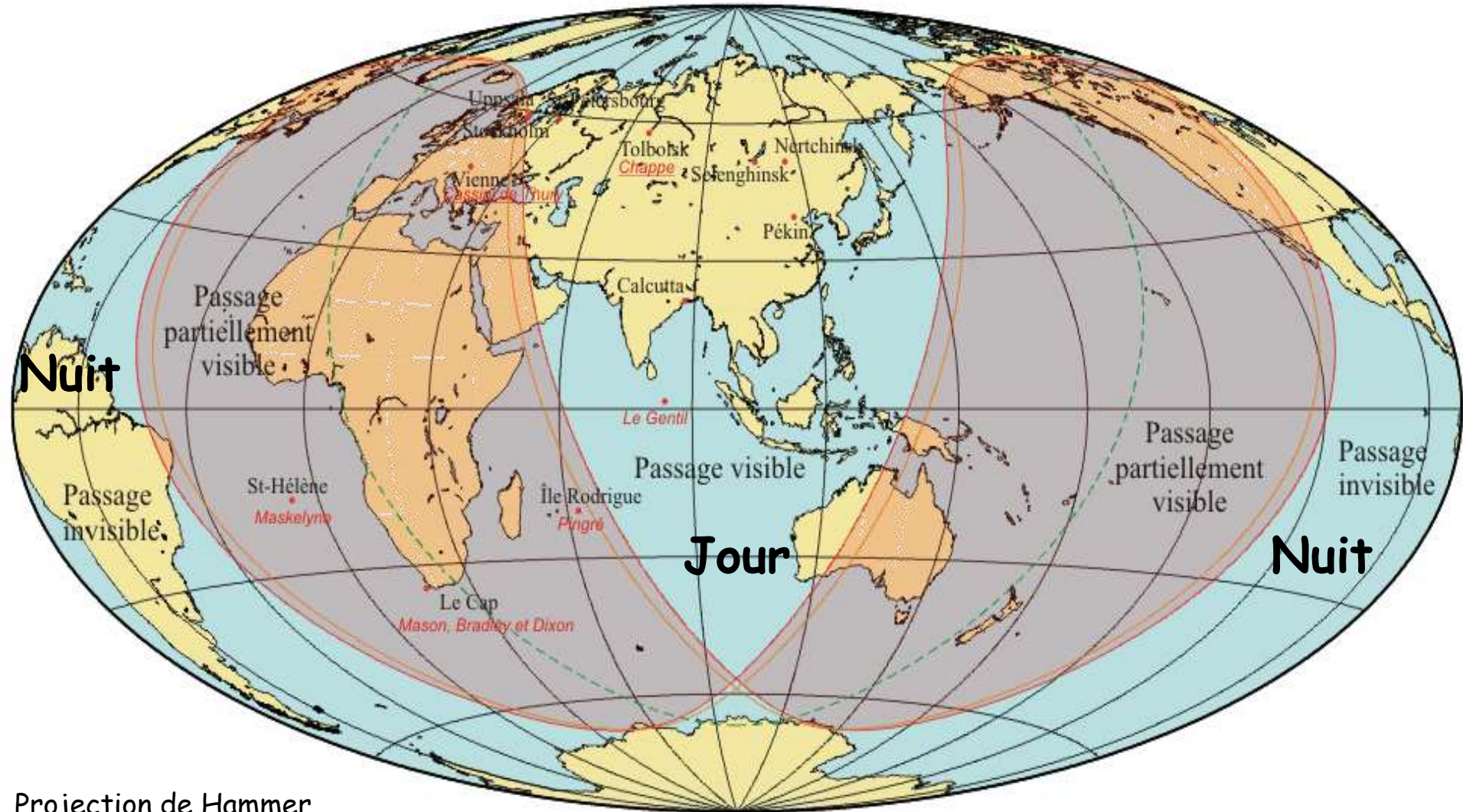
Un passage difficilement visible en Europe



Mesurer l'univers!

- La distance Terre-Soleil pourra servir de base pour calculer toutes les distances dans le système solaire
- Observer le passage de Vénus permet cette mesure
- Il n'y a pas de passage entre 1639 et 1761
- Il y a un passage en 1761 et un autre en 1769
- La communauté scientifique attend ces phénomènes avec impatience!
- Attention: il faut voir le Soleil pour voir le passage!

Visibilité du passage du 6 juin 1761

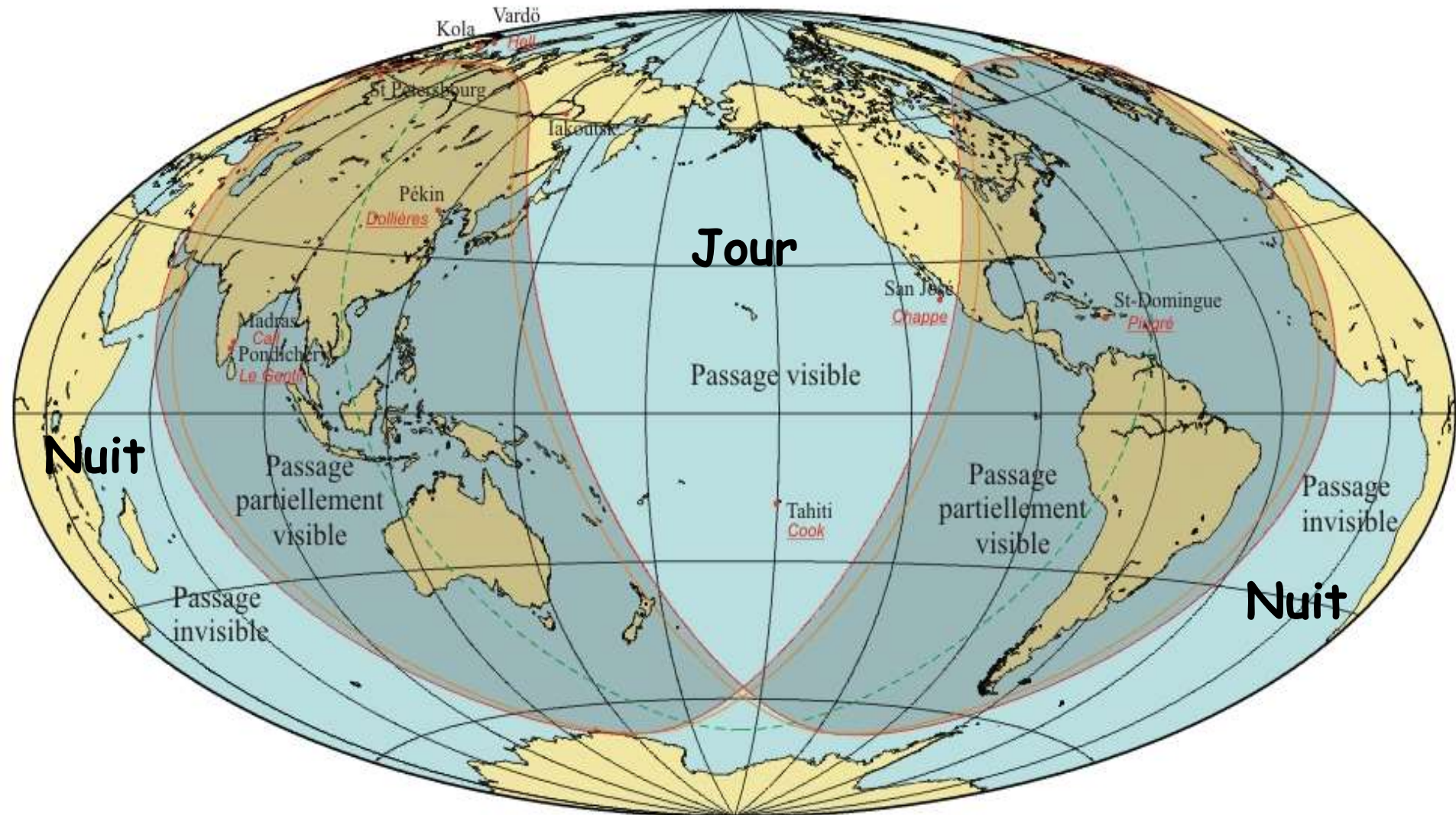


XVIIIème siècle: la mobilisation générale pour mesurer l'univers!

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



Visibilité du passage de 1769



Toujours la nécessité de voyages lointains

Le passage de 1769



Le capitaine Cook à Tahiti à « Point Venus »

Pointe « Vénus » aujourd'hui



Les mesures de la distance Terre - Soleil

Méthode	date	parallaxe solaire en secondes de degré	distance en millions km
Vénus	1639		94
Mars	1672	9.5 - 10	130 -140
Vénus	1761	8.3 - 10.6	125 - 160
Vénus	1769	8.5 - 8.9	145 - 155

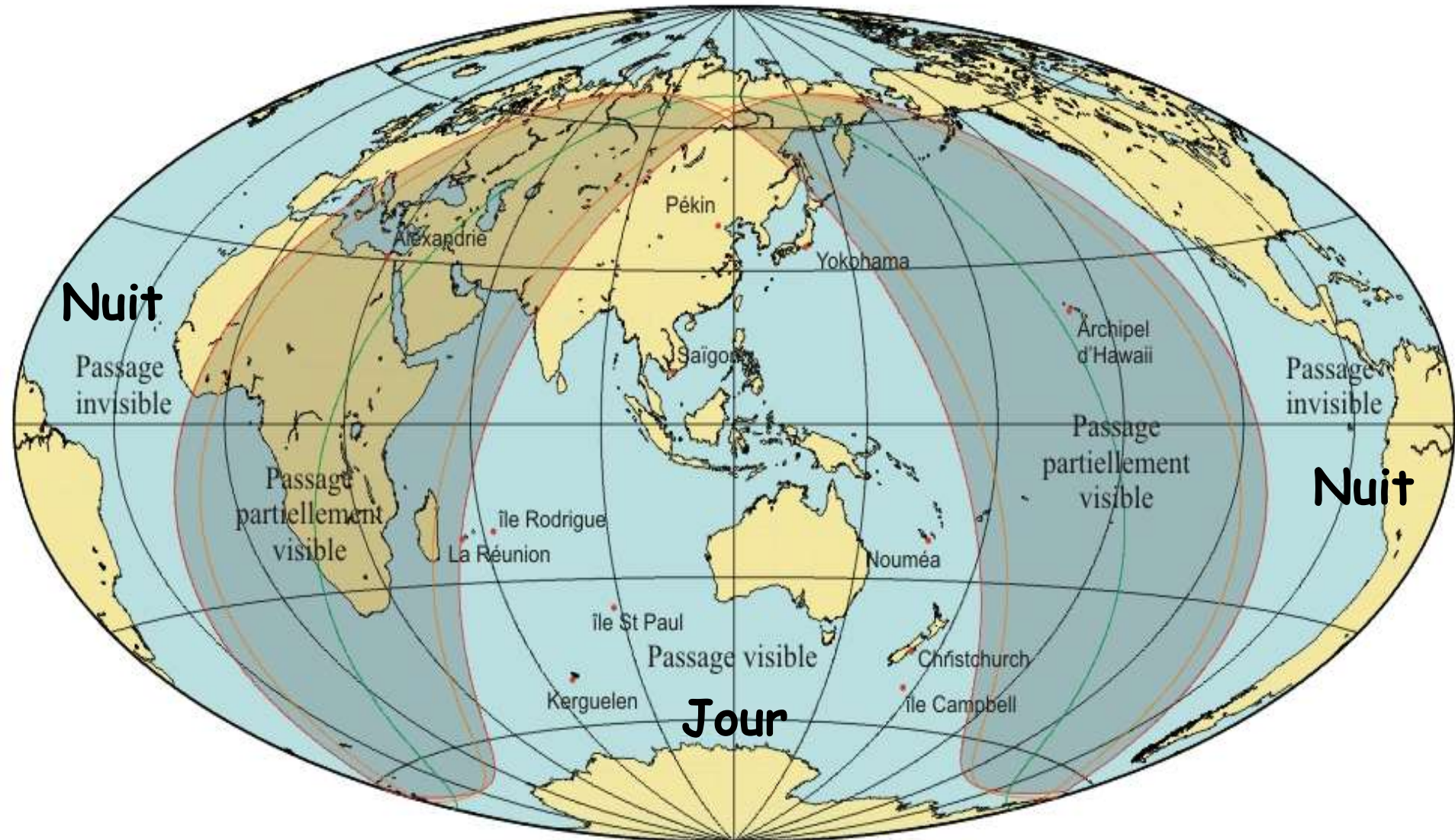
Les passages du XIXème siècle

De nouveaux enjeux après la guerre de 1870:
faire triompher la science et la technique

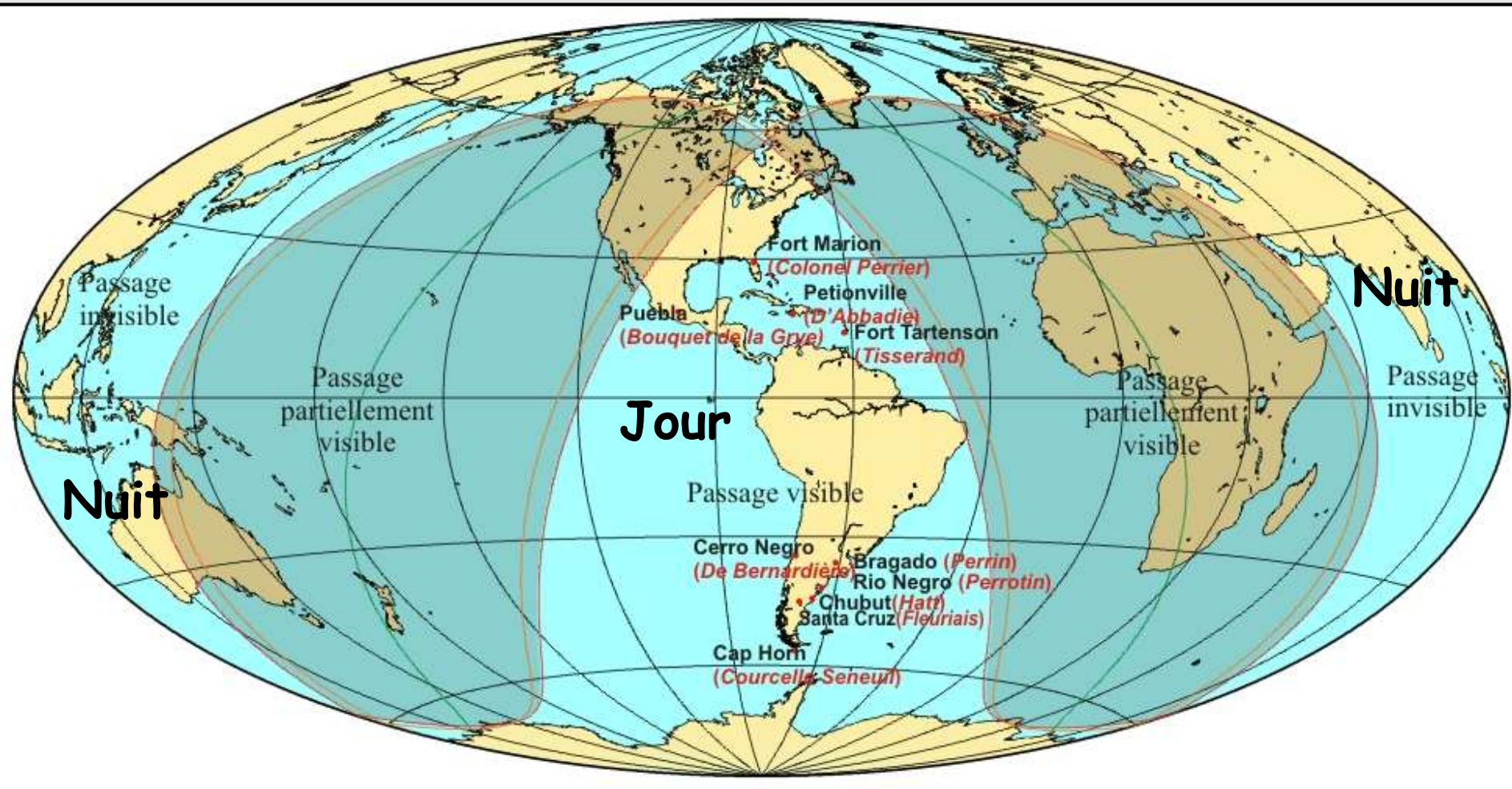
La fin du XIXème siècle est « scientifique »

- On sait bien déterminer la longitude d'un lieu (télégraphe).
- On possède de bonnes horloges transportables.
- Les moyens de communication sont plus rapides (vapeur, canal de Suez).
- Les expéditions sont toujours très onéreuses.
- Une nouvelle méthode d'observation : la photo (Daguerréotype)
- On a l'expérience écrite de l'observation d'un passage de Vénus devant le Soleil.

Le passage du 9 décembre 1874



Le passage du 6 décembre 1882

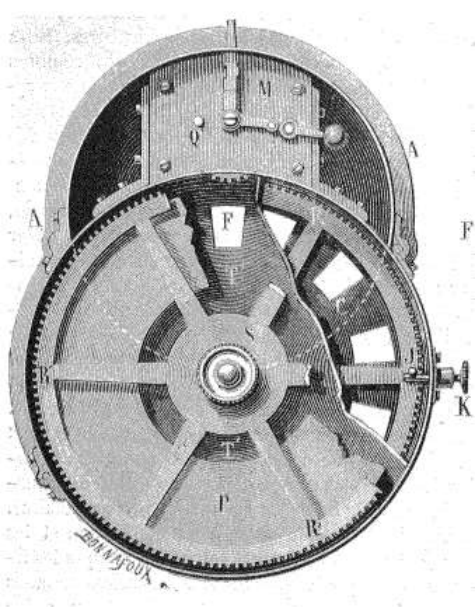
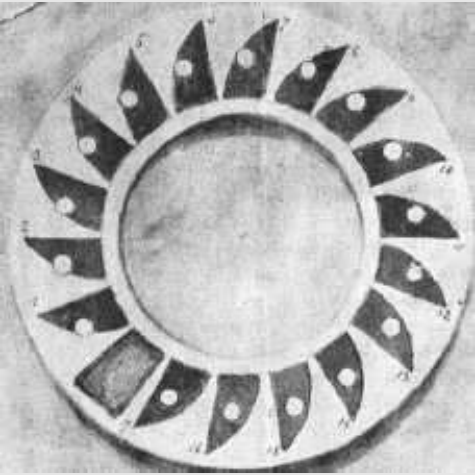


On sait que désormais le passage de Vénus ne sera plus suffisant pour améliorer la détermination de la distance Terre-Soleil

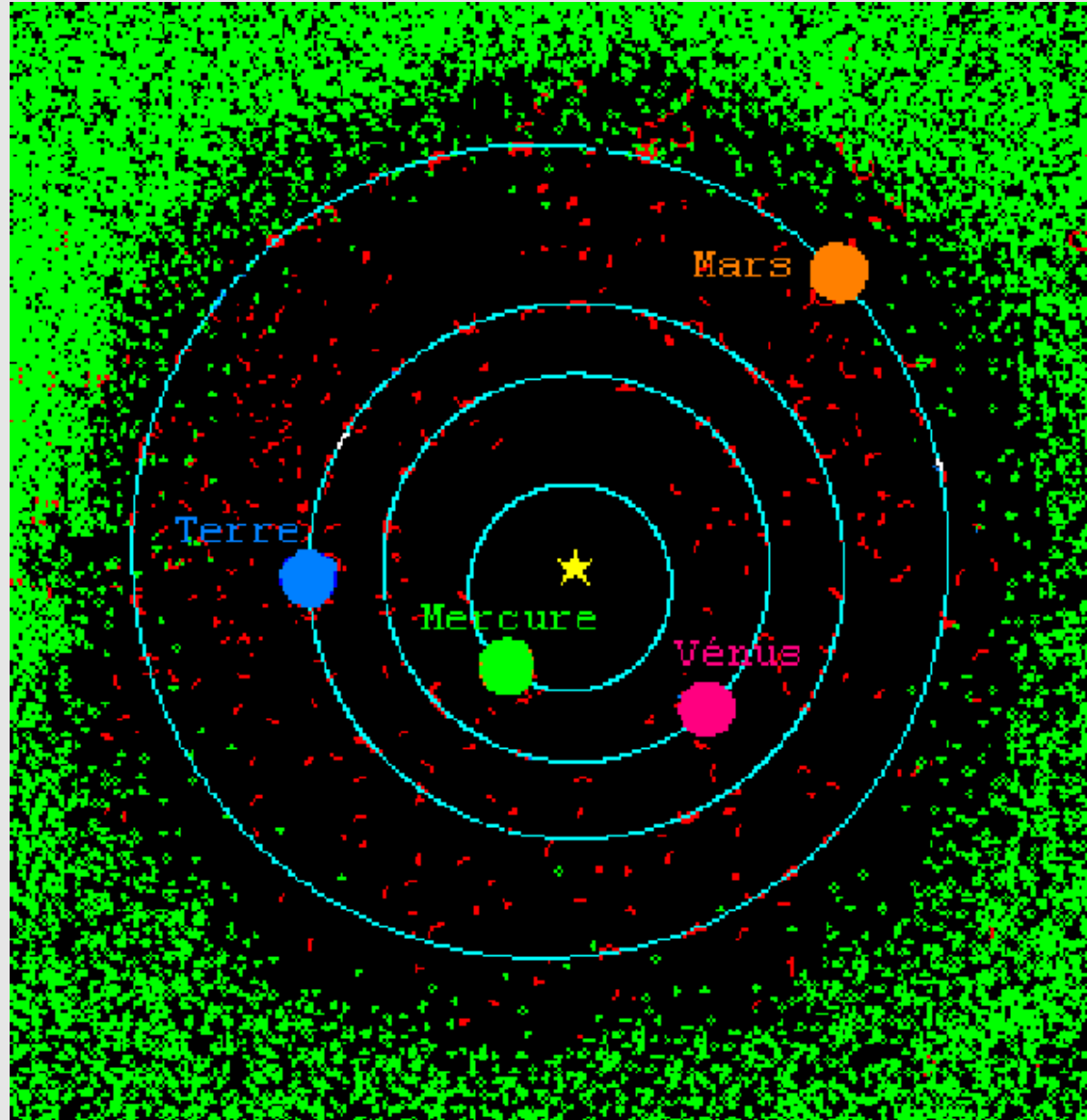
Le revolver photographique de Janssen, précurseur de la caméra cinématographique



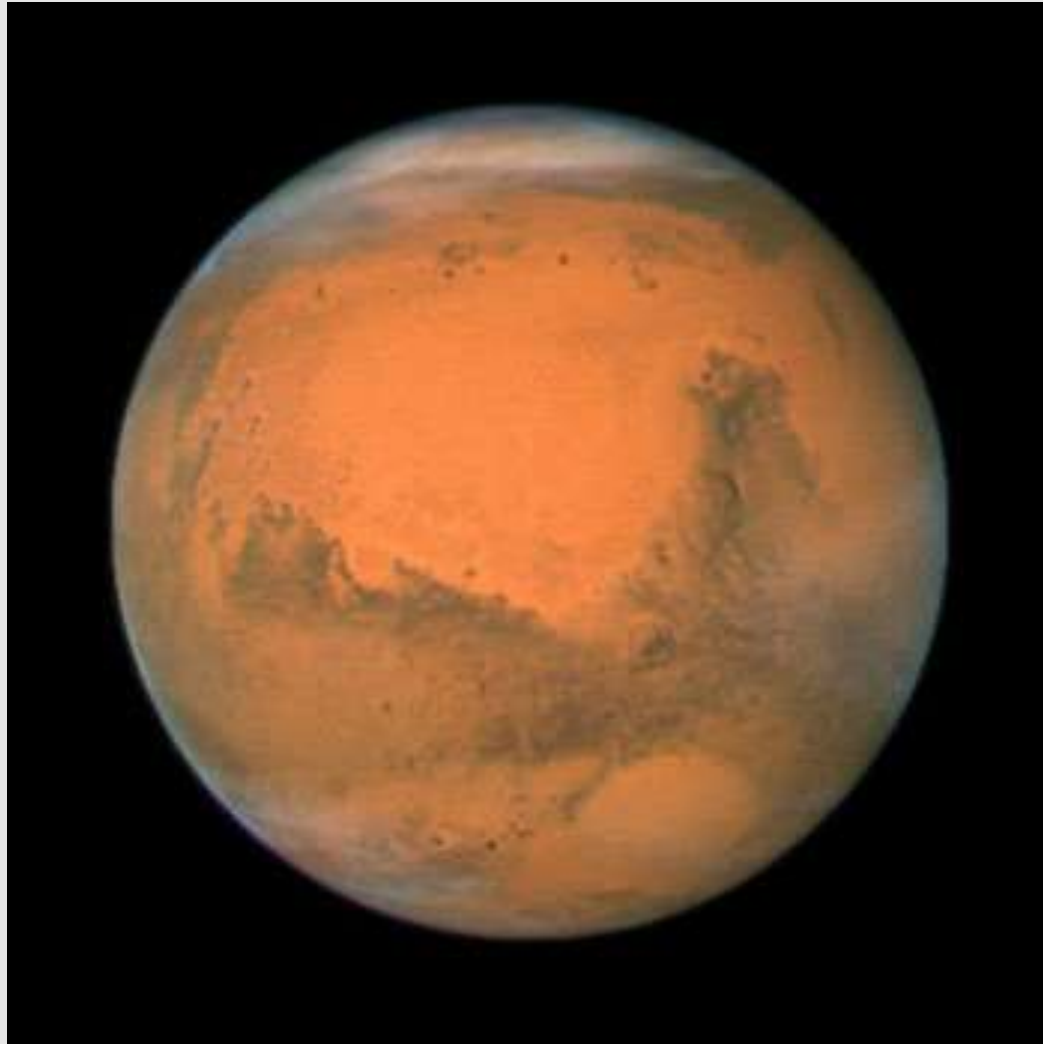
Observation de 1882 au Japon
par Janssen: le premier film !



Il n'y a pas que Mars et Vénus: il y a d'autres « planètes » proches de nous: les astéroïdes qui passent très près de la Terre



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



Radar



Antenne de 70 m de Goldstone (Californie)

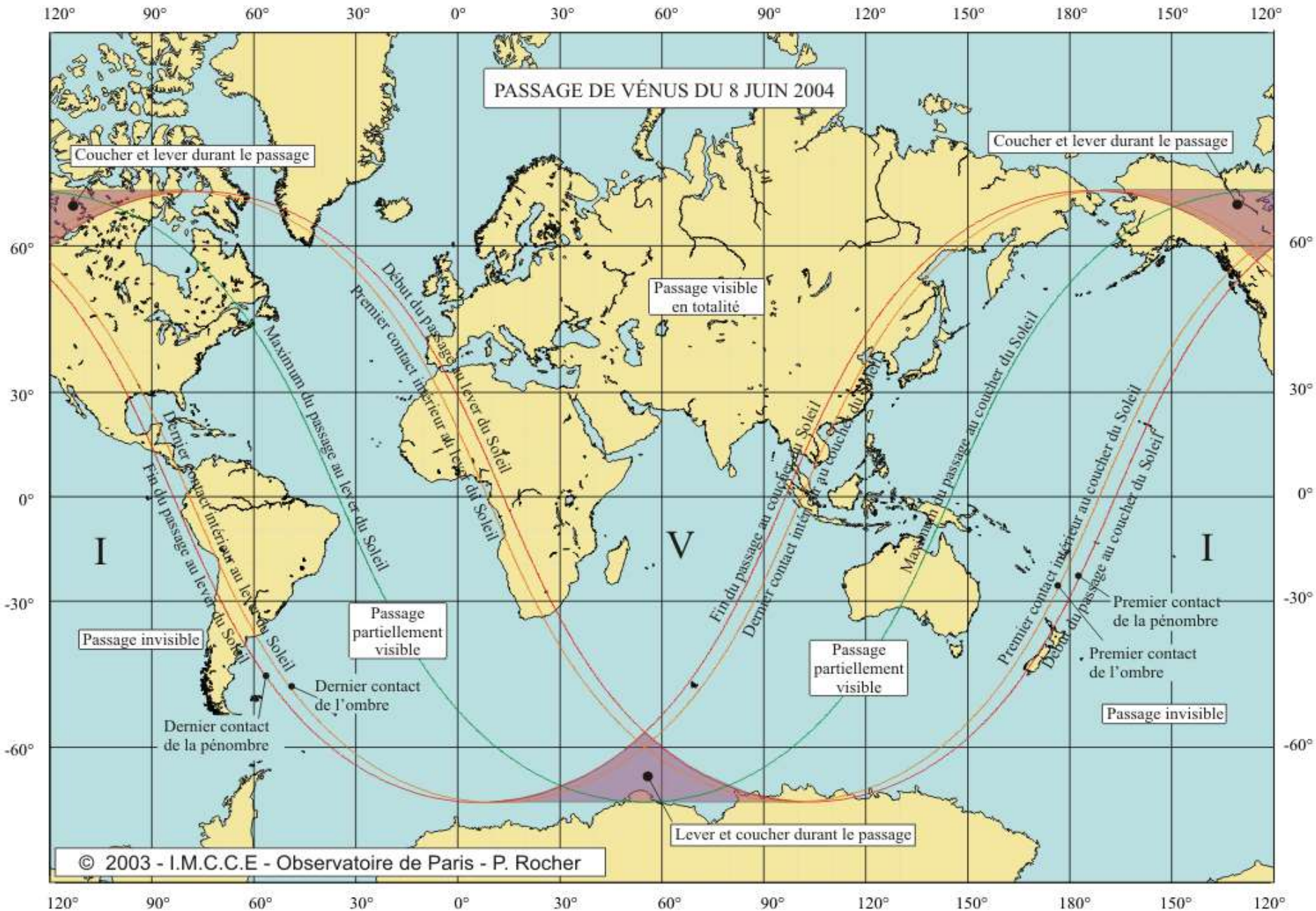
Antenne de 305 m d'Arecibo (Porto Rico)



Utilisation de la sonde Viking pour localiser la planète Mars



Carte de visibilité du passage de 2004



Vénus devant le Soleil en 2004



La distance Terre-Soleil = 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 »

La période 1610 – 1920: les « temps modernes »

- Pas de modèle d'univers global: il se réduit à notre monde proche, au **systeme solaire**
- L'univers est supposé statique régi par des lois locales qui nous permettent de prédire les événements astronomiques
- Les lois mise en lumière ne permettent pas de savoir ce qu'est l'univers, ni sa taille

Le retour de la cosmologie

- Nous avons mesuré le système solaire. Mais comment aller au-delà?
- D'abord comprendre comment est fait l'univers au-delà du système solaire. Il nous faut un modèle.
- La voûte céleste est une illusion mais l'univers est-il infini?

Quelle est la densité d'étoiles autour de nous?

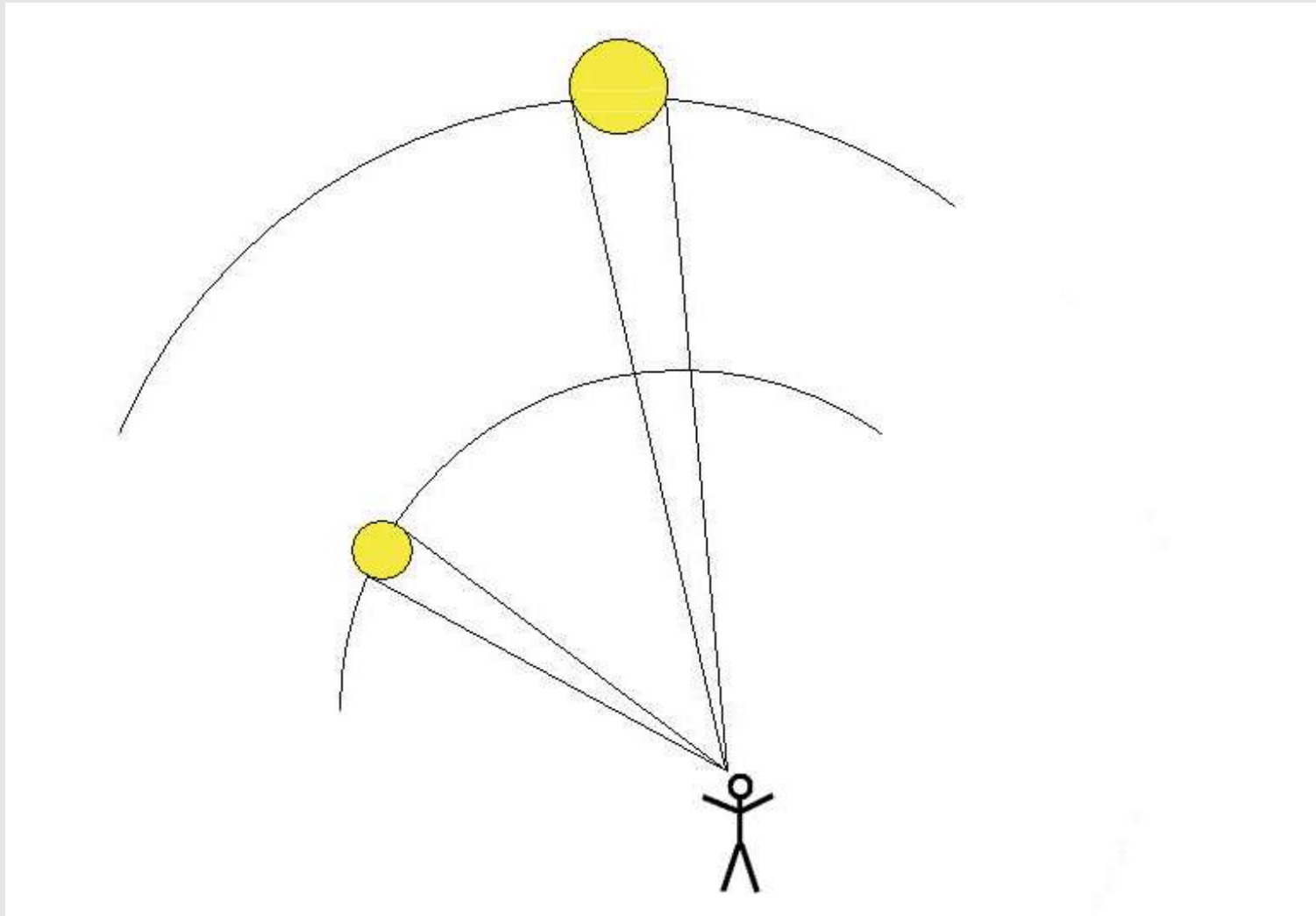
Jusqu'où y a-t-il des étoiles?

S'il y en a une infinité (ou même beaucoup), ne devraient-elles pas recouvrir tout le ciel qui aurait la brillance du Soleil?

(le paradoxe de Chézeaux-Olbers)

Ou bien l'univers serait-il très petit et limité à notre système solaire et à notre galaxie??

La brillance des étoiles: les étoiles ne sont pas des sources ponctuelles. Elles ont la brillance d'un soleil.



67 La quantité d'énergie reçue ne dépend que du diamètre apparent de l'étoile. Combien d'étoiles pour être aussi brillantes que le Soleil?

Notre système solaire se trouve dans une galaxie (la voie lactée) et l'univers est constitué de galaxies: quelle est la taille de la galaxie et quelles sont les distances aux galaxies les plus proches ou les plus lointaines?



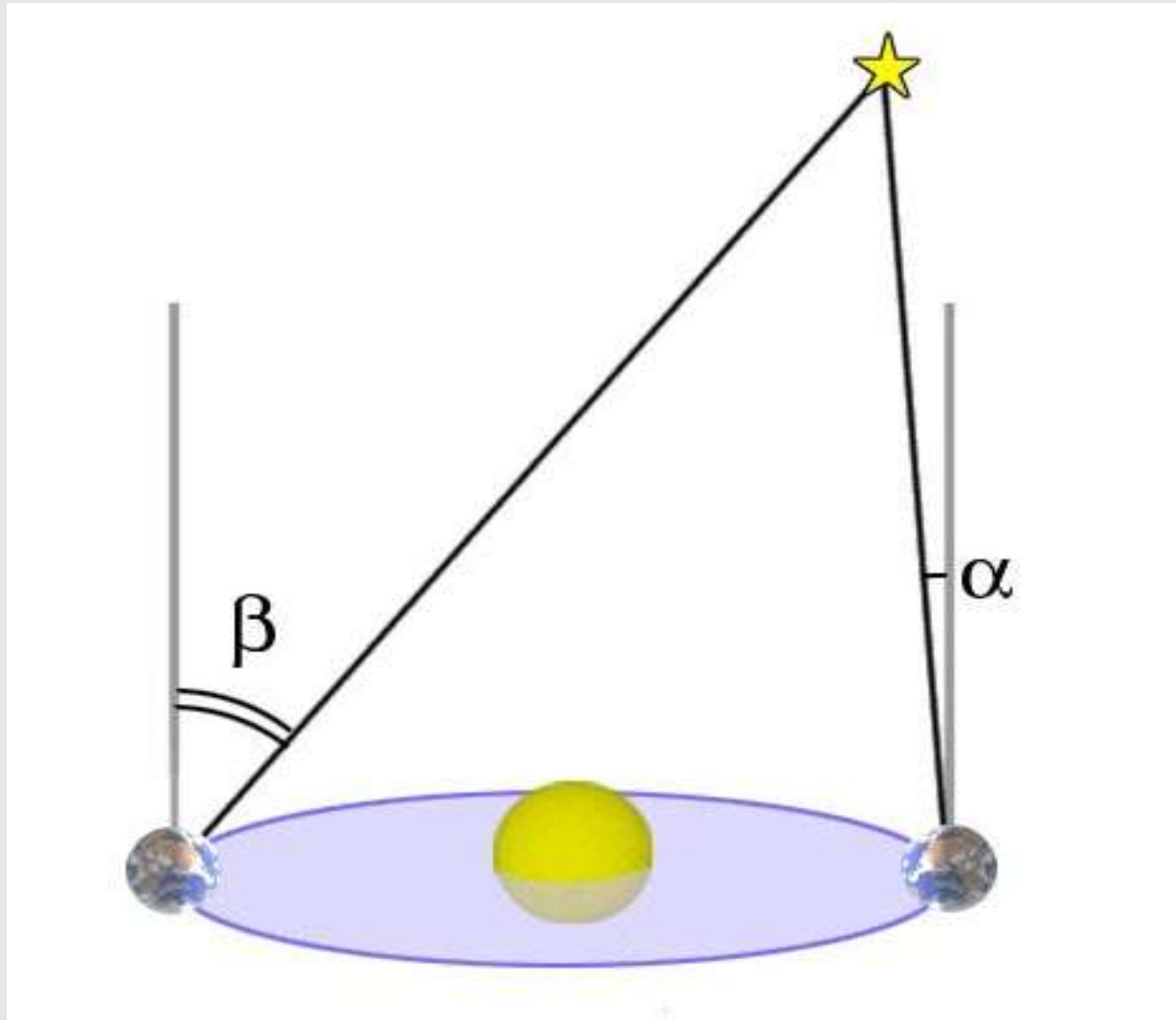
X ← notre système solaire

Mais comment mesurer déjà la distance des étoiles?



Peut-on appliquer le principe de triangulation pour la distance des étoiles?

Oui: c'est la parallaxe annuelle avec une base de 300 millions de km



- Mais seules quelques étoiles proches sont accessibles par cette méthode, il faut trouver autre chose pour aller plus loin.

Hipparcos/Gaia



Satellite « astrométrique »

L'observation des positions et des parallaxes des étoiles depuis l'espace permettra de mesurer la distance de très nombreuses étoiles grâce à une meilleure précision et donc de voir la galaxie en relief.

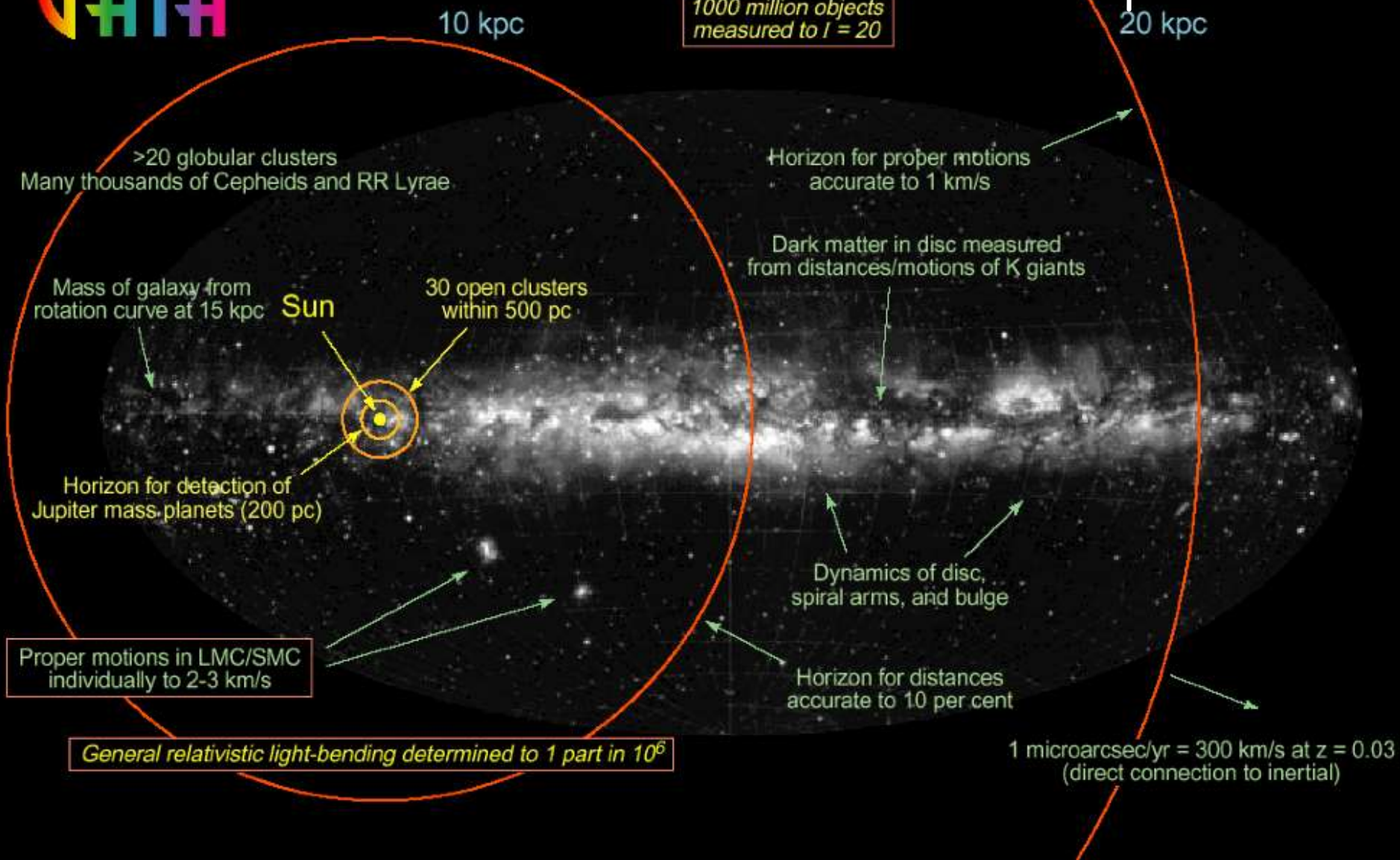
Rappel de notre situation



✕ ← notre système solaire



GAIA : résultats sur les distances des étoiles proches



On ne peut mesurer que les parallaxes des étoiles proches

Gaia

Étoiles proches avec une parallaxe trigonométrique



Nombre d'étoiles dans un rayon de 10 pc, 25 pc, et 100 pc, avec parallaxes dans le Catalogue Gaia des étoiles proches, Hipparcos, et autres programmes (principalement au sol). La surface des cercles est proportionnelle au nombre d'étoiles. Les cercles se superposent lorsque les étoiles ont plusieurs mesures de parallaxe.

L'histogramme représente le pourcentage d'étoiles avec une parallaxe mesurée au sol, puis Hipparcos, puis Gaia, respectivement.



Catalogue Gaia
des étoiles proches

Hipparcos

Sol

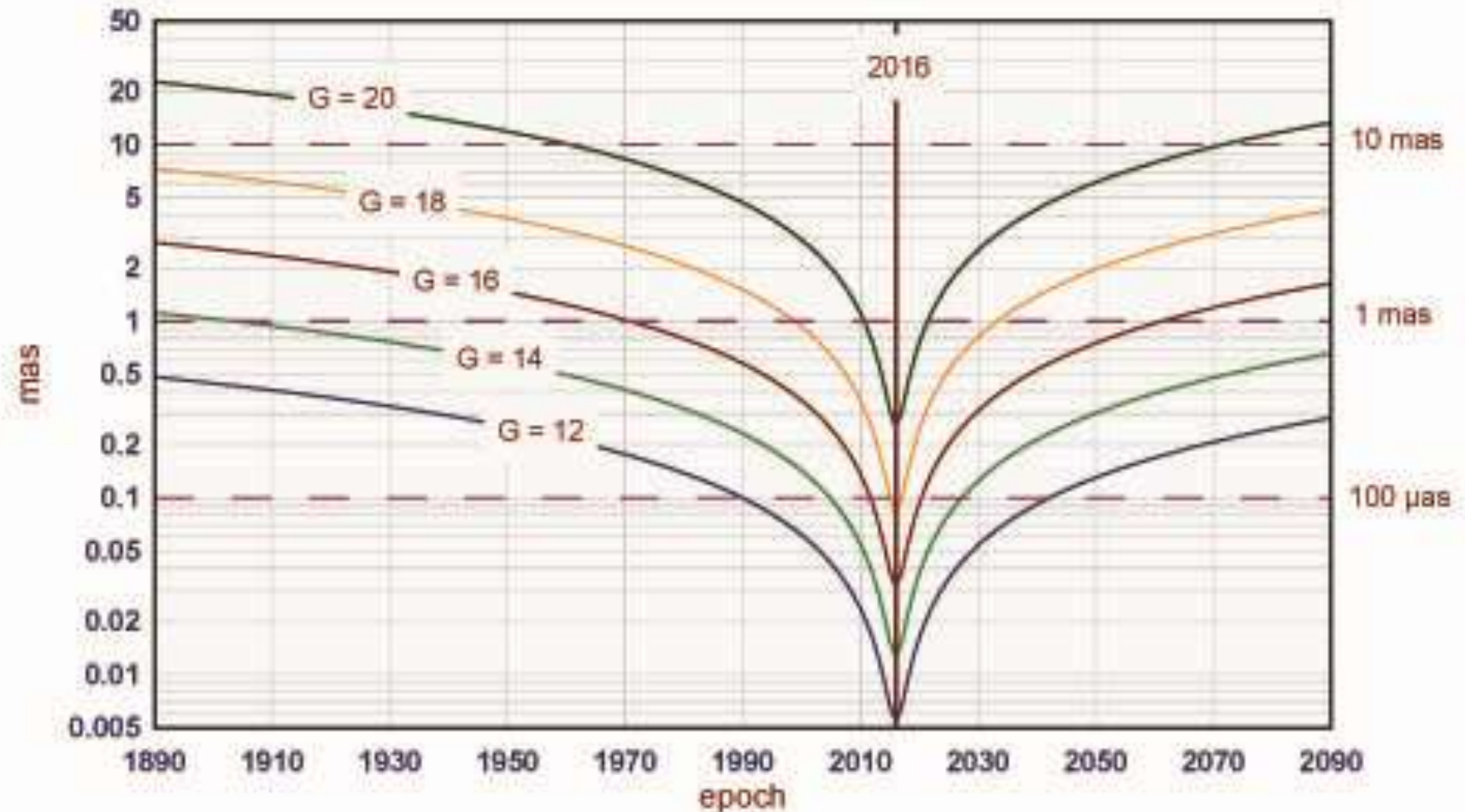
Les résultats de Gaia: la dynamique de l'amas des Hyades



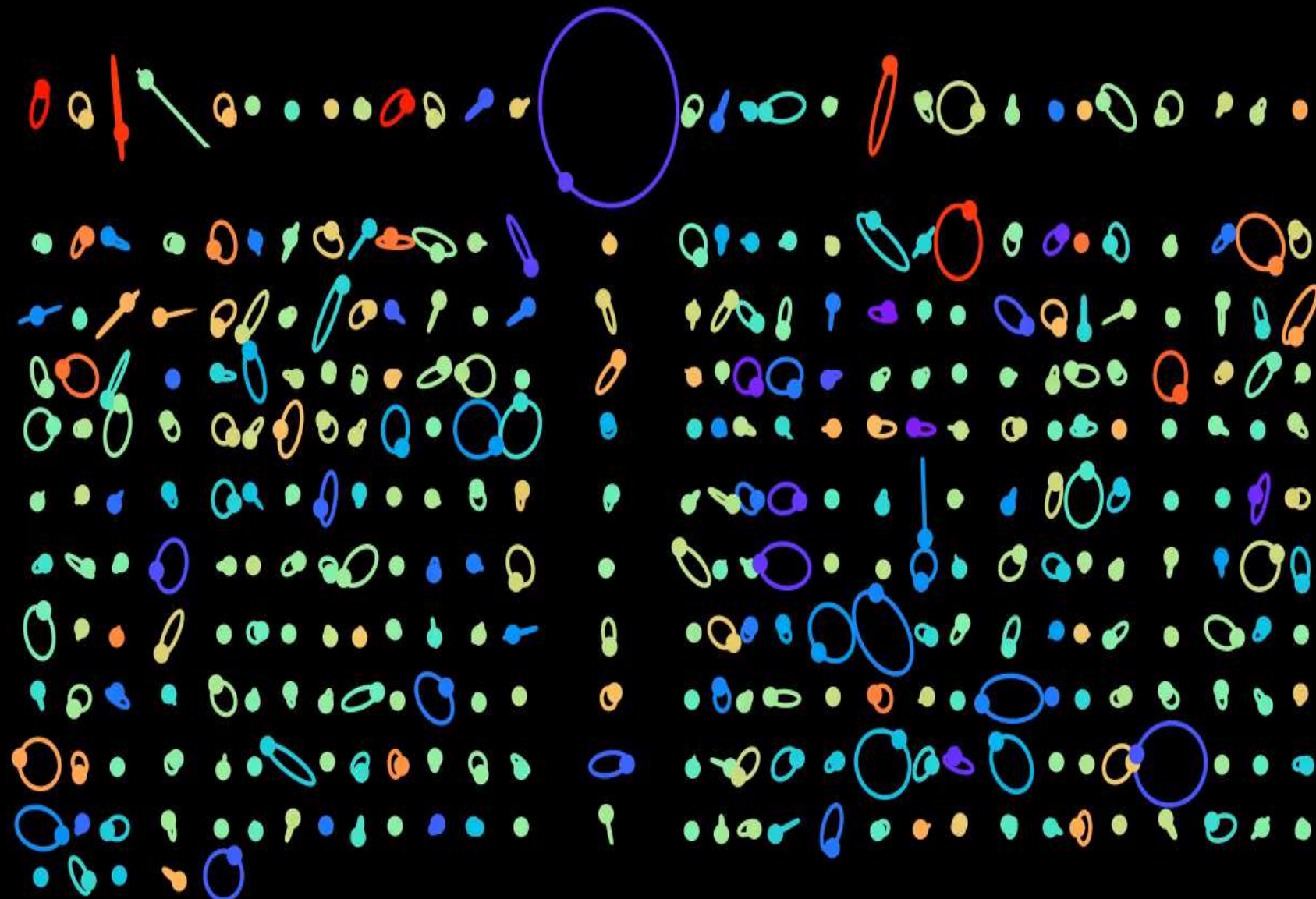
Les observations de Gaia montrent que la galaxie a absorbé une petite galaxie dans le passé

GAIA: une précision astrométrique durable

Gaia Catalogue: Positional accuracy



GAIA: une précision astrométrique durable: le mouvement propre des étoiles



Quelques définitions

- 1 UA (Unité Astronomique) \approx 150 millions de km
= distance moyenne Terre-Soleil
- 1 année lumière = distance parcourue par la lumière en 1 année $\approx 10^{16}$ m = 10 000 milliards de km
- 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 = $3,09 \cdot 10^{19}$ m
- 1 Mpc = 10^6 pc = $3,09 \cdot 10^{22}$ m

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



Observons et classons les objets

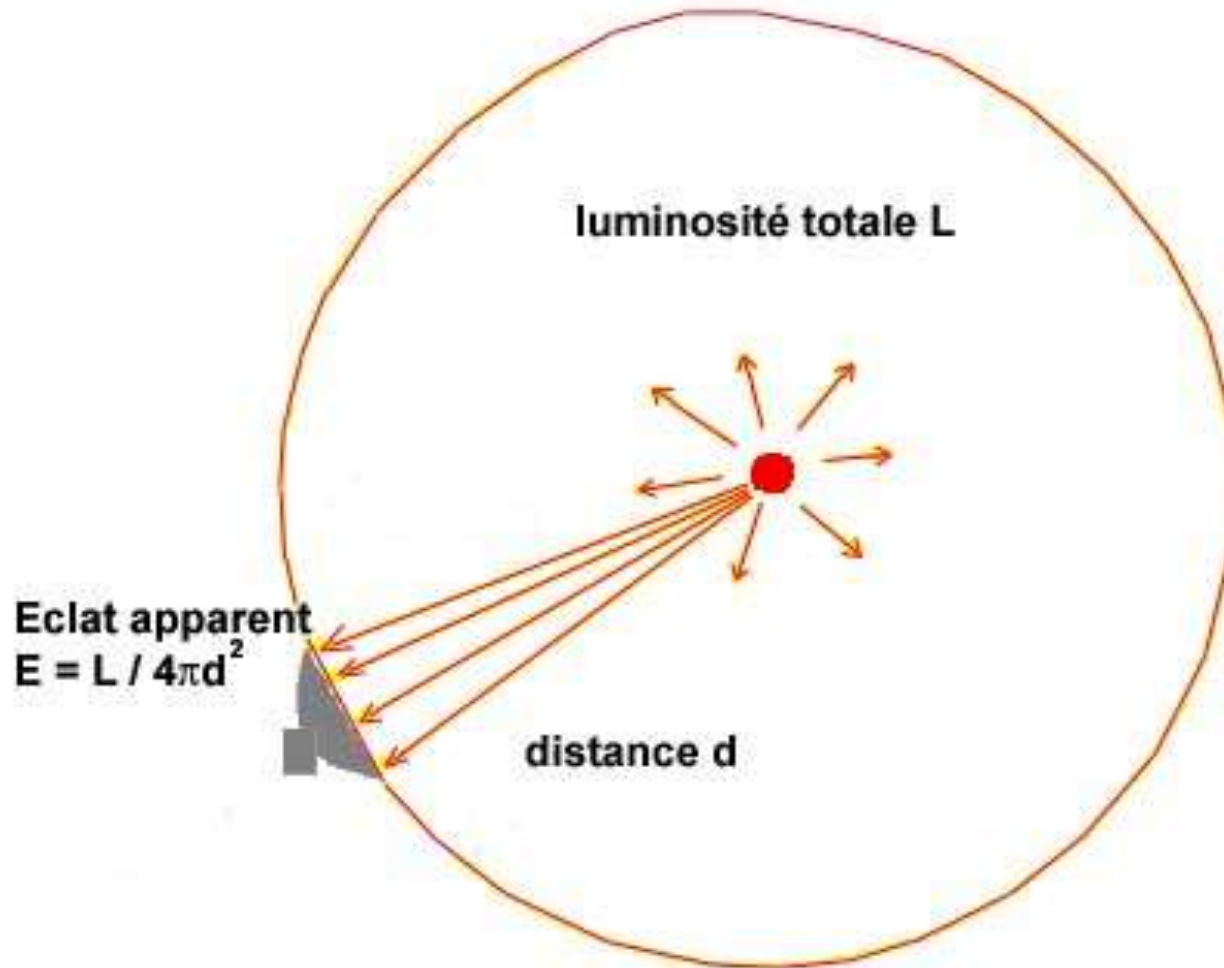
Différencier les nébuleuses internes à notre galaxies et les autres galaxies



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 dont on connaît la parallaxe des plus proches
 - Indicateurs secondaires : les étoiles supergéantes, les amas globulaires d'étoiles, les supernovae
 - Indicateurs tertiaires : les diamètres et luminosités des galaxies

La luminosité des étoiles va suppléer la triangulation pour les étoiles éloignées



Plus une étoile est loin, moins elle est brillante (→ parallaxe photométrique)
mais toutes les étoiles sont-elles identiques?



Distinguons les différents astres lointains



Observons et classons les objets: ce sont nos lampadaires!

La classification des étoiles

- On va remarquer que couleur (=température) et brillance d'une étoile caractérise sa nature
- Les étoiles de même type ont la même magnitude absolue et envoie la même luminosité jusqu'à nous
- La mesure de la magnitude apparente donne la distance (→ parallaxe spectroscopique)

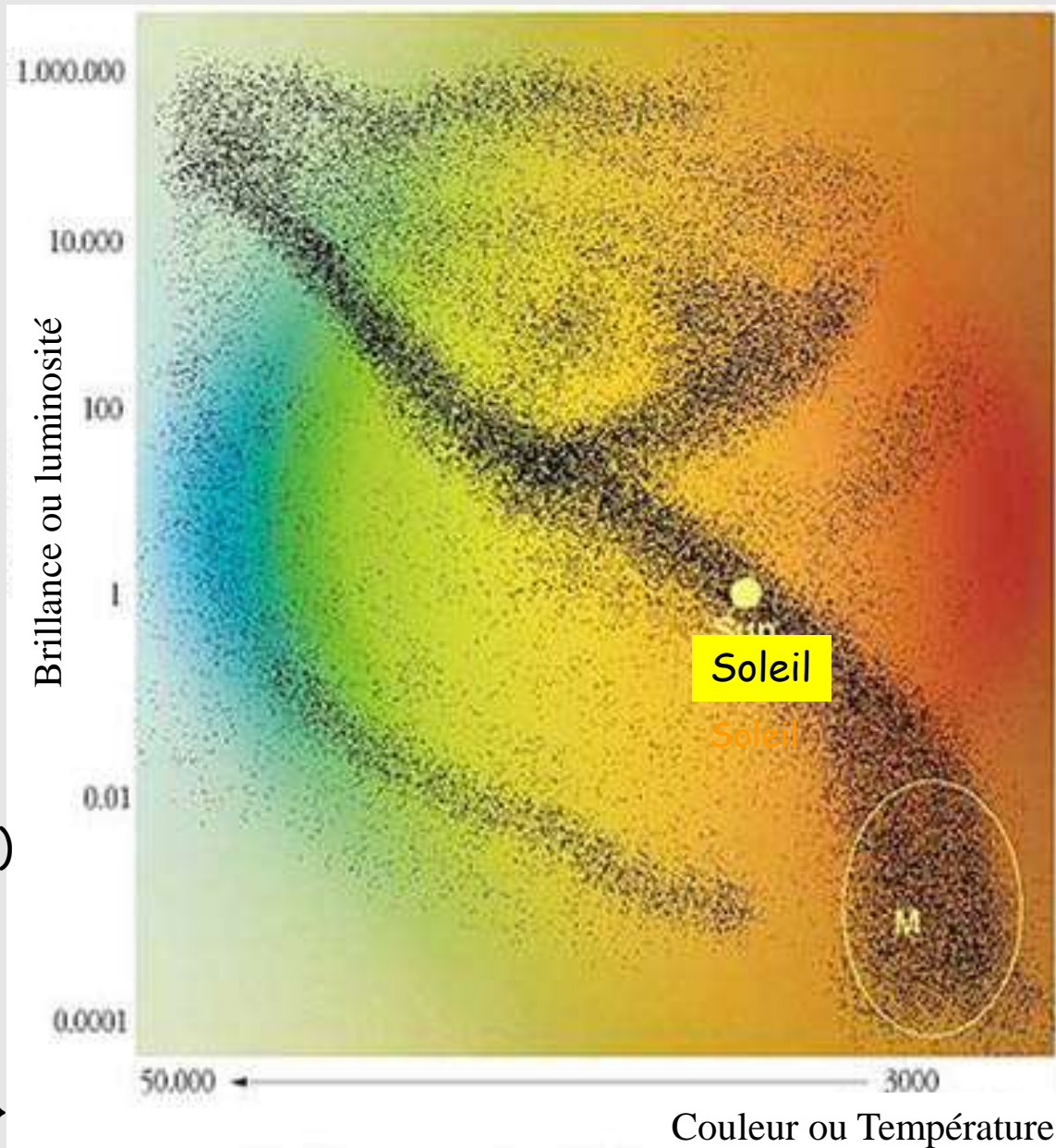
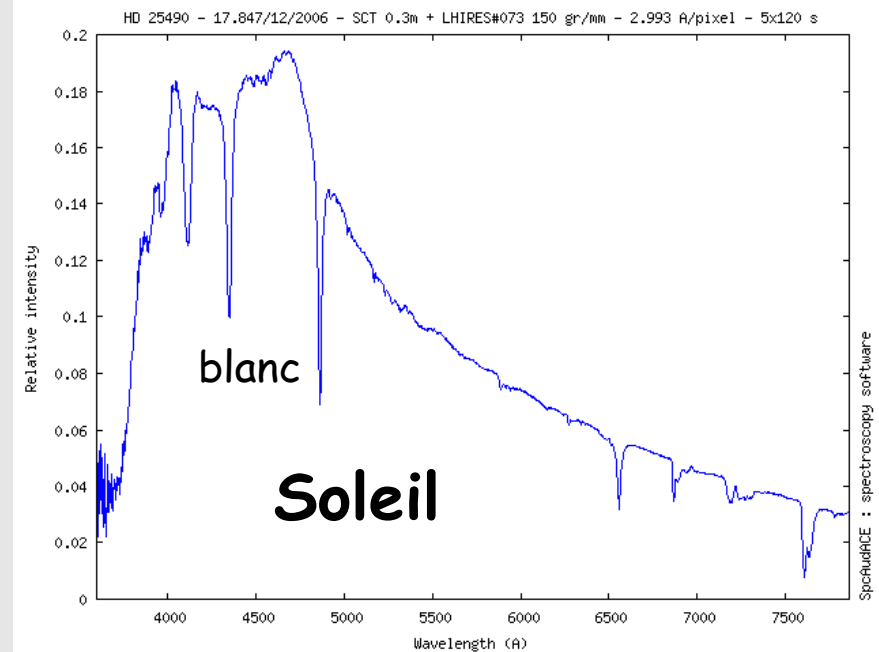
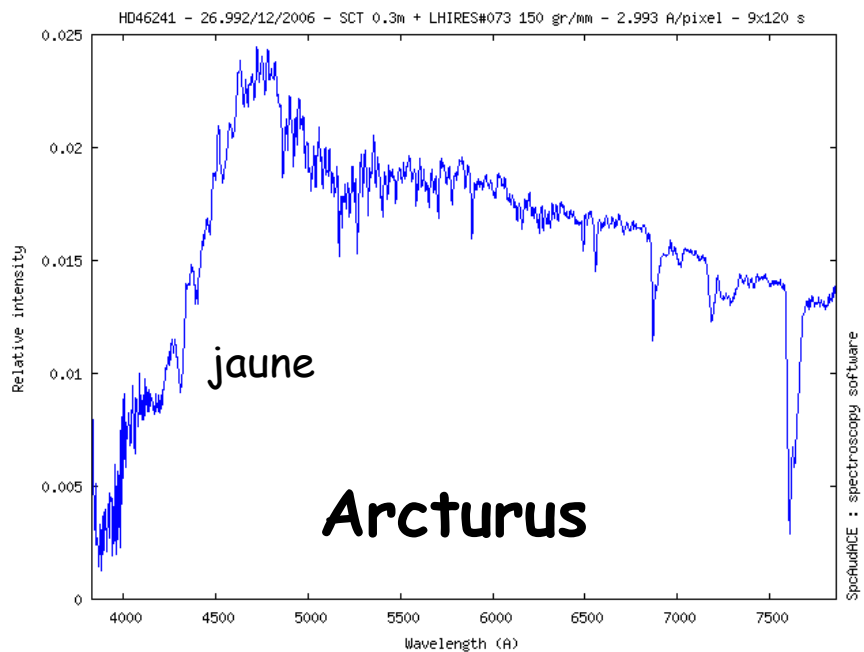
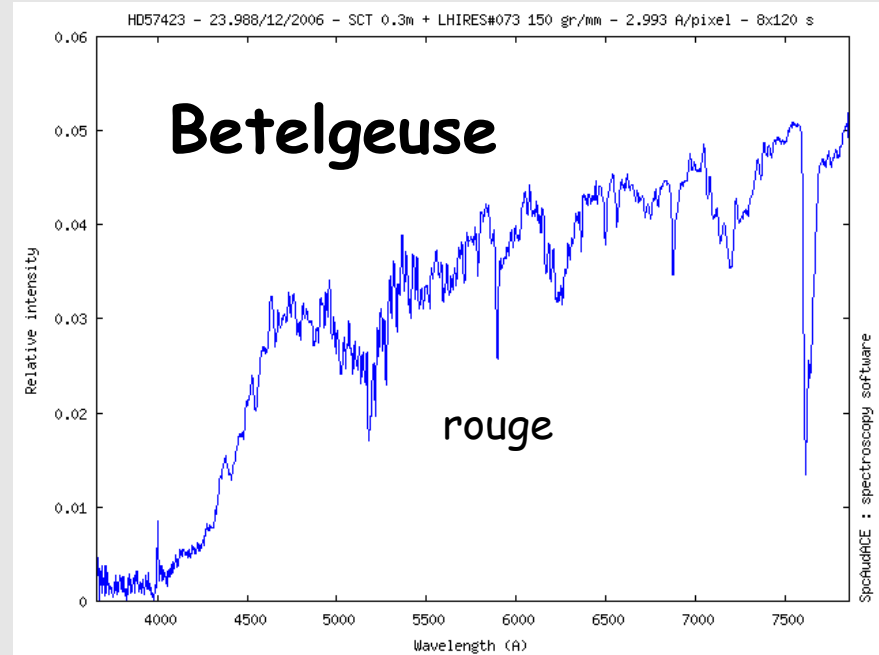
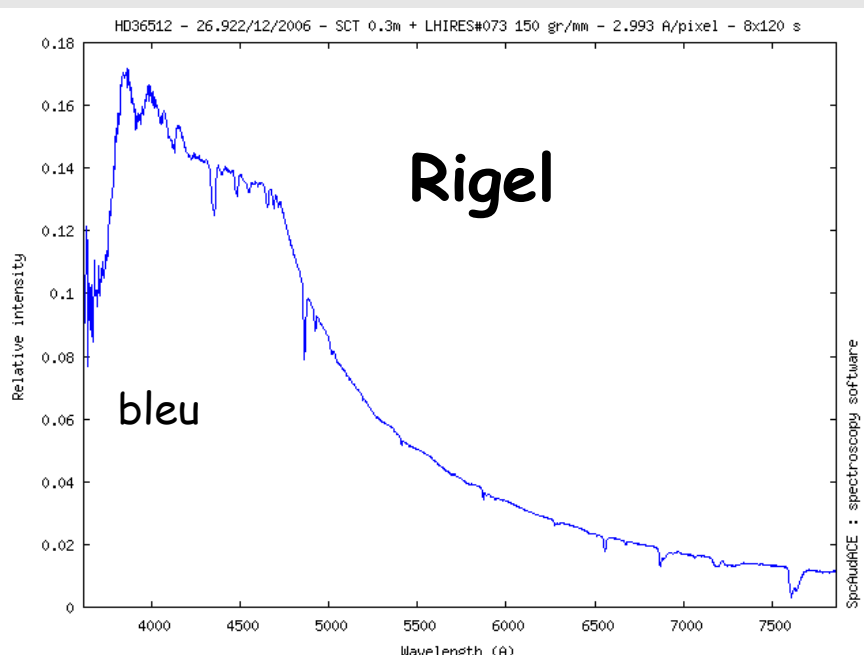


Diagramme de « Hertzsprung-Russell »

Couleur ou Température



La répartition des couleurs pour les étoiles: des catégories bien différentes



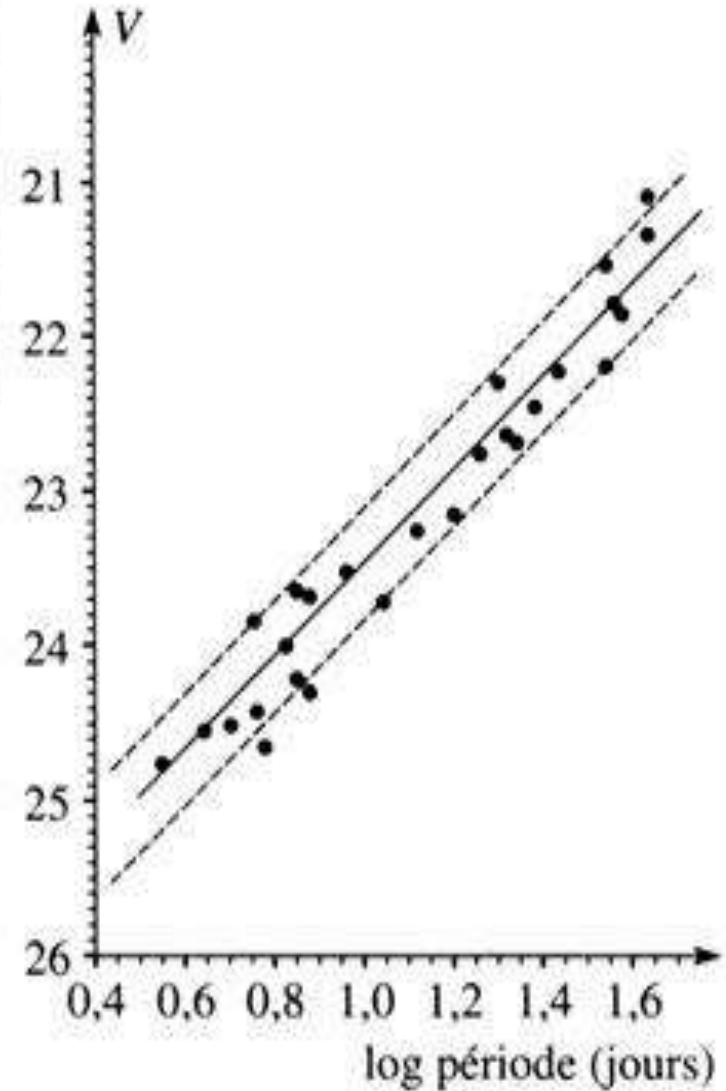
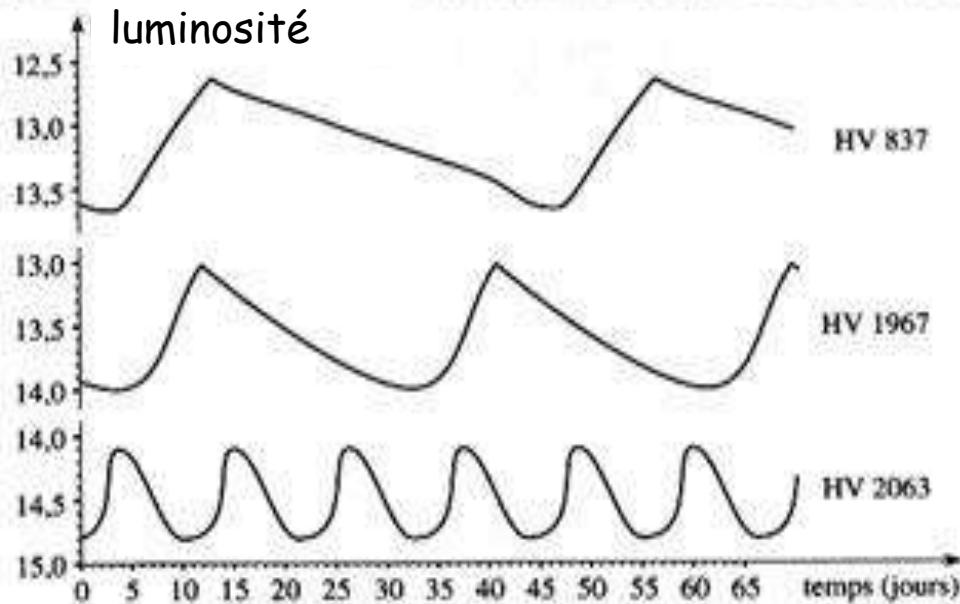
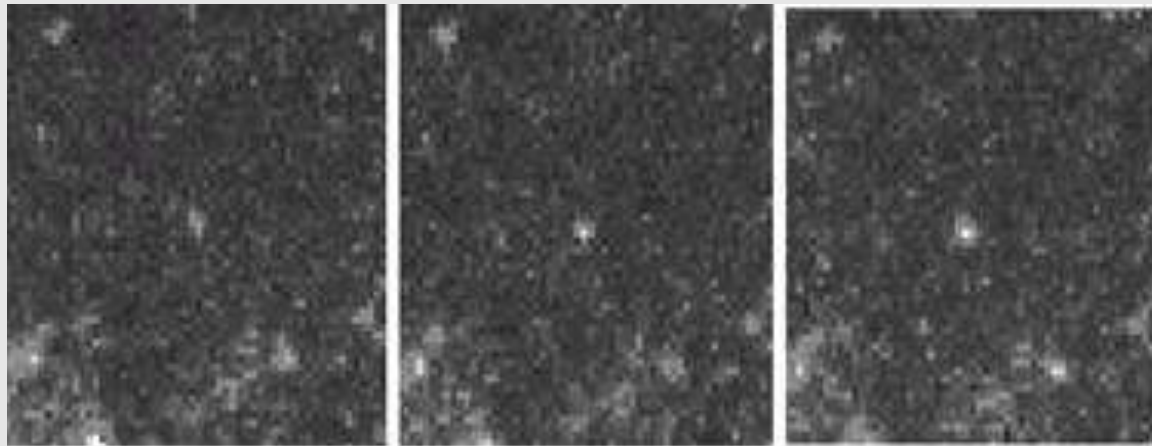
Quelques exemples de distances qui montrent que le problème change de nature

	<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
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 cosmique (galaxies les plus éloignées)	14 milliards d'années-lumière

Et la distance aux galaxies... ?



Les étoiles variables très typiques sont nos lampadaires de référence: les Céphéides



Les galaxies

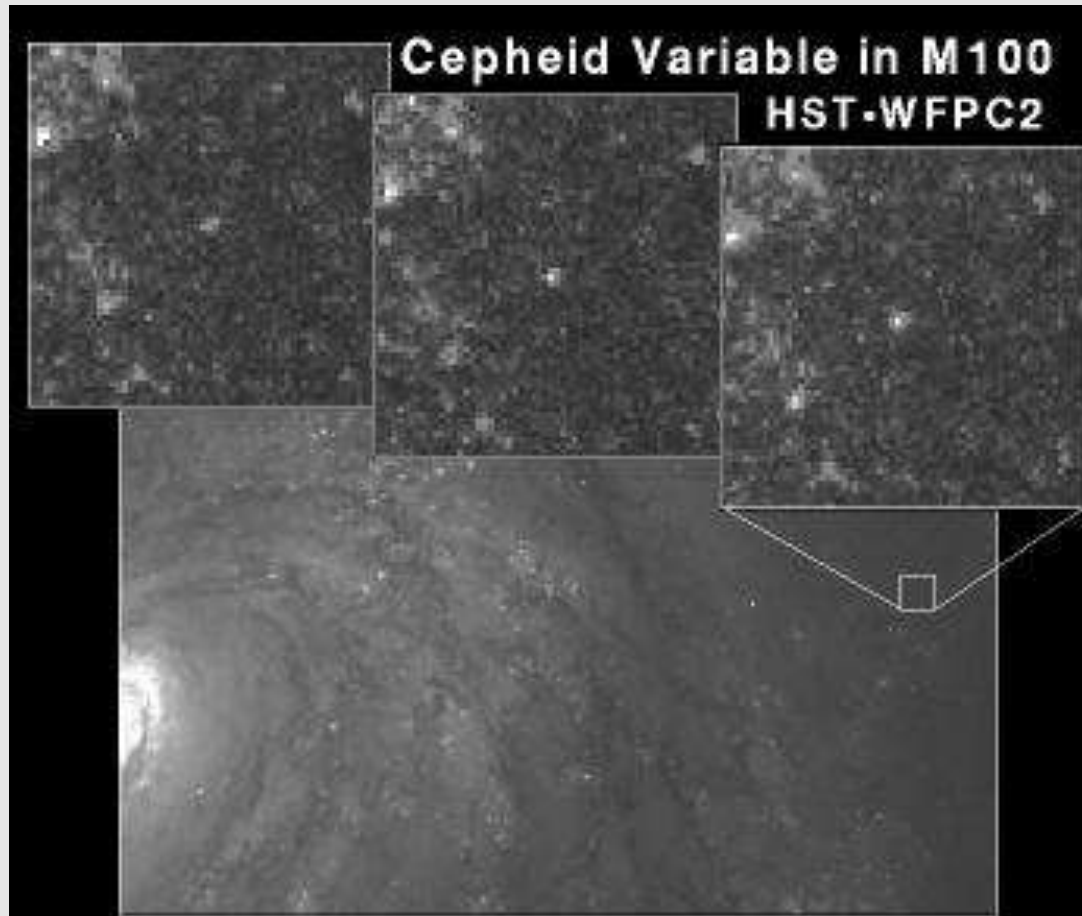
- On distingue très difficilement les étoiles individuellement

→ 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



Les galaxies

Les supernovae, phares de l'espace lointain



L'étoile normale puis transformée en supernova

91

→ 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.

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

Les galaxies

Les galaxies sont des amas de centaines de milliards d'étoiles comme notre Voie Lactée: on ne distingue pas les étoiles individuellement mais on y distingue:

→ les Céphéides

→ les supernovae

→ leur rotation, ce qui donne leur distance

Whirlpool Galaxy ■ M51

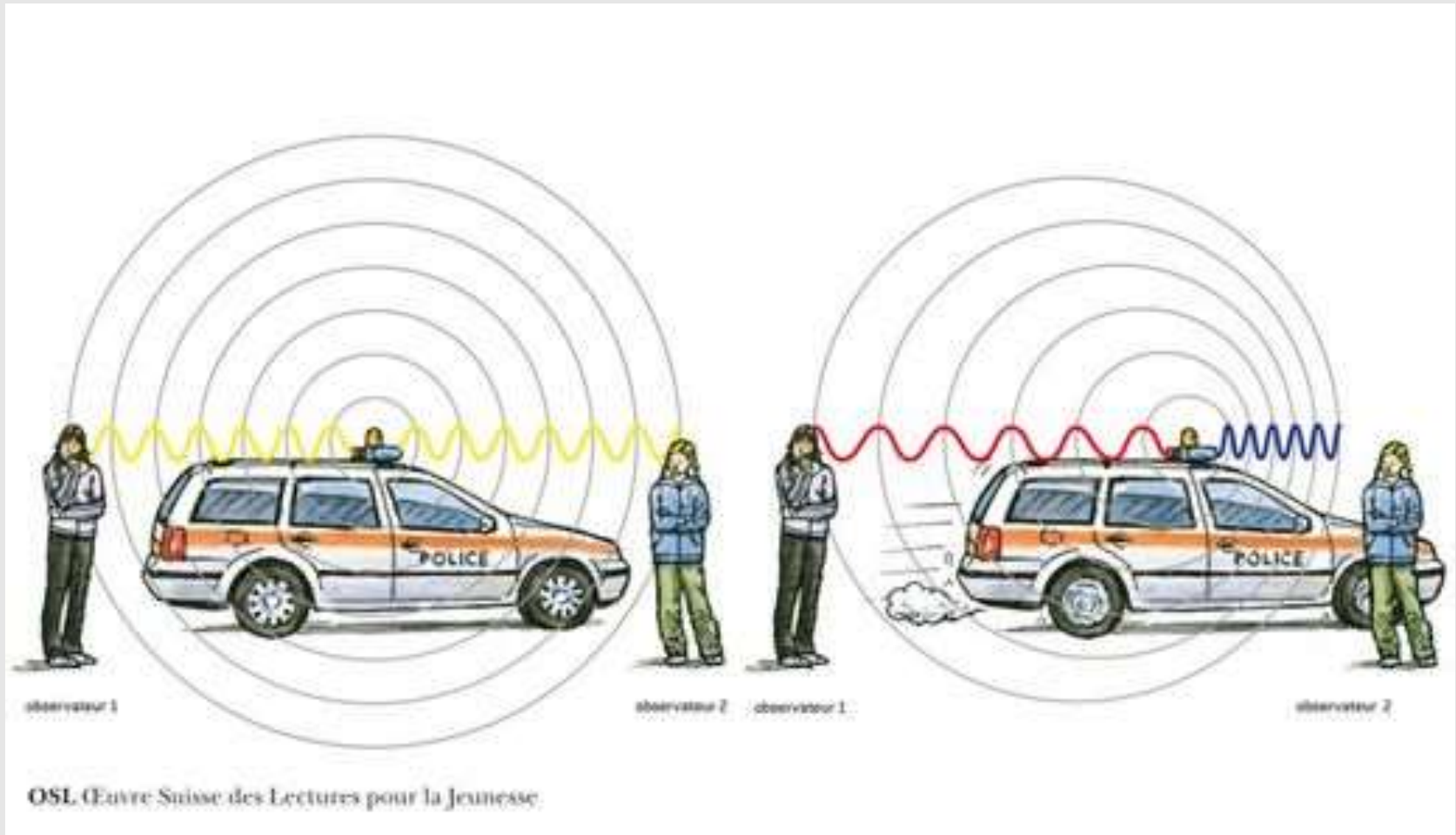


La couleur des galaxies

Les galaxies nous fuient d'autant plus vite qu'elles sont loin de nous et « rougissent », nous donnant leur distance

Cela nous donne une nouvelle représentation d'un univers en expansion qui a débuté sous forme d'un point.

Pourquoi les galaxies rougissent: l'effet Doppler?

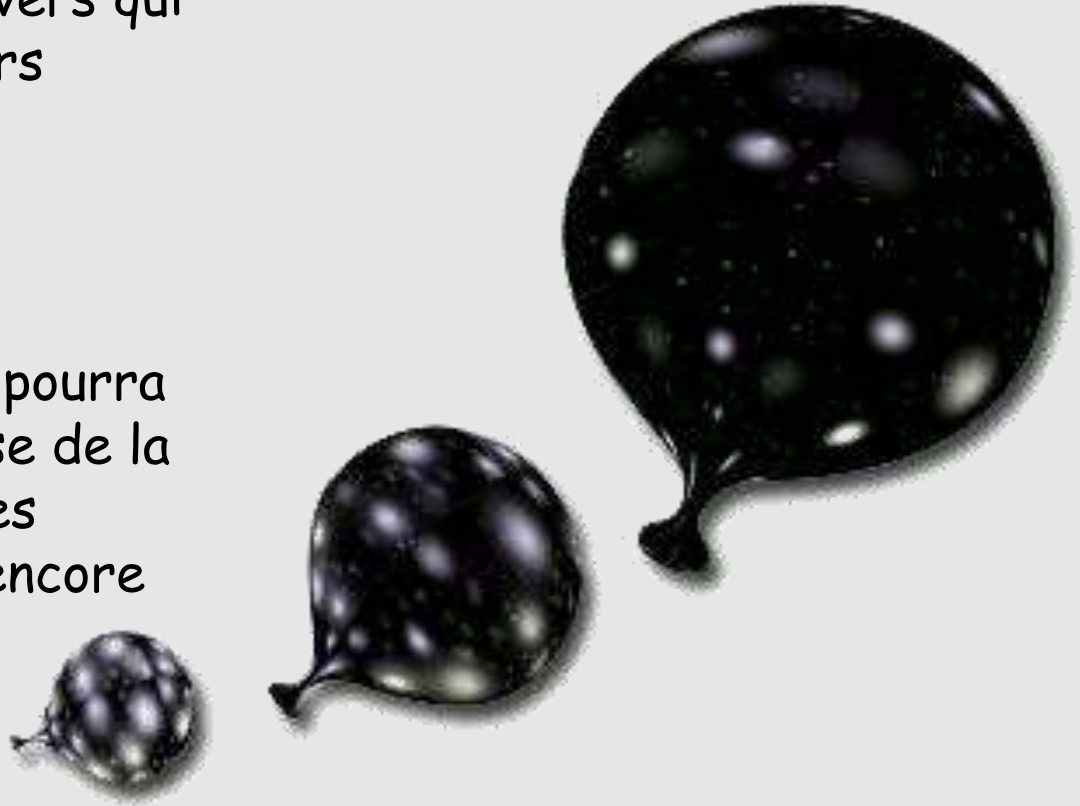


Non: leur éloignement vient de l'expansion de l'univers et non de leur mouvement propre

L'expansion de l'univers

Les galaxies ne s'éloignent pas les unes des autres, c'est l'univers qui gonfle mais remplit toujours TOUT l'espace!

Ainsi leur vitesse de fuite pourra atteindre 3,3 fois la vitesse de la lumière! Mais alors on ne les verra plus! Et le ciel sera encore plus noir...

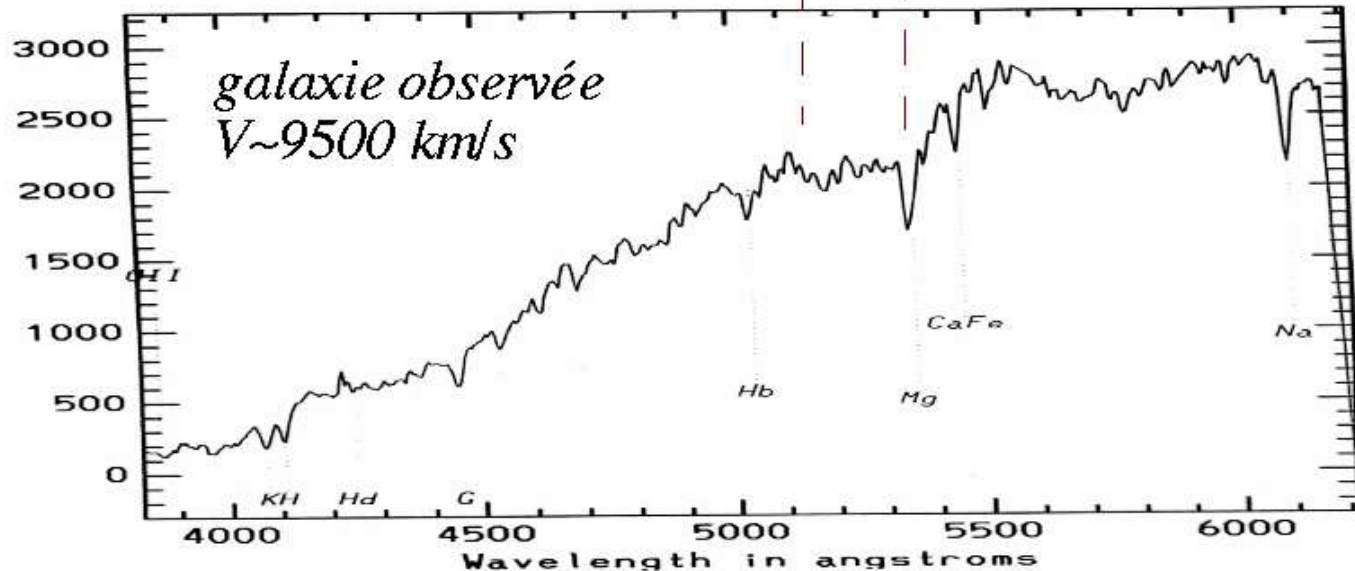
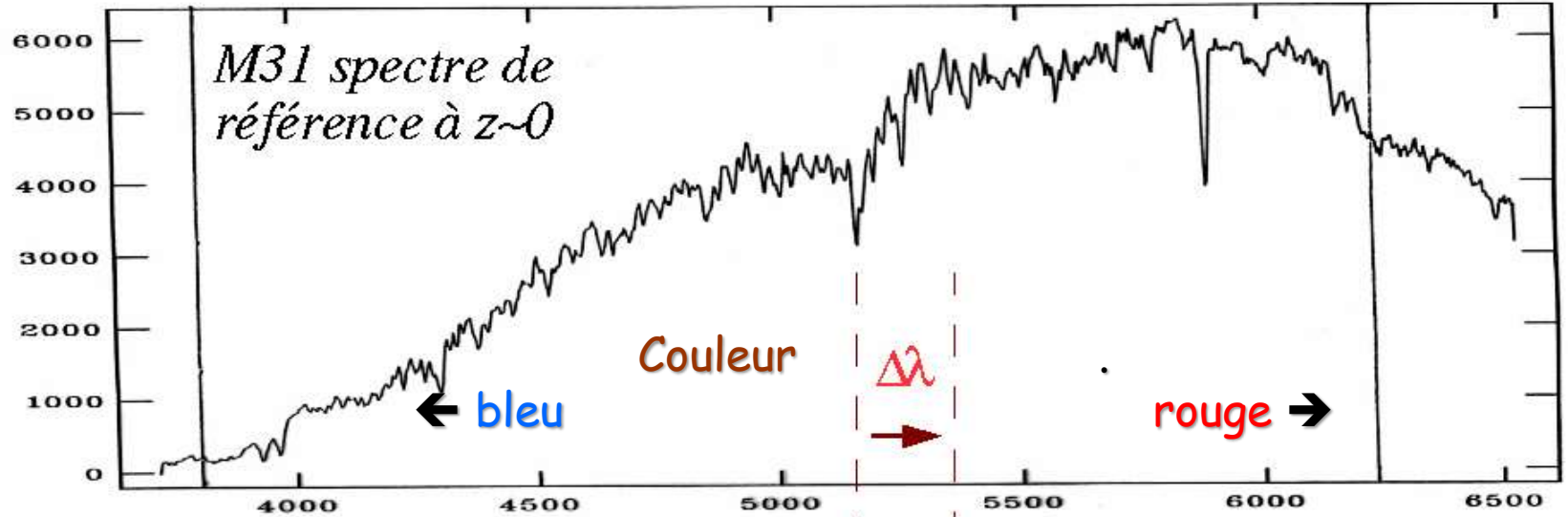


En nous fuyant les galaxies rougissent selon leur vitesse donc leur distance

La fuite des galaxies dans leur profil de couleur

La mesure du redshift

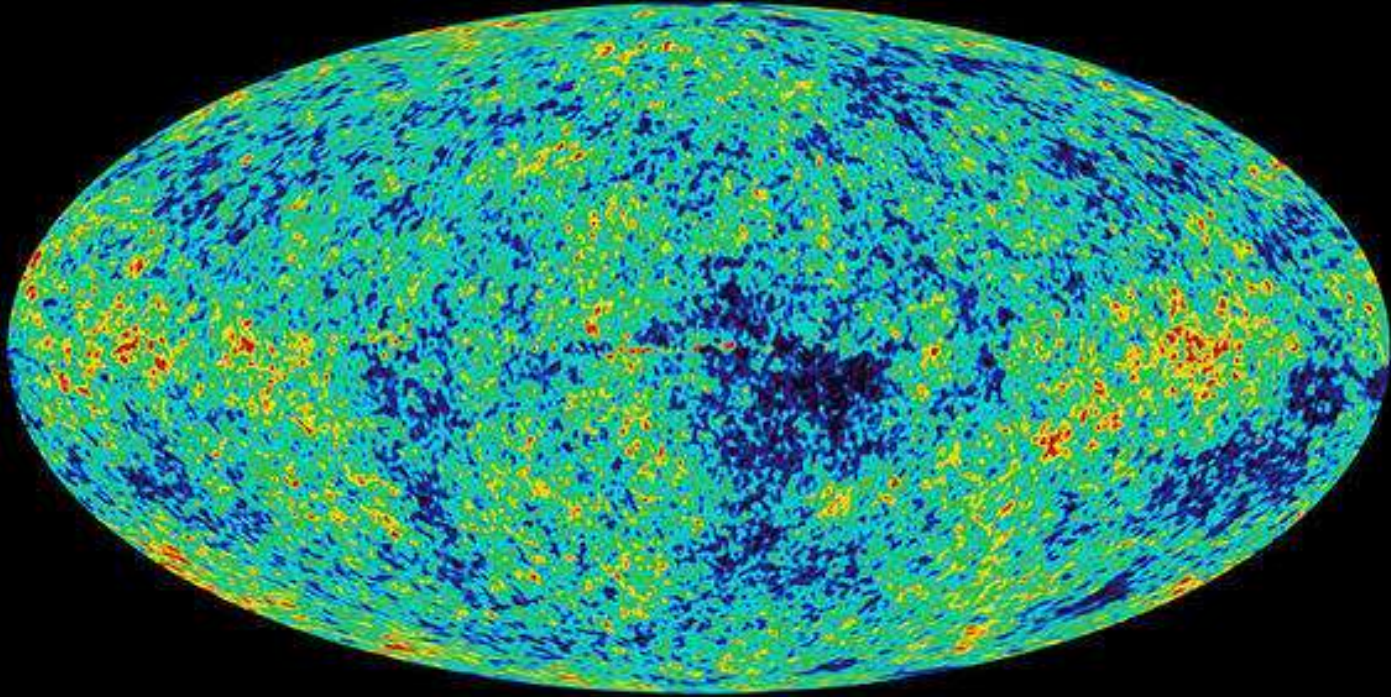
$$z = V/c = \Delta\lambda/\lambda$$



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

L'extrémité et le début de l'univers?



- Au plus loin observable, l'univers devient opaque: c'est l'univers à sa naissance! Il n'y a pas encore de lumière ni de galaxies! Sa vitesse de fuite est très grande, il est très rouge mais pas homogène.
- La distance est évaluée à 14 milliards d'années-lumière. C'est donc l'univers tel qu'il était il y a 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... Nous n'observons que l'univers du passé.
- La taille de l'univers? Au moins 50 à 90 milliards d'années-lumière?
- Mais si l'univers a « une taille », il n'a pas de frontière! Il remplit tout l'espace...

Conclusion: à retenir...

- La quête n'est pas finie: la taille de l'univers est encore incertaine mais il **grandit toujours** et de plus en plus vite tout en remplissant tout l'espace!
 - Un modèle théorique d'univers est nécessaire pour pouvoir le mesurer:
 - Aristote
 - Ptolémée
 - Newton et l'héliocentrisme
 - Einstein et la relativité générale
 - L'expansion de l'univers et le « big bang »
- c'est l'observation précise des distances qui confirme la validité d'un modèle et nous permet d'aller plus loin
- Nous n'observons que le passé, il nous est impossible d'observer l'univers dans son ensemble
- nous n'aurons jamais que des représentations très imparfaites de l'univers liées à notre modèle théorique.