

Les distances en astronomie

- Les échelles du système solaire aux lointaines galaxies
- La mesure des distances dans l'univers visible



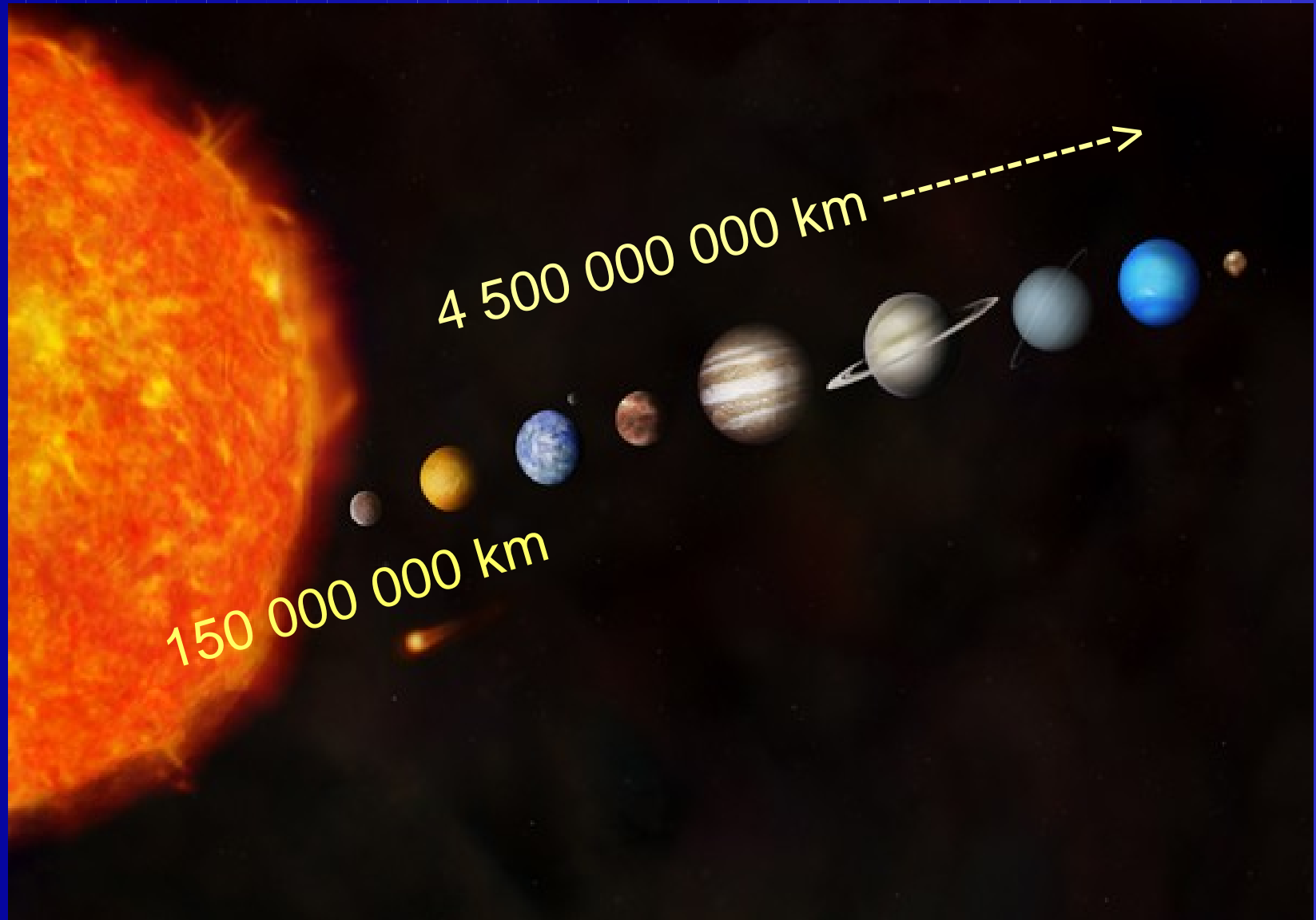
L'infini, c'est loin, surtout vers le bout.....(inspiré de Woody Allen).

Les unités de mesure de distance

- Le kilomètre : Km. Le méridien terrestre mesure 40.000 Km par convention (26 mars 1791, de Borda, Condorcet, Laplace, Lagrange et Monge)
- L'unité astronomique : UA. Distance moyenne de la terre au soleil. $1 \text{ UA} = 149\,600\,000 \text{ Km}$
- L'année-Lumière : al. Distance parcourue par un photon en une année. $1 \text{ al} = 9\,460\,000\,000\,000 \text{ Km}$ ou 63.241,1 UA
- Le parsec : pc. Le parsec (pour parallaxe-seconde) est la distance à laquelle une unité astronomique (ua) sous-tend un angle d'une seconde d'arc. $1 \text{ Pc} = 3,26 \text{ al}$ ou 206265 UA.

Si la parallaxe d'une étoile est mesurée en secondes d'arc, alors la distance entre cette étoile et le Soleil, exprimée en parsecs, est égale à l'inverse de cette valeur.

Les distances dans le système solaire



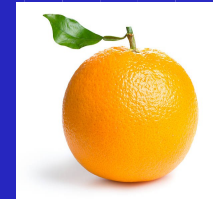
Les échelles du système solaire : relativement à,,,



- Soleil ---> Géode
- $R=700.000\text{km}$: 18m



- Terre ---> casque
- $R=6400\text{km}$: 15cm



- Lune ---> orange
- $R=1700\text{km}$: 4,4cm

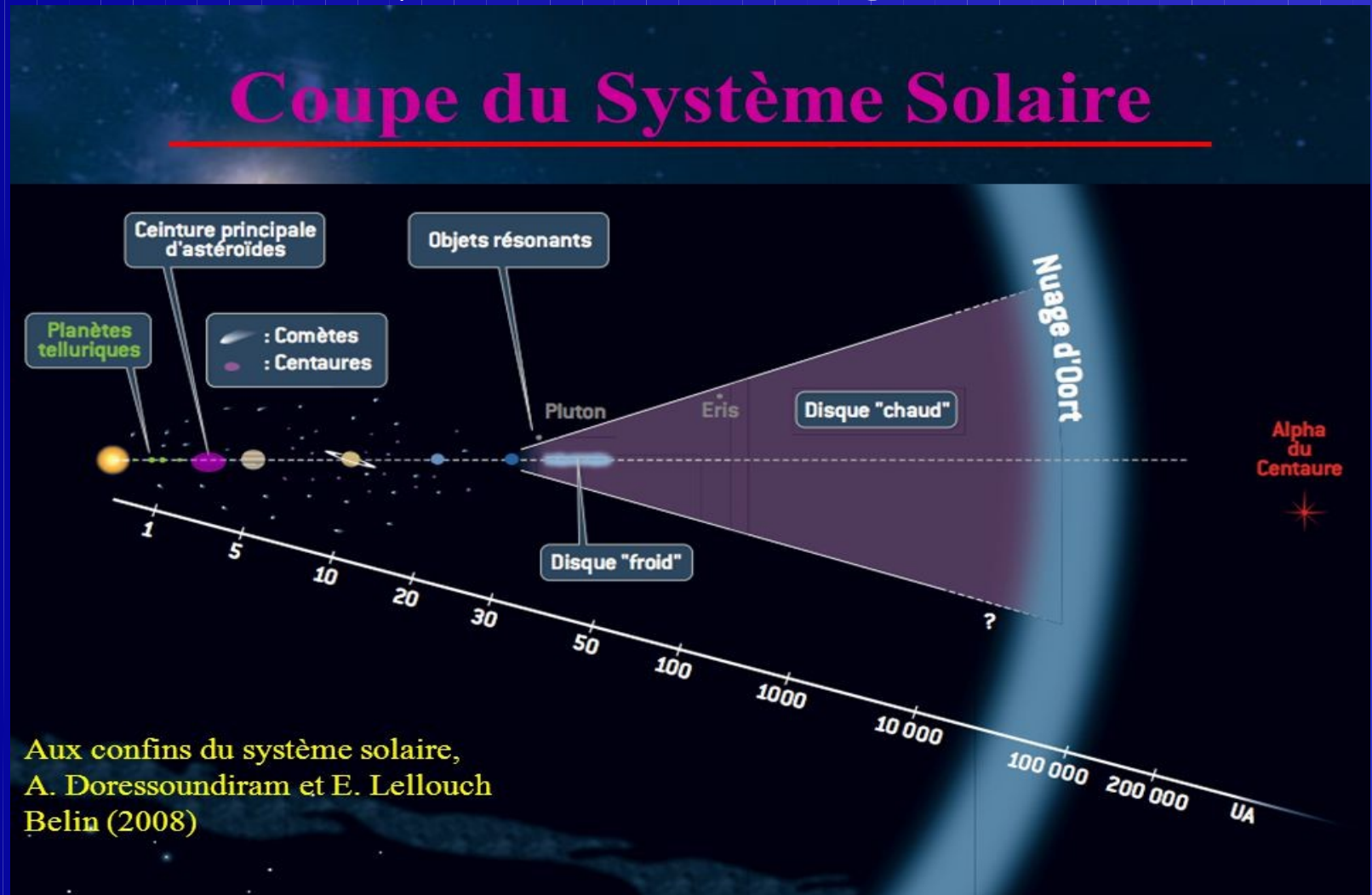
Les échelles du système solaire relativement à,,,

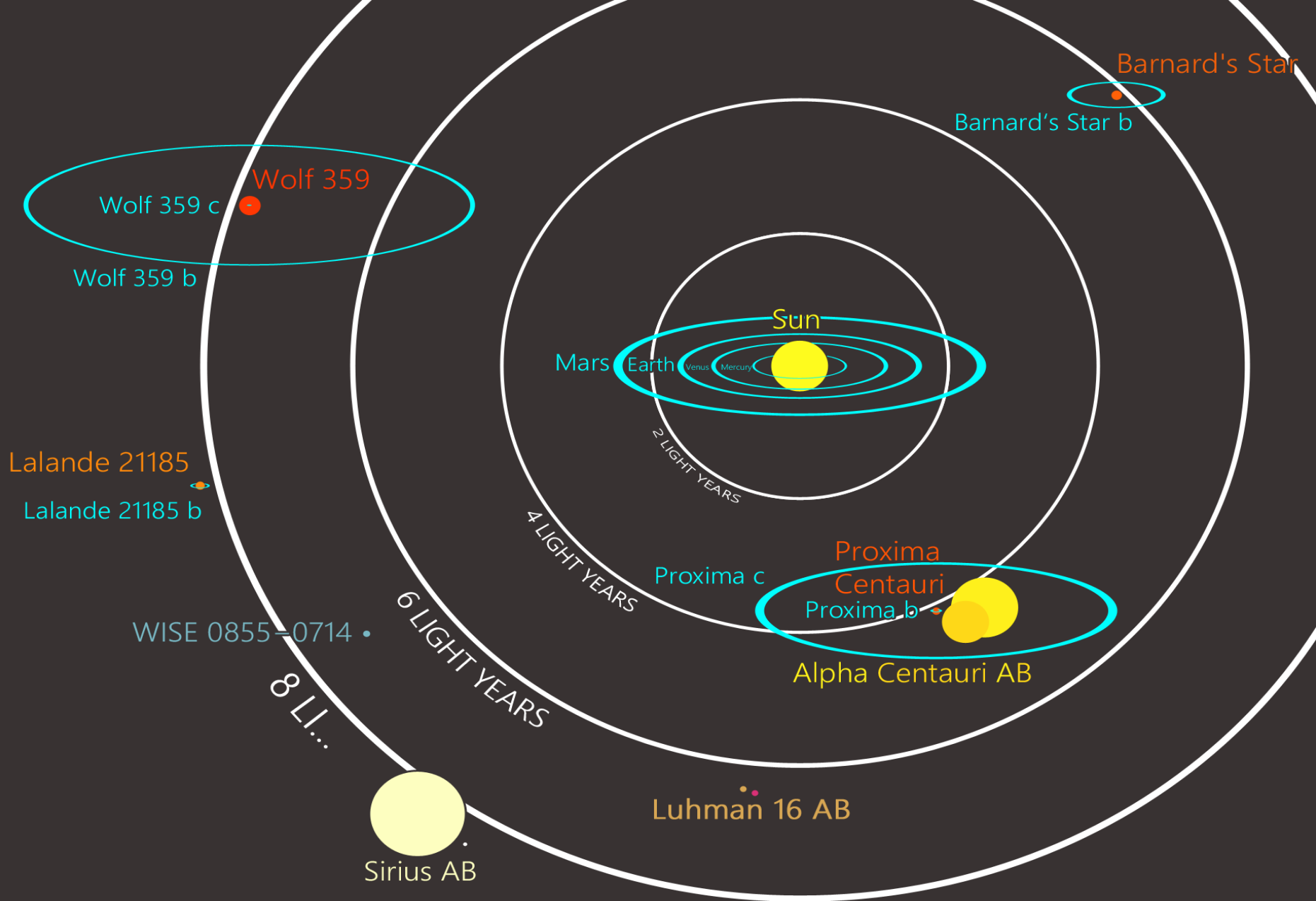
Taille réelle	Ramenée à la Géode
Rayon du soleil : 700 000 km	Rayon de la géode : 18m
Rayon de la terre : 6400 km	Un casque de pompier : 16 cm
Rayon de la lune : 1700 km	Une orange : 4,5 cm
Distance terre soleil : 150×10^6 km	Géode > Centre Pompidou: 3,9 km
Distance terre lune : 380 000 km	Moins qu'un bus RATP : 10 m Vs 12 m
Distance neptune soleil : $4,5 \times 10^9$ km	Distance Paris Amiens : 115 km
Rayon de neptune : 24 000 km	Une table ronde : 60 cm
Distance Proxima Centauri : 40×10^{12} km	2,7 distance terre lune : 1 003 000 km



Agrandissement progressif de l'échelle

- Les confins du système solaire : le nuage d'Oort à 100.000 UA

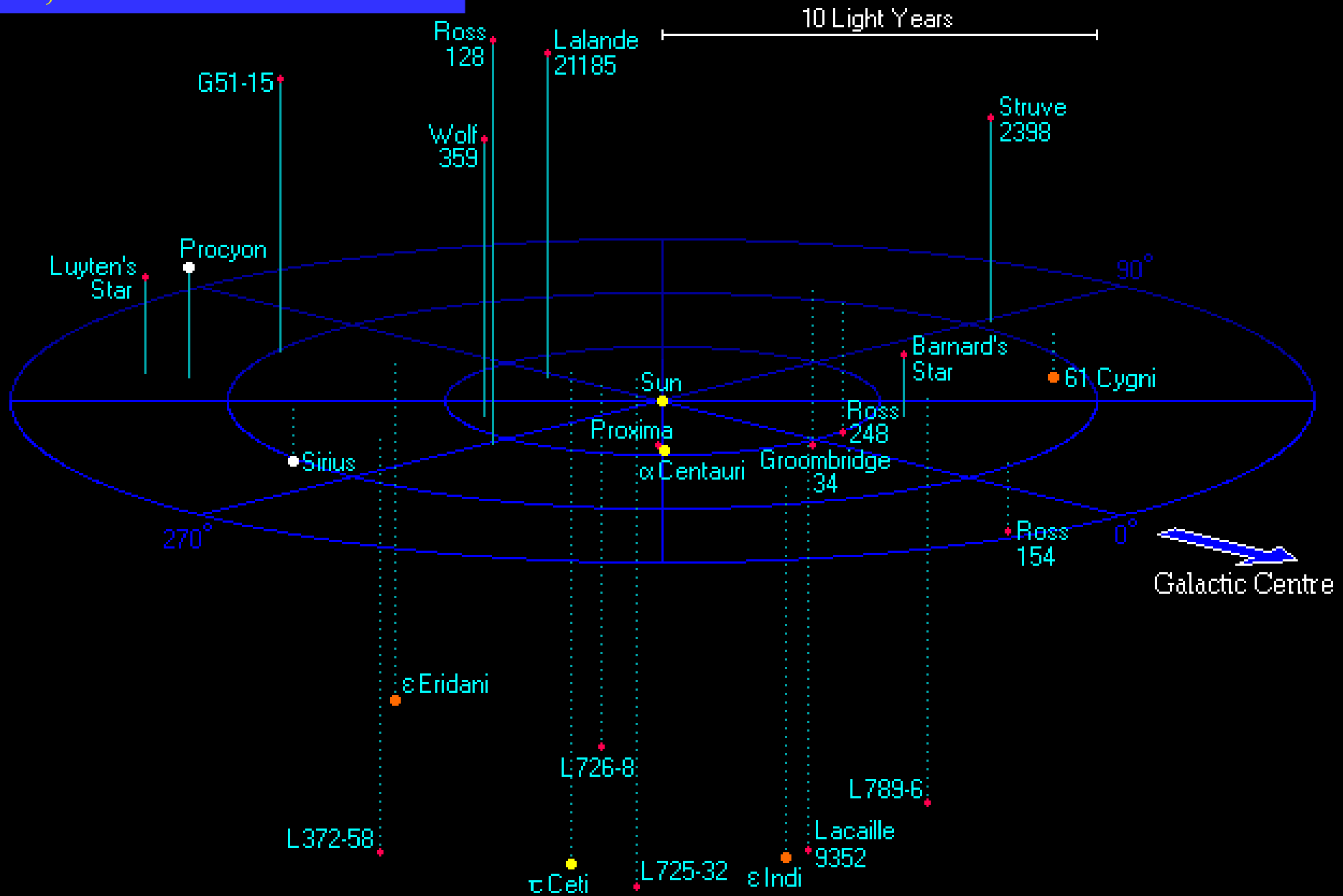




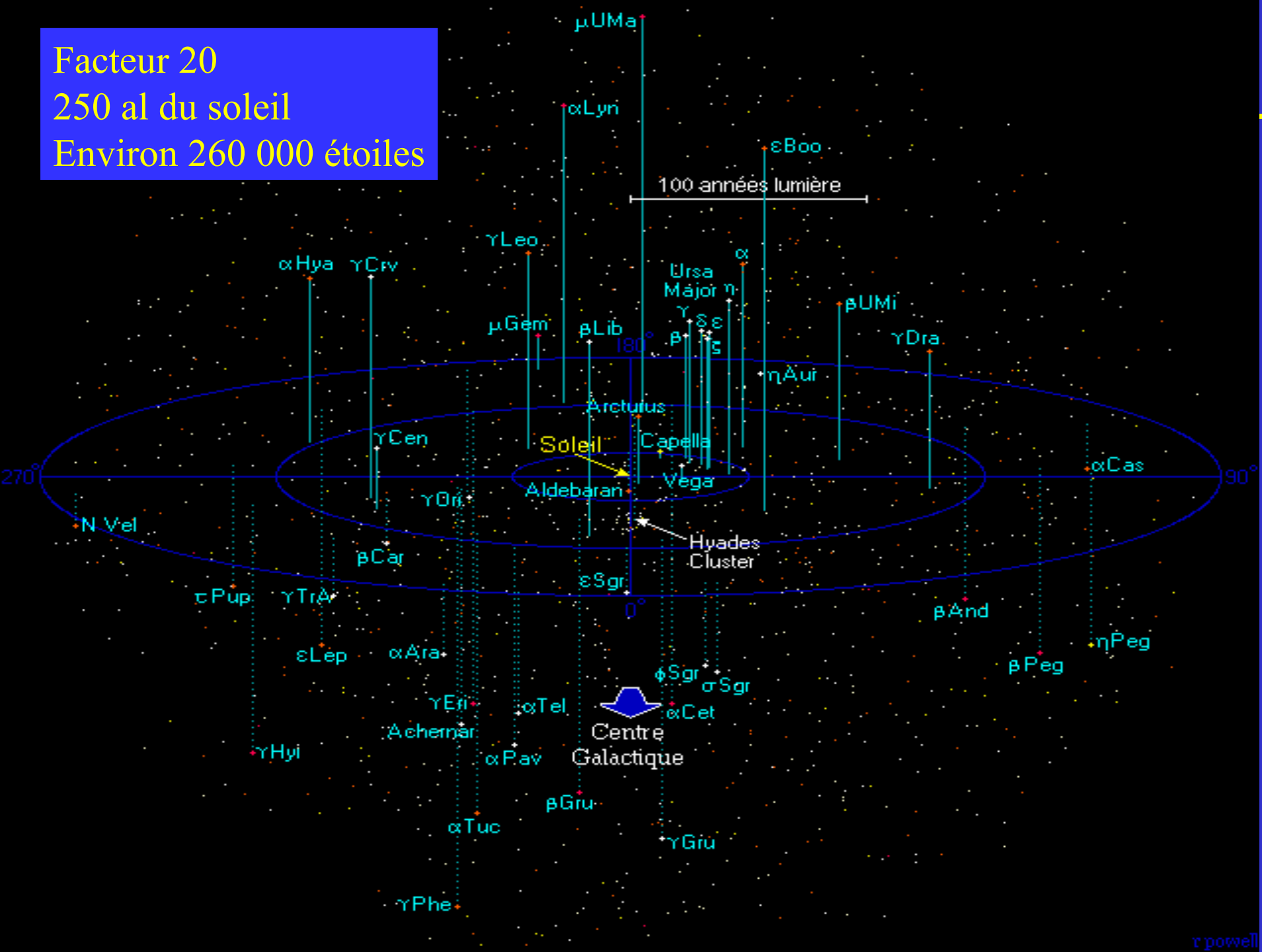
Voisinage du soleil entre 2 et 8 années-lumière. Aussi des exoplanètes.

Voisinage du soleil

12,5 al : environ 30 étoiles



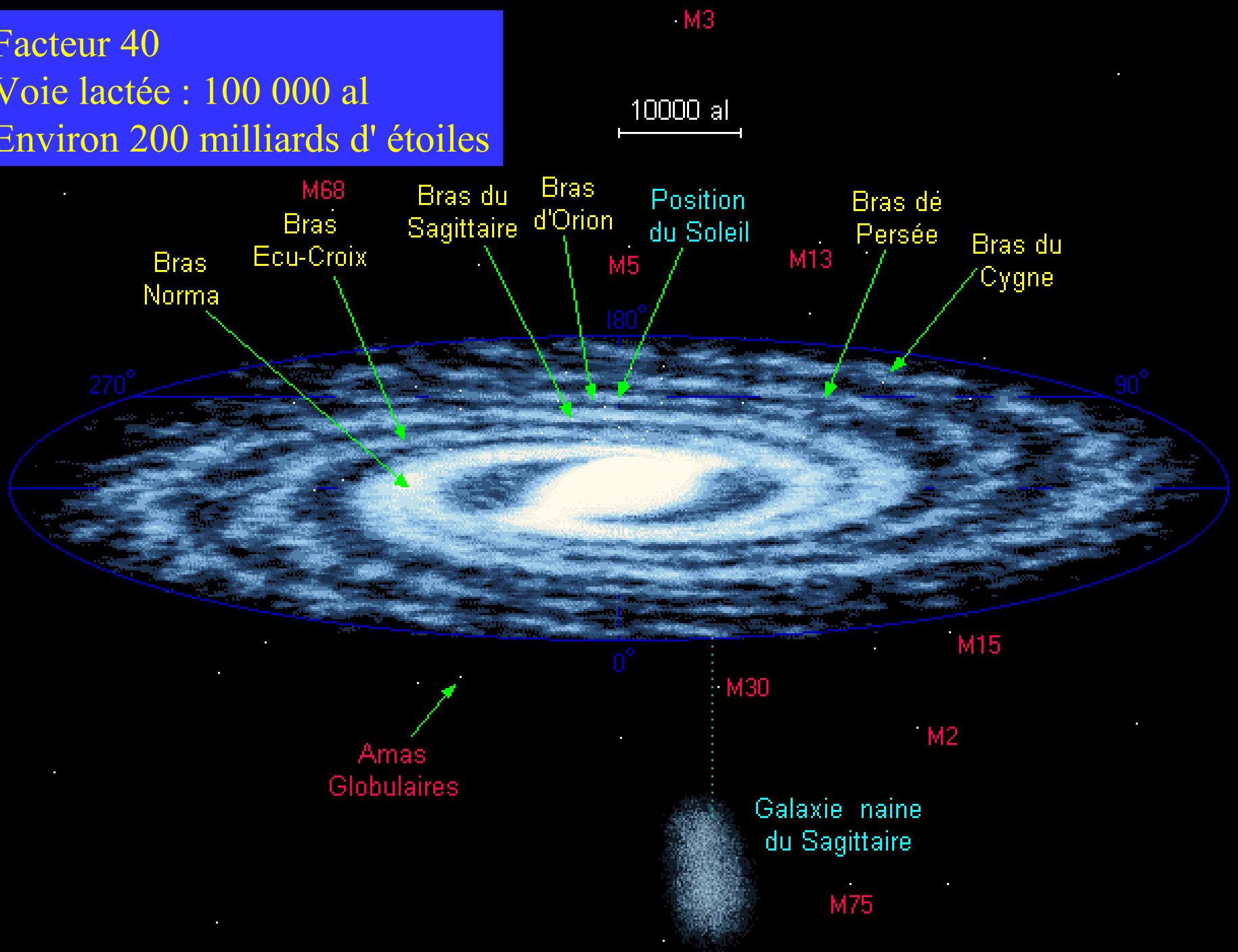
Environ 260 000 étoiles



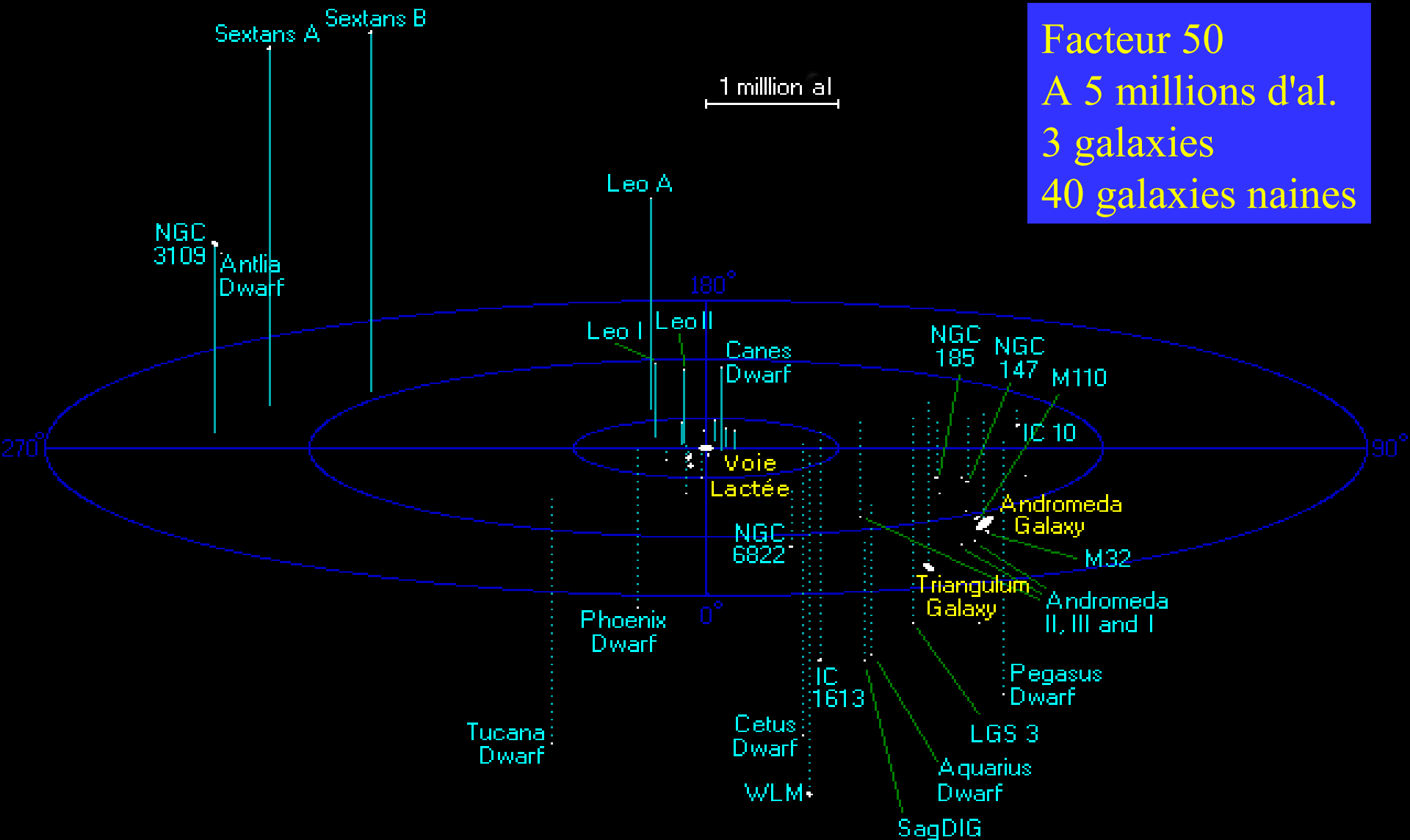
Facteur 40

Voie lactée : 100 000 al

Environ 200 milliards d' étoiles



Le groupe local des galaxies



Facteur 50

A 5 millions d'al.

3 galaxies

40 galaxies naines

Echelles galactiques relativement à....



Taille réelle

A l'échelle

Distance neptune soleil : $4,5 \cdot 10^9$ km

Taille d'une noix : Rayon 1 cm.

Distance proxima centauri : $4 \cdot 10^{13}$ km

< tour de contrôle CDG : 90m

Epaisseur bras spirale d'Orion : 1000 al

Distance Paris Versailles : 21 km

Rayon Voie lactée : 80 000 al

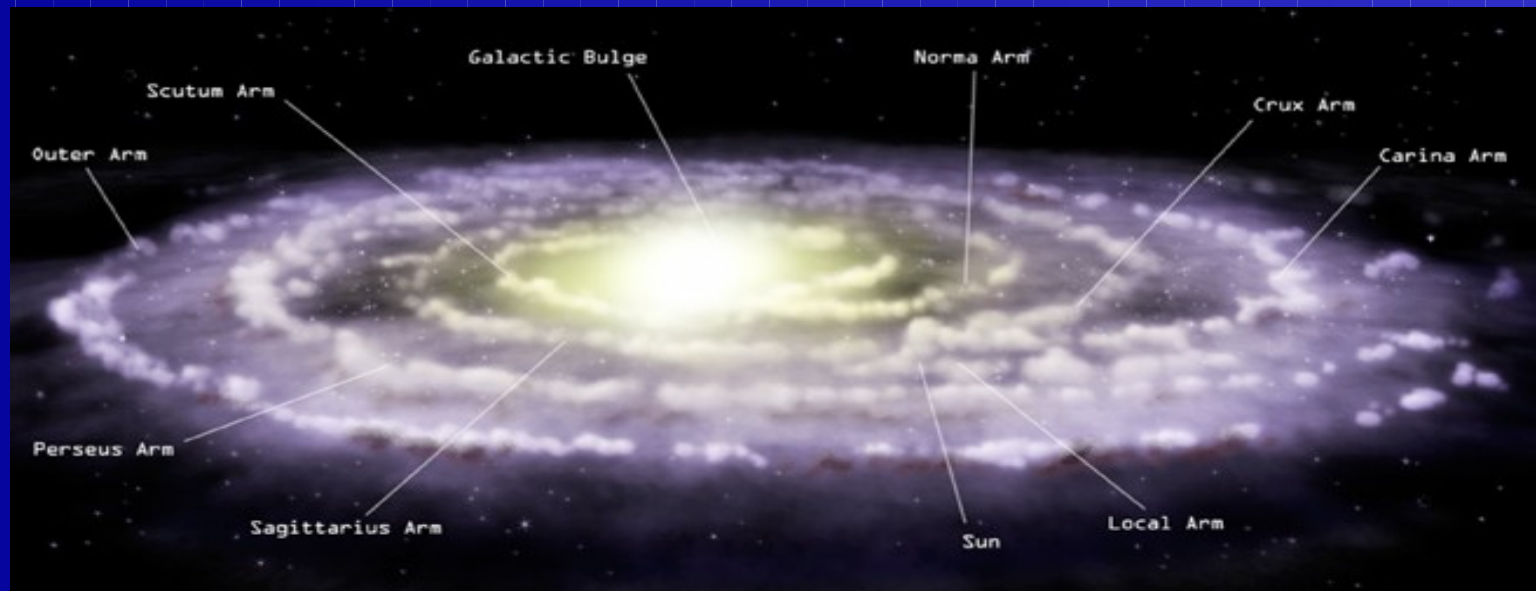
Distance Paris Stockholm : 1680 km

Epaisseur Voie lactée : 3000 al

Distance Paris Fontainebleau : 63 km

Galaxie d'Andromède : $2,4 \cdot 10^6$ al

1/7 distance Terre Lune : 50 000 km

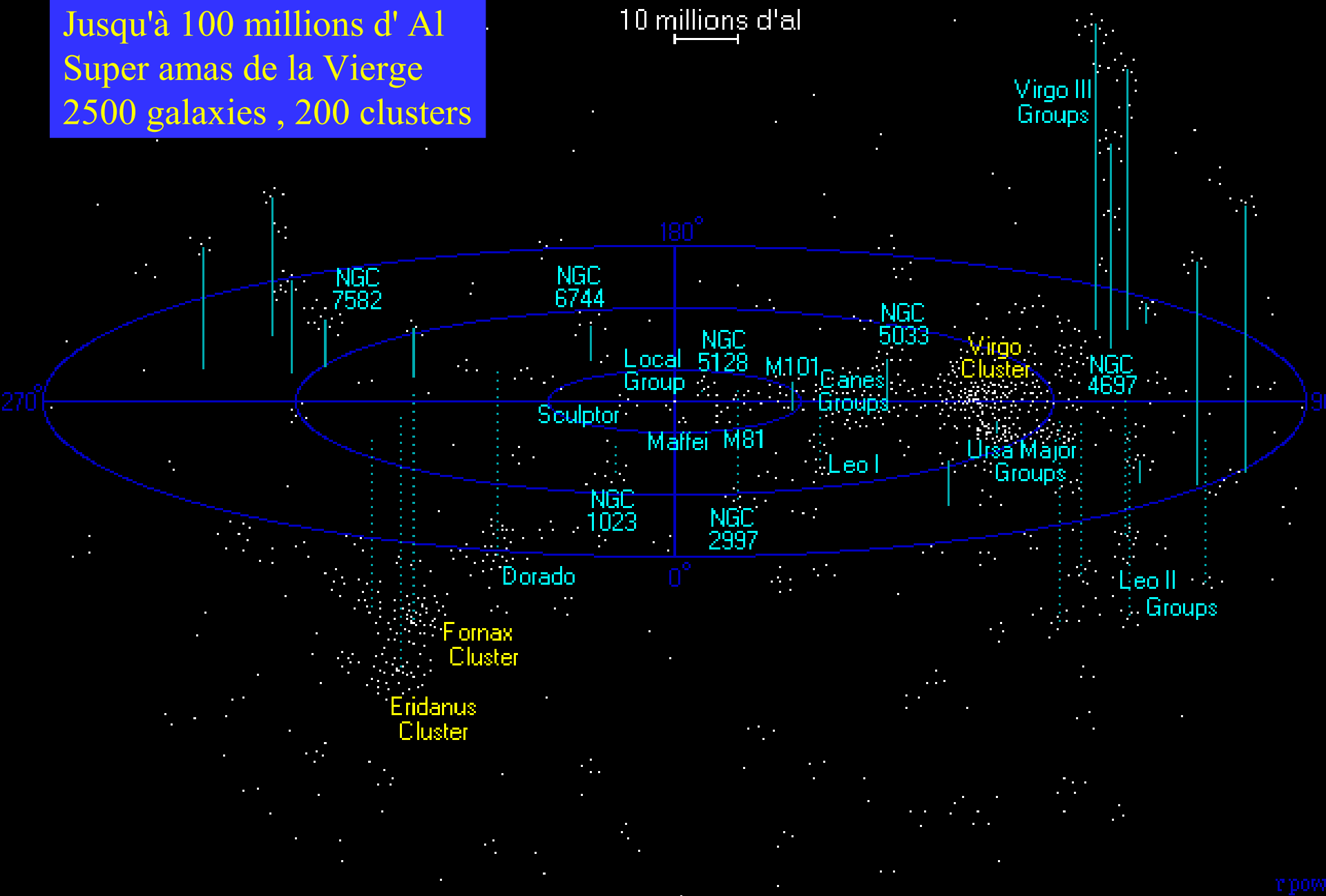


Facteur 20

Jusqu'à 100 millions d'Al

Super amas de la Vierge

2500 galaxies , 200 clusters

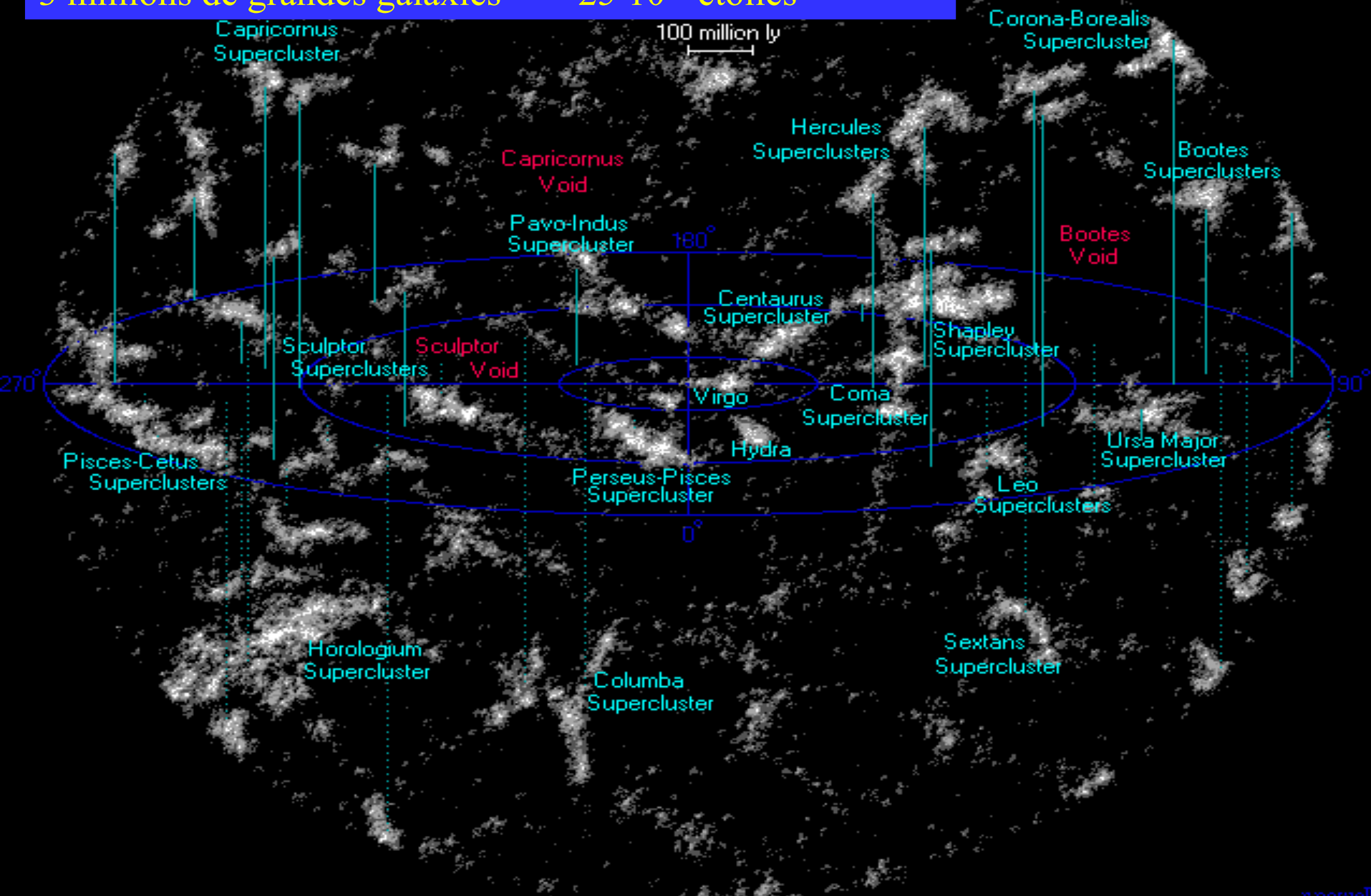


Facteur 10

Jusqu'à 1 milliard d'al : 100 super-amas

3 millions de grandes galaxies

25 10^{22} étoiles

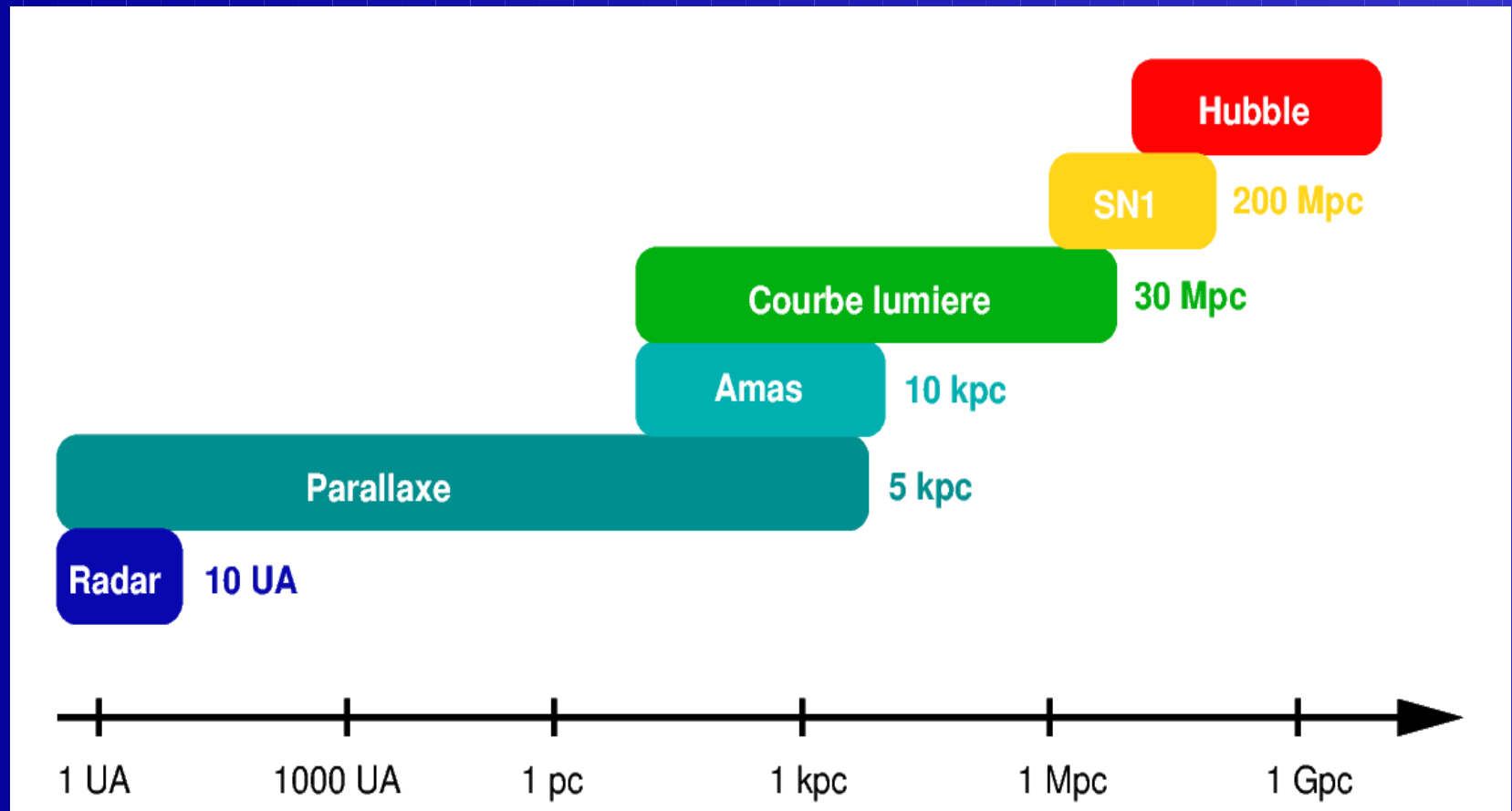


Comment mesurer les distances
-dans le système solaire
-et bien plus loin.....

Quelques éléments de réponse

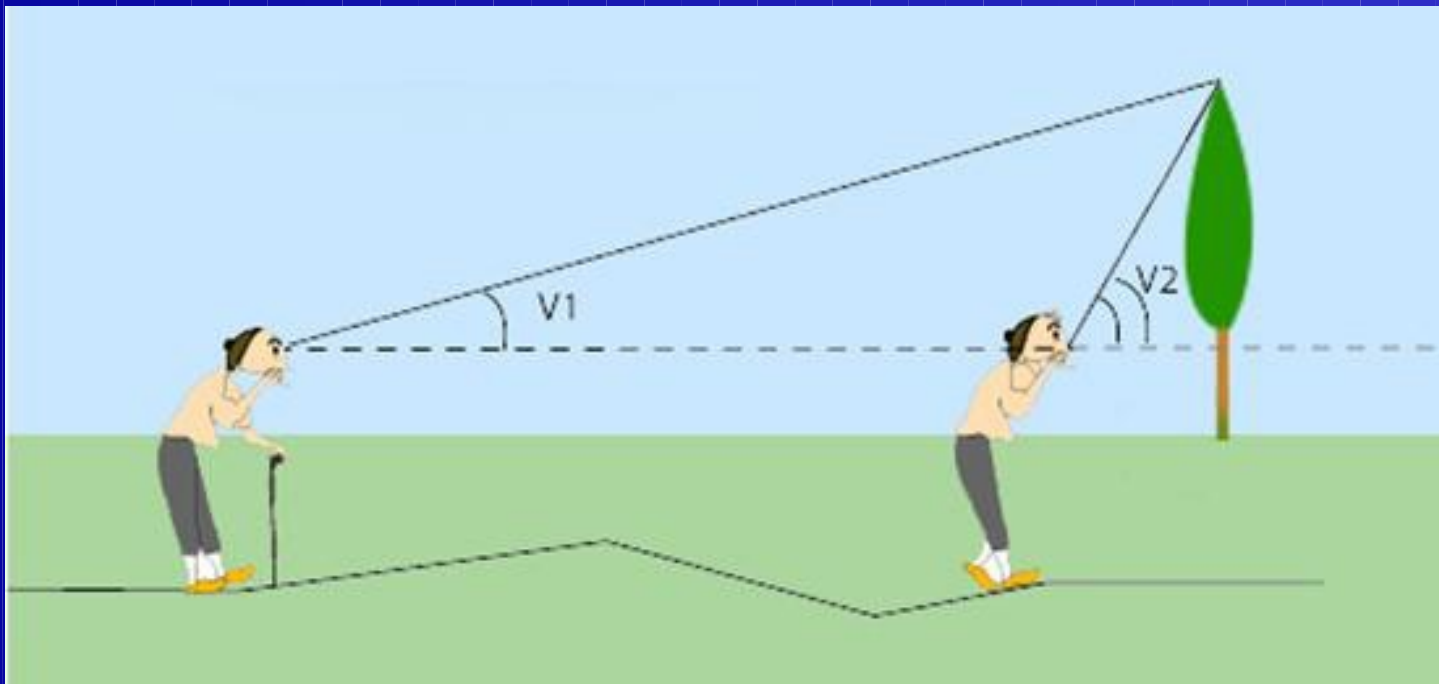
Il faut s'adapter aux distances des objets

Portée des différentes méthodes de mesure des distances



La mesure par parallaxe sur terre

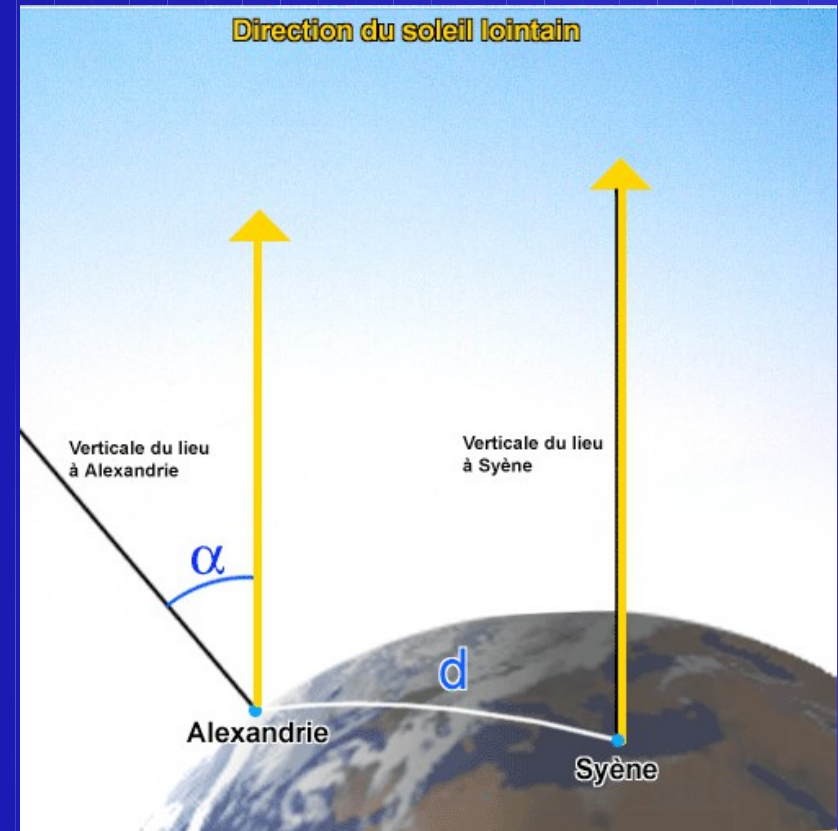
- Distance D entre les 2 points d'observation connue
- Angles $V1$ et $V2$ mesurés
- C'est la triangulation du géomètre
- Très bien sur terre et pas trop loin



Exemple célèbre : circonférence de la terre

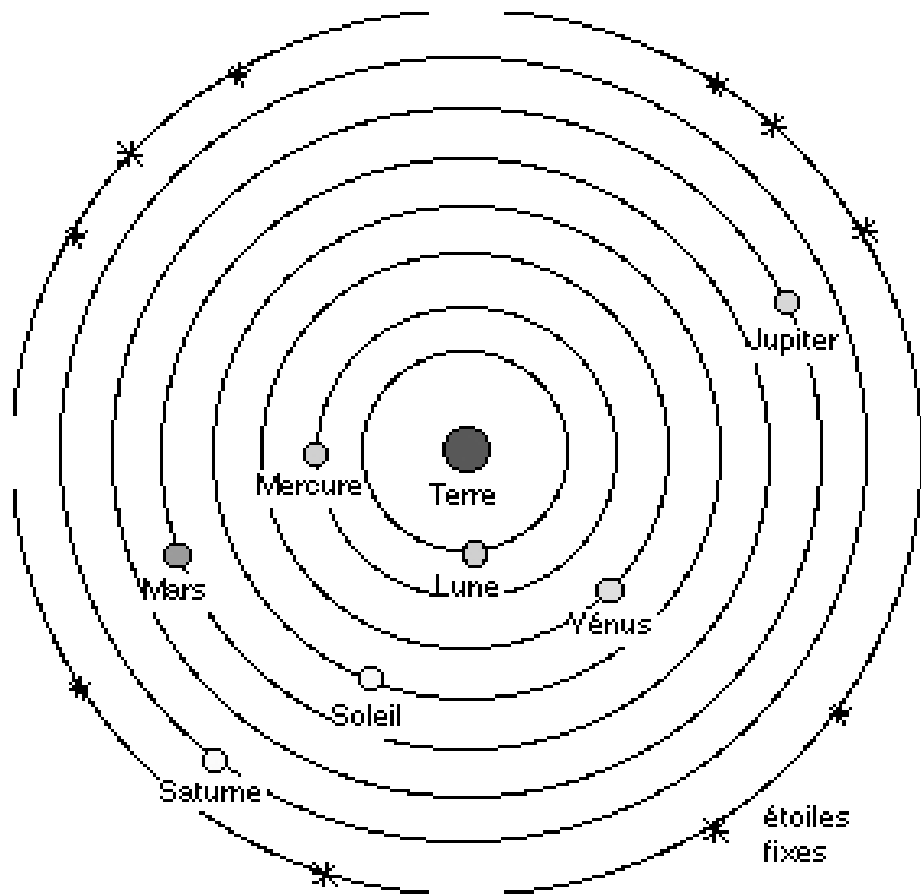
Calculée par Eratosthène

- La terre est ronde (voiles des bateaux à l'horizon).
- Environ 200 av JC, calcul du rayon terrestre presque exact.
- Mesure entre Alexandrie (obélisque) et Syène/Assouan (puits)



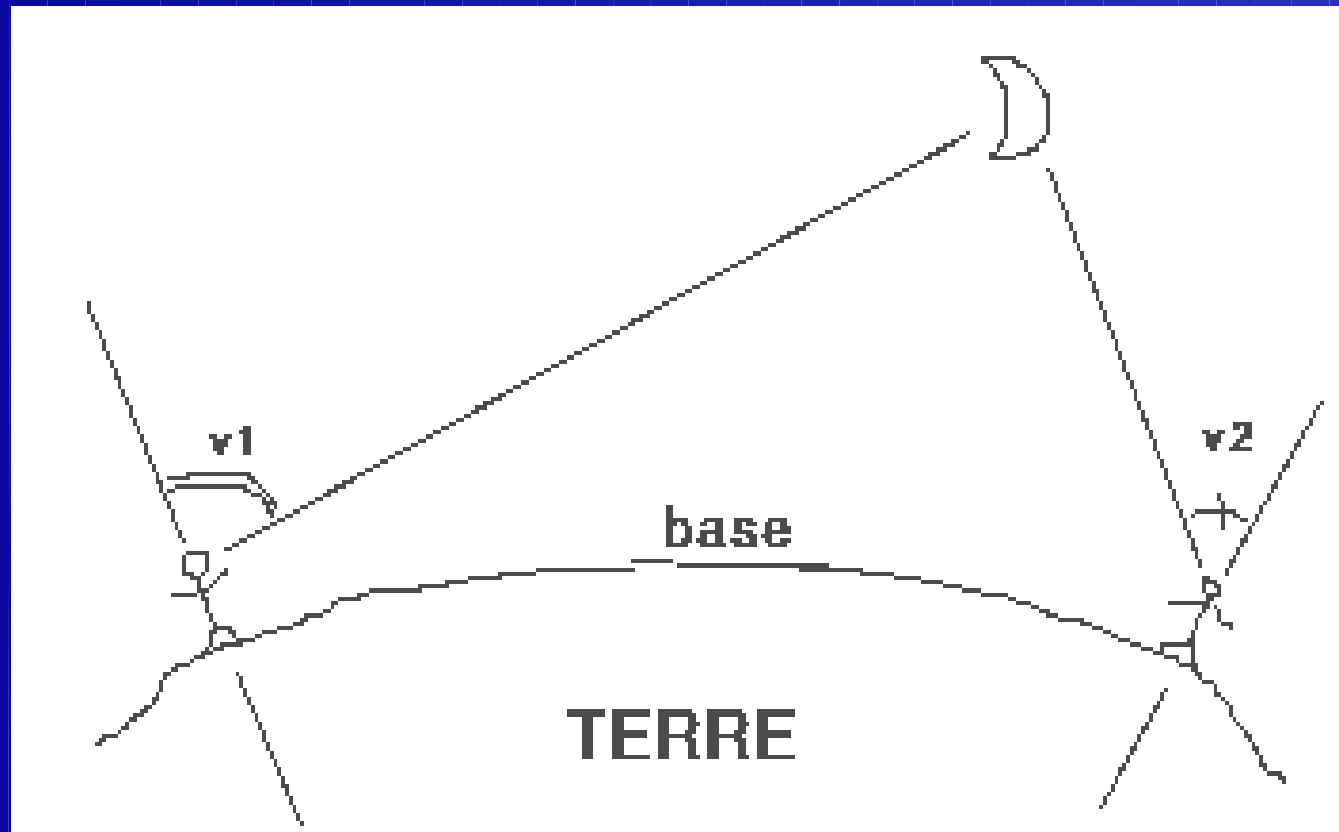
Nécessité d'un modèle : Le modèle d'univers d'Aristote

- La terre au centre de l'univers. Environ 350 av JC : un mauvais modèle qui a eu la vie dure

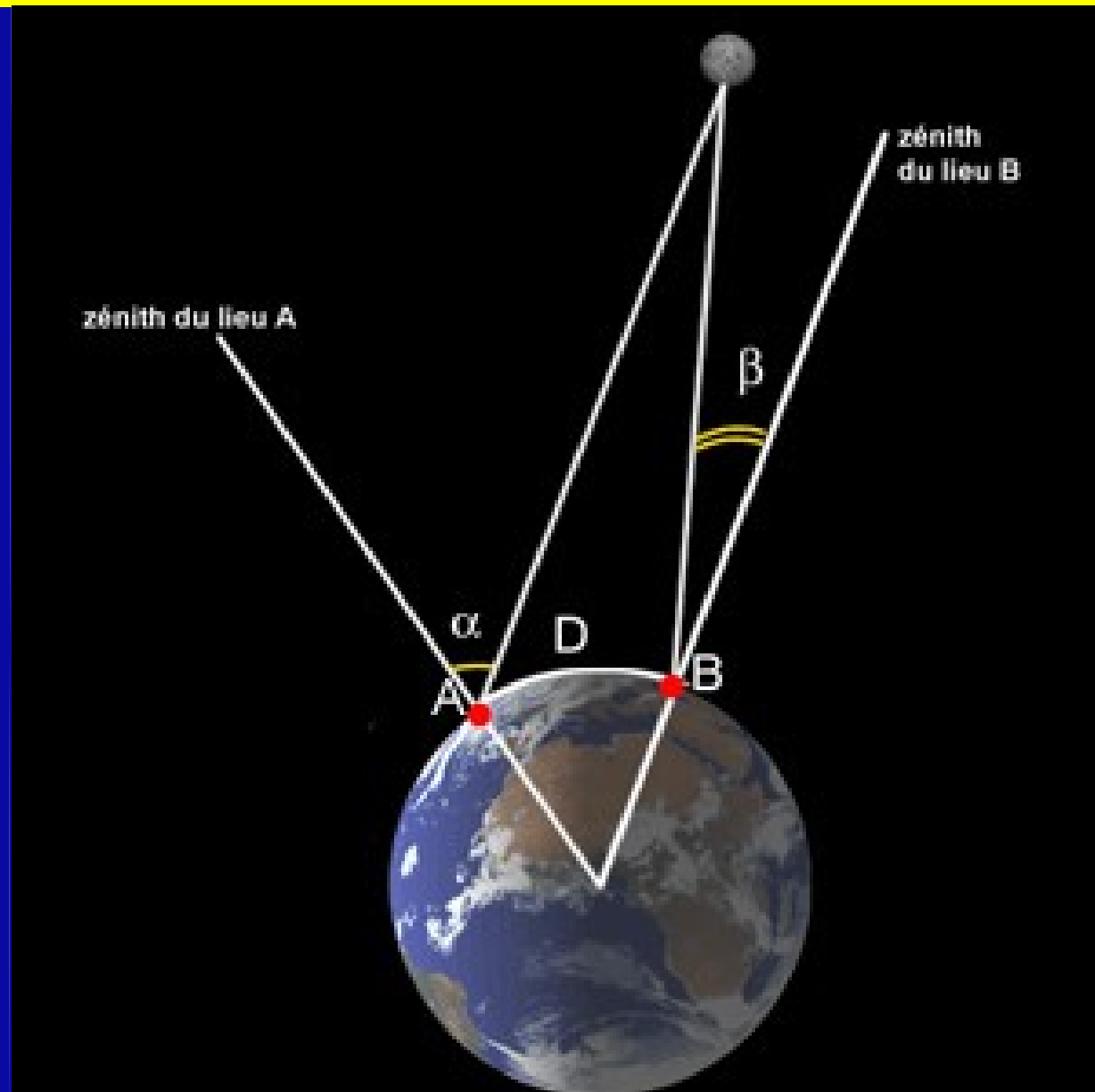


La mesure des distances grâce à la parallaxe

La terre est ronde et on connaît son rayon.
Parallaxe ou triangulation,
ou comment mesurer une distance à un lieu inaccessible...

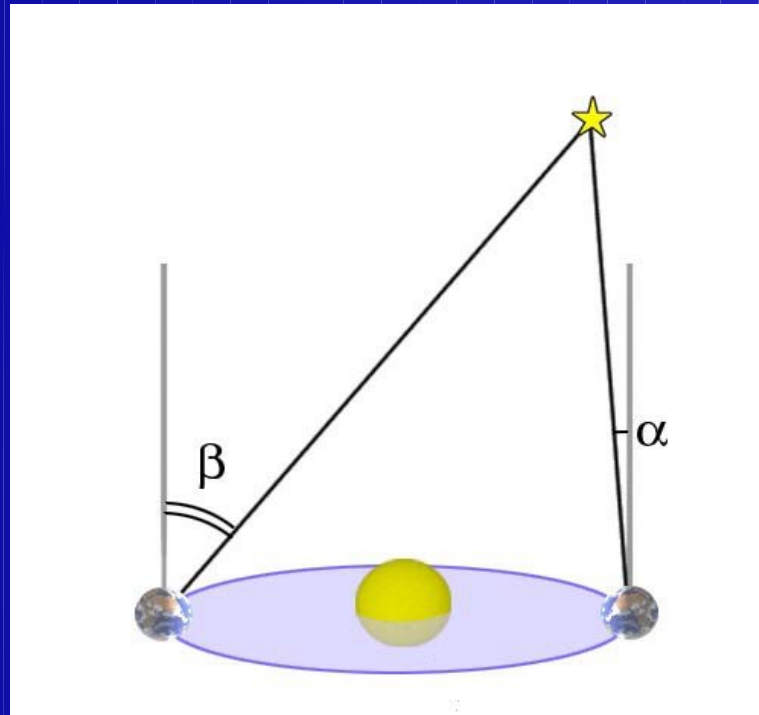


L'application aux corps célestes: la Lune



Limites de la méthode

- La longueur de la base de la mesure.
- Base max=parallaxe annuelle. Suppose détermination précise de l'UA.
- La précision de la mesure des angles

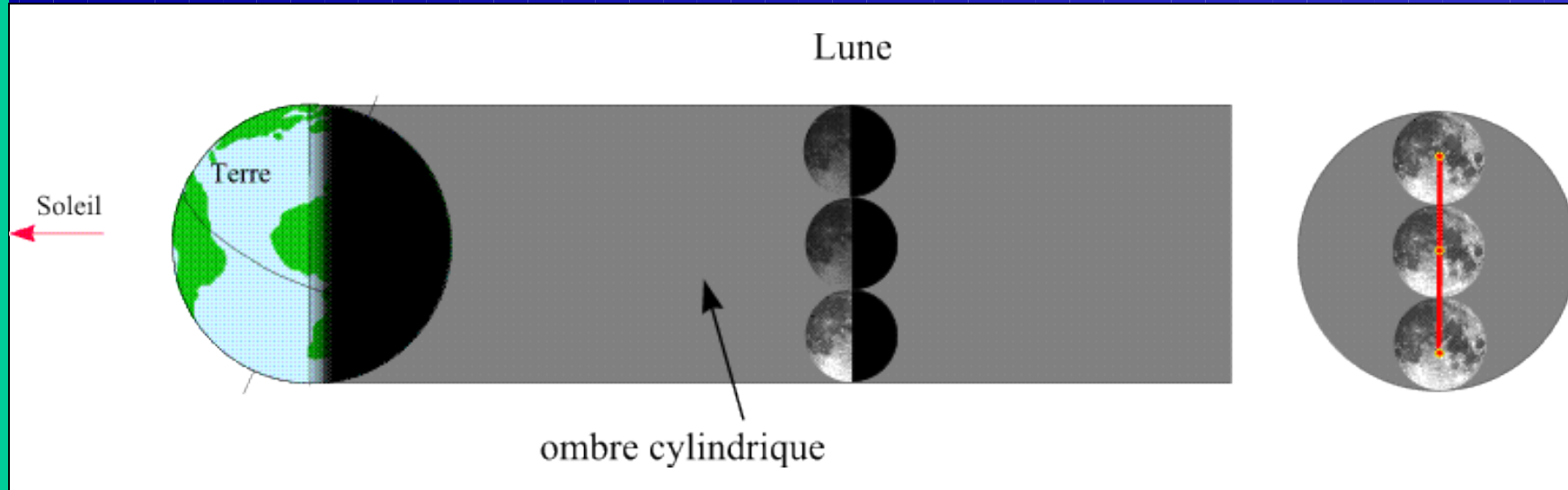


Les éclipses de lune pour mesurer sa taille et sa distance



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.

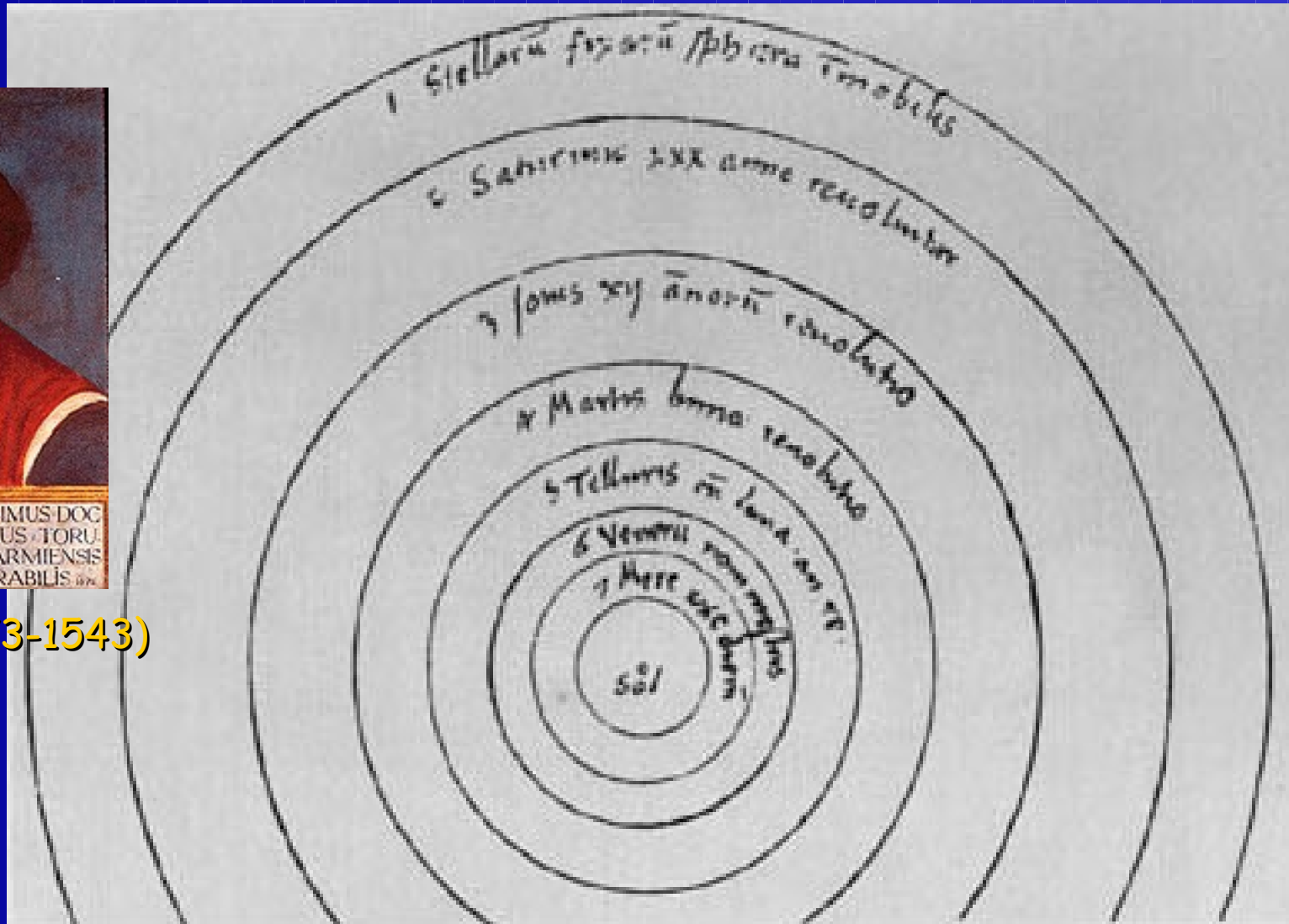
Donc le diamètre de la Lune est environ le tiers du diamètre terrestre $L = 0,3 T$.
Comme la Lune est vue sous un diamètre d'environ $32'$, sa distance est 107 fois son diamètre. $d = 0,3 T \times 107 = 32,1 T = 64,2$ rayons terrestres.

Le modèle de Copernic

- Le modèle Héliocentrique



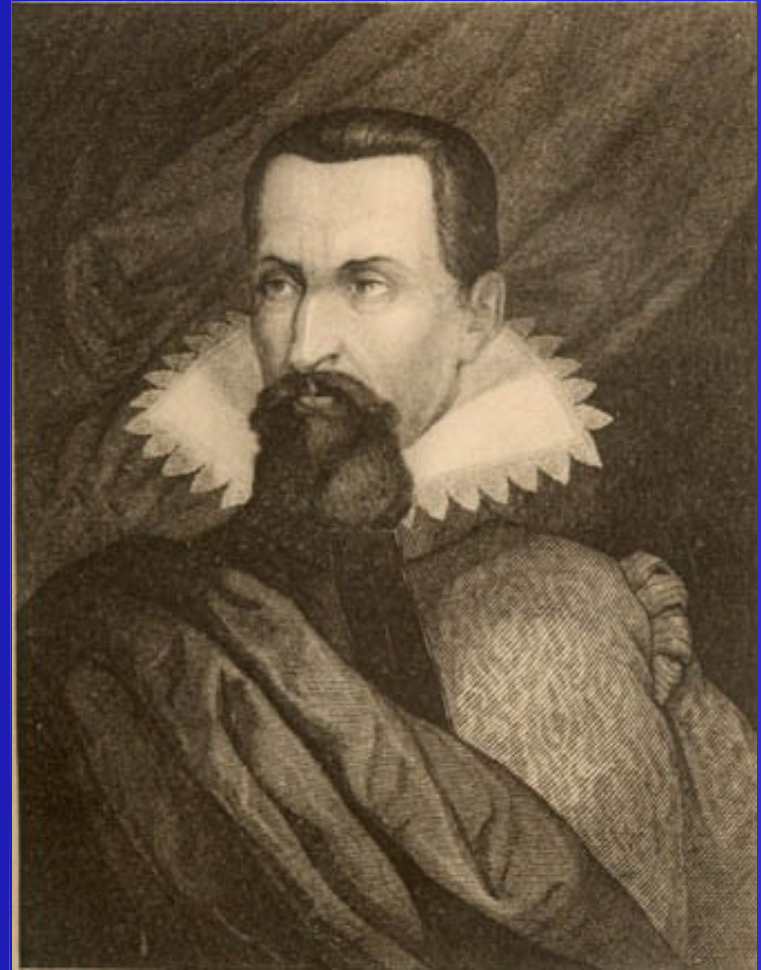
Copernic (1473-1543)



Galilée et Képler



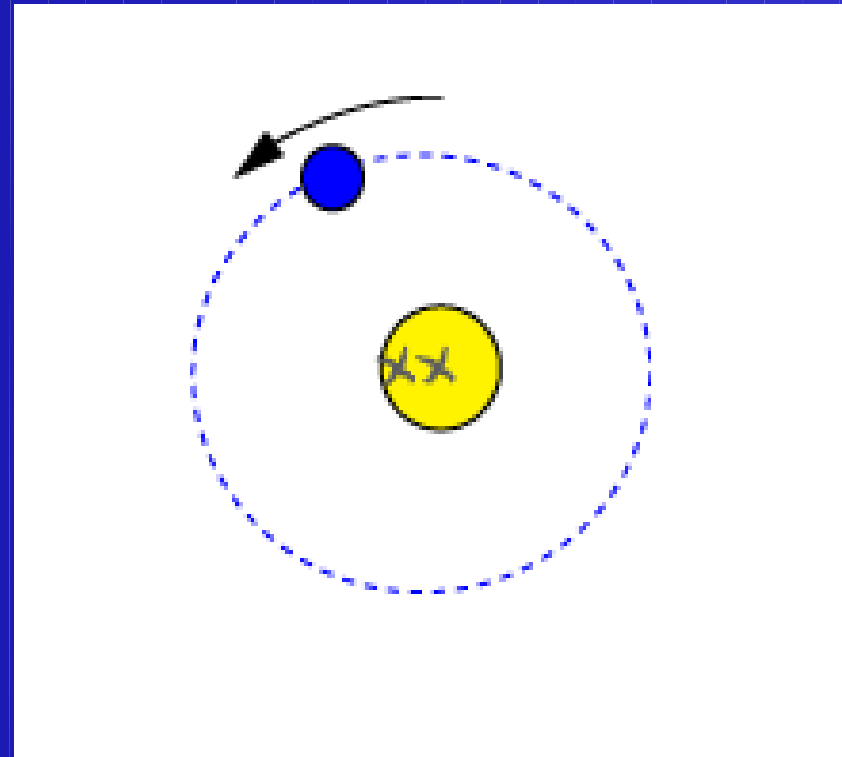
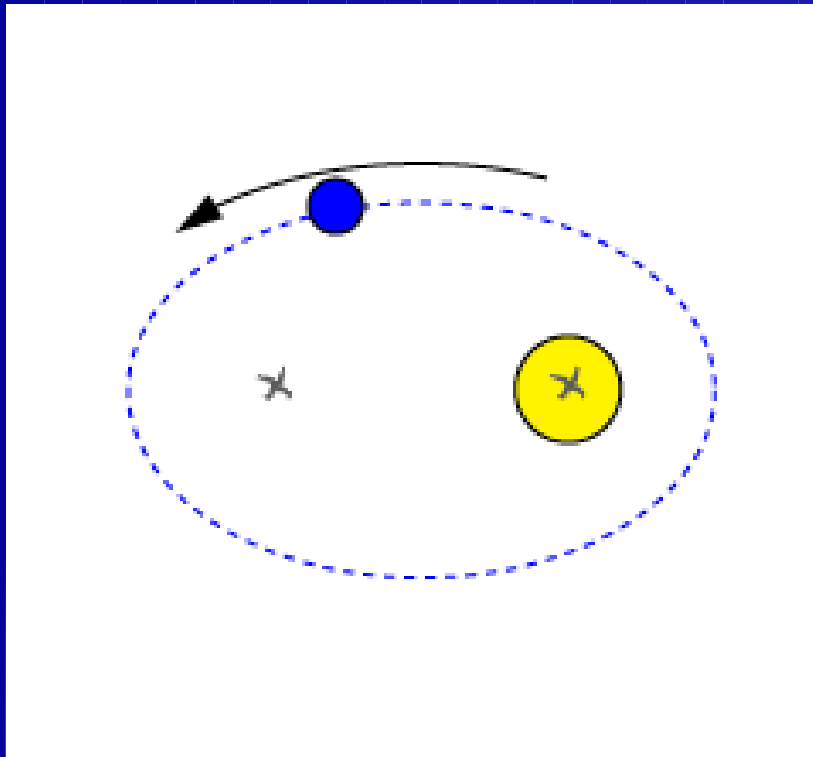
Galilée (1564-1642) : la terre
tourne autour du soleil



Kepler (1571-1630) : Lois de
la mécanique céleste

La première loi de Kepler sur les planètes

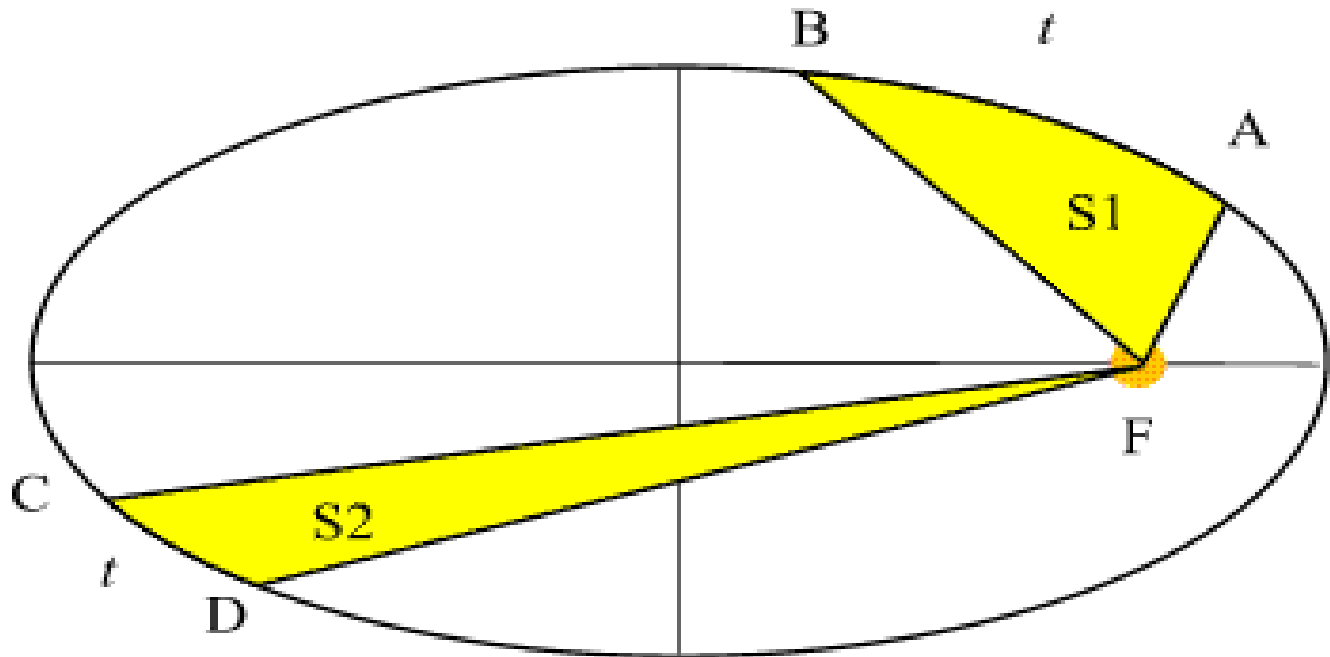
- Trajectoire elliptique
- Le soleil est un des foyers



2ième loi de Kepler : Loi des aires

Les aires décrites par le rayon vecteur planète-Soleil sont proportionnelles aux temps mis pour les décrire.

Deuxième loi de Kepler $S1 = S2$



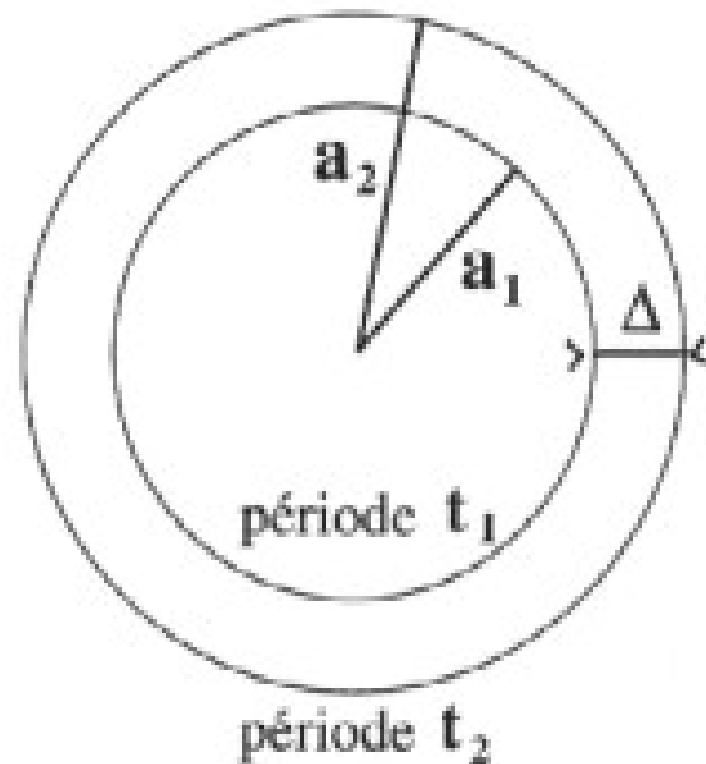
$$r^2 \frac{d\theta}{dt} = C = n a b = \frac{2\pi a b}{T}$$

Troisième loi de Képler

- Le cube du $\frac{1}{2}$ grand axe a divisé par le carré de la période de révolution est constant.

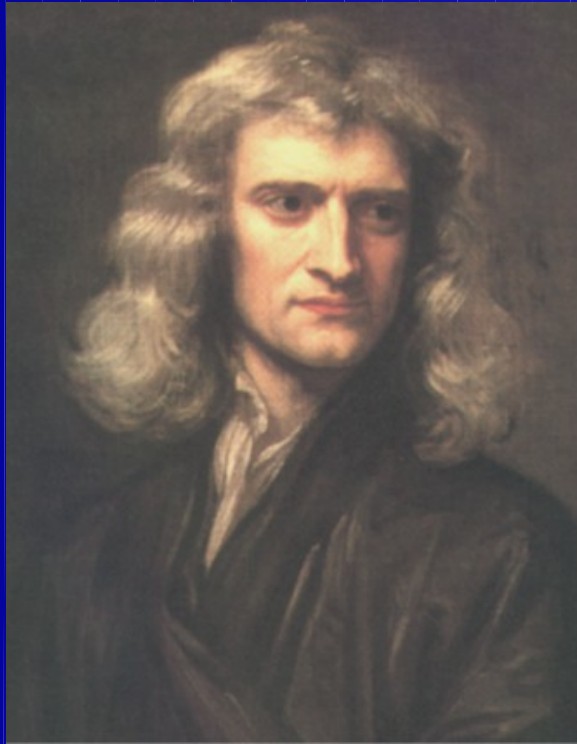
$$\frac{a_1^3}{t_1^2} = \frac{a_2^3}{t_2^2}$$
$$a_1 = a_2 - \Delta$$

→ a_1 et a_2

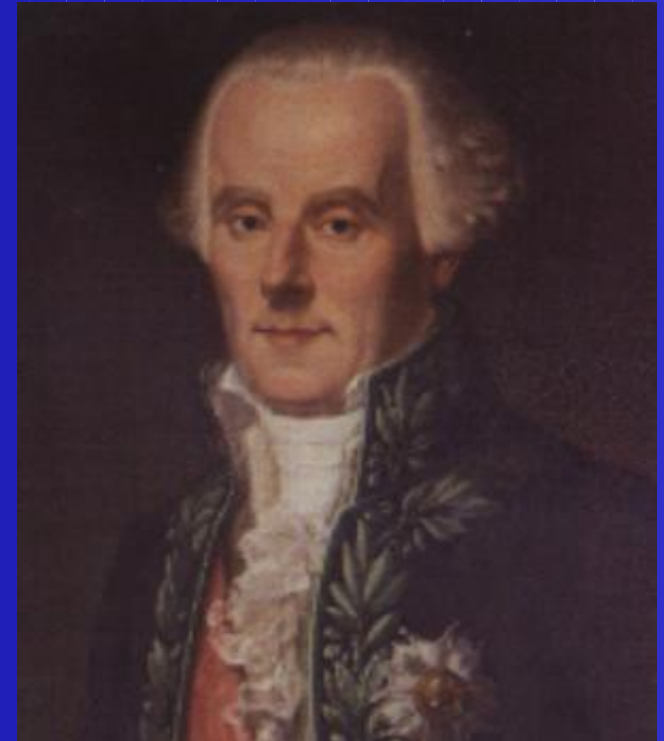


Newton et Laplace

- 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, ...



Newton (1642-1727)



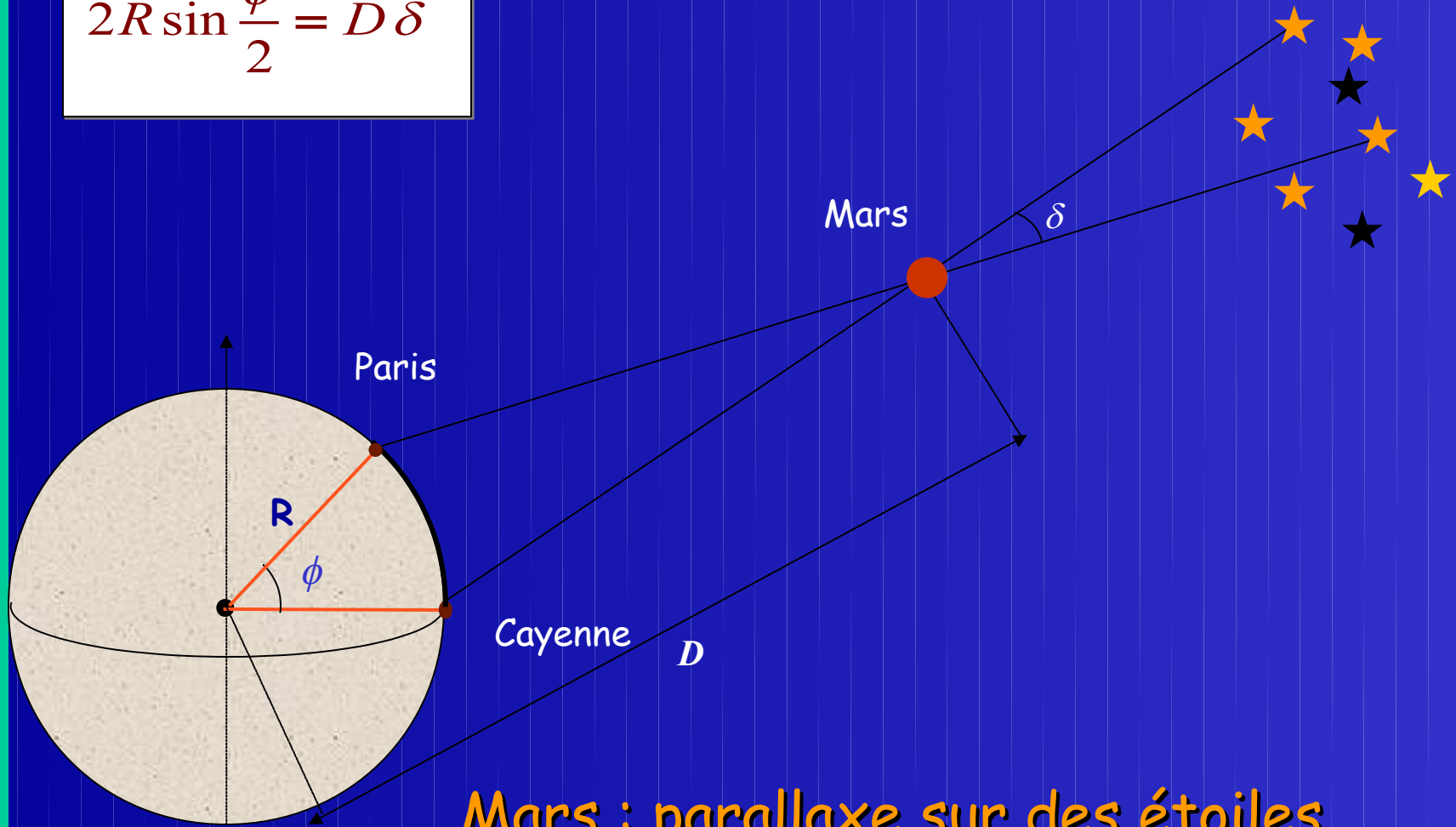
Laplace (1749-1827)

Mesure de la distance des planètes au soleil

- Les lois de Kepler donnent les rapports des distances des planètes au Soleil, donc des planètes entre elles.
- Il suffit donc de connaître une seule distance pour les calculer toutes.
- Ex : distance Terre-Venus. La projection de son disque sombre sur le disque solaire lors d'un passage n'est pas la même pour deux observateurs terrestres

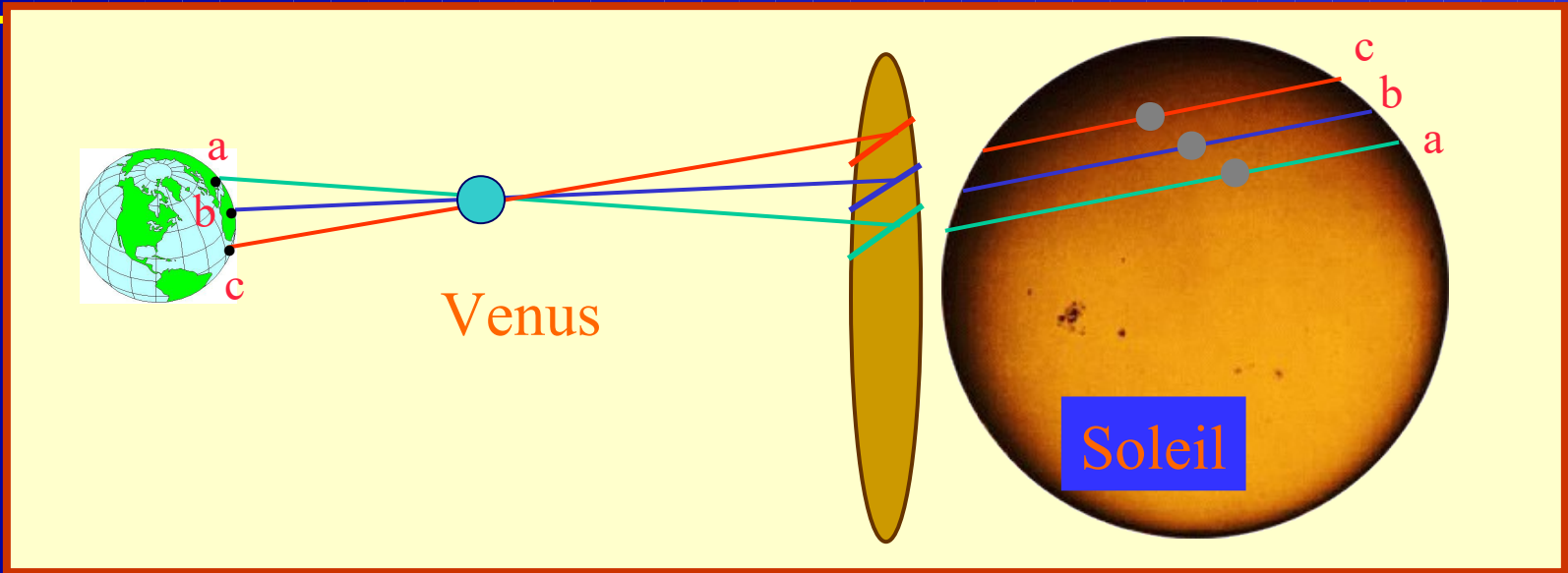
Conséquence : Il suffit de mesurer la distance d'une planète proche

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



Mars : parallaxe sur des étoiles
Cassini et Richer en 1672.

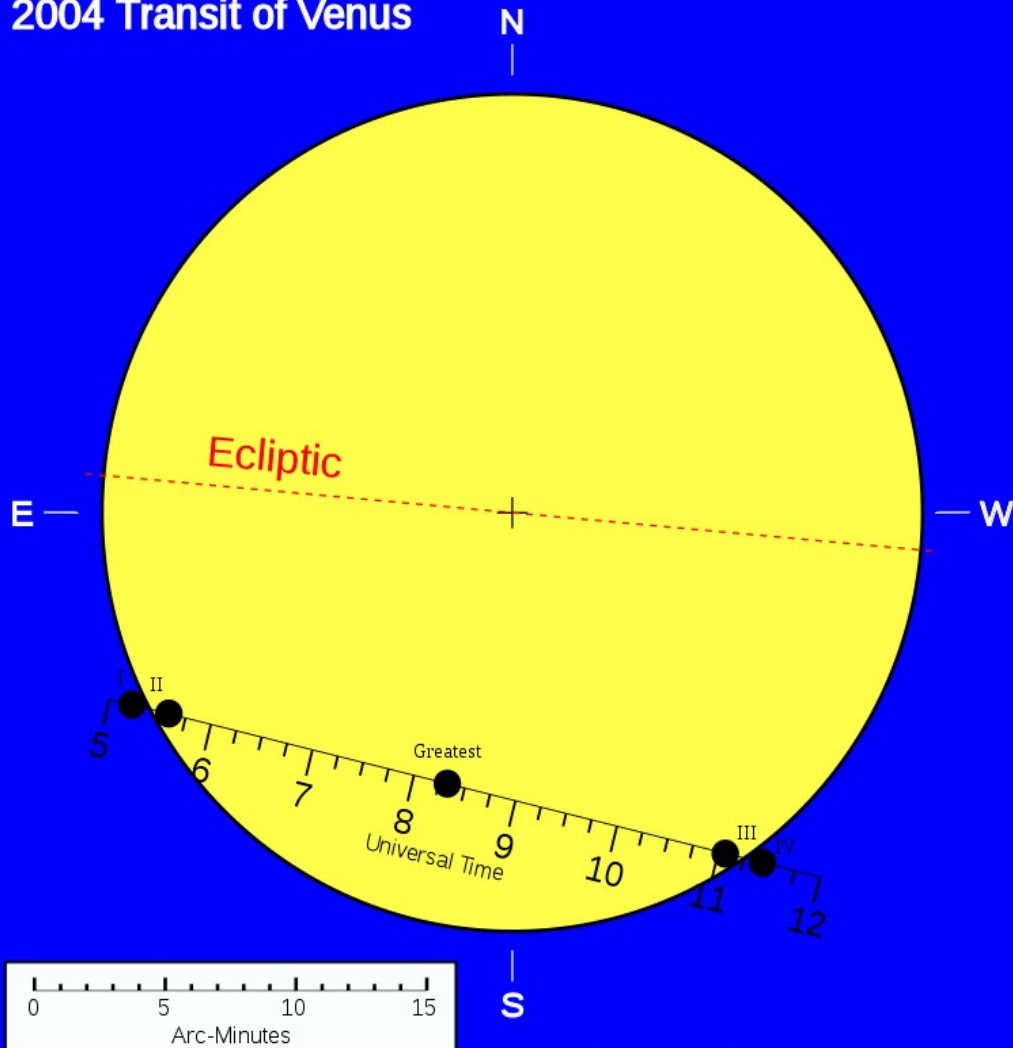
Exemple : Transit de Vénus



- 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

Le passage de Vénus devant le Soleil

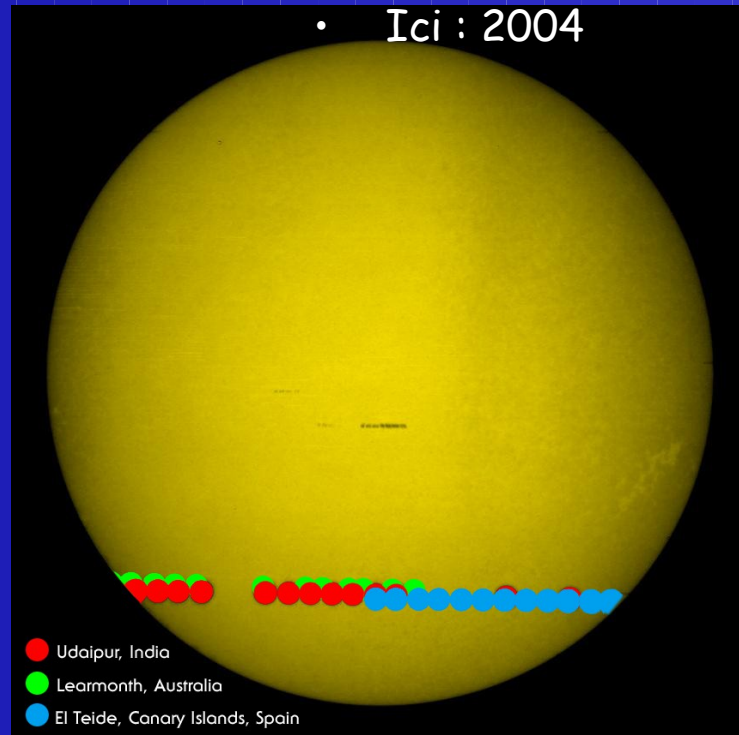
2004 Transit of Venus



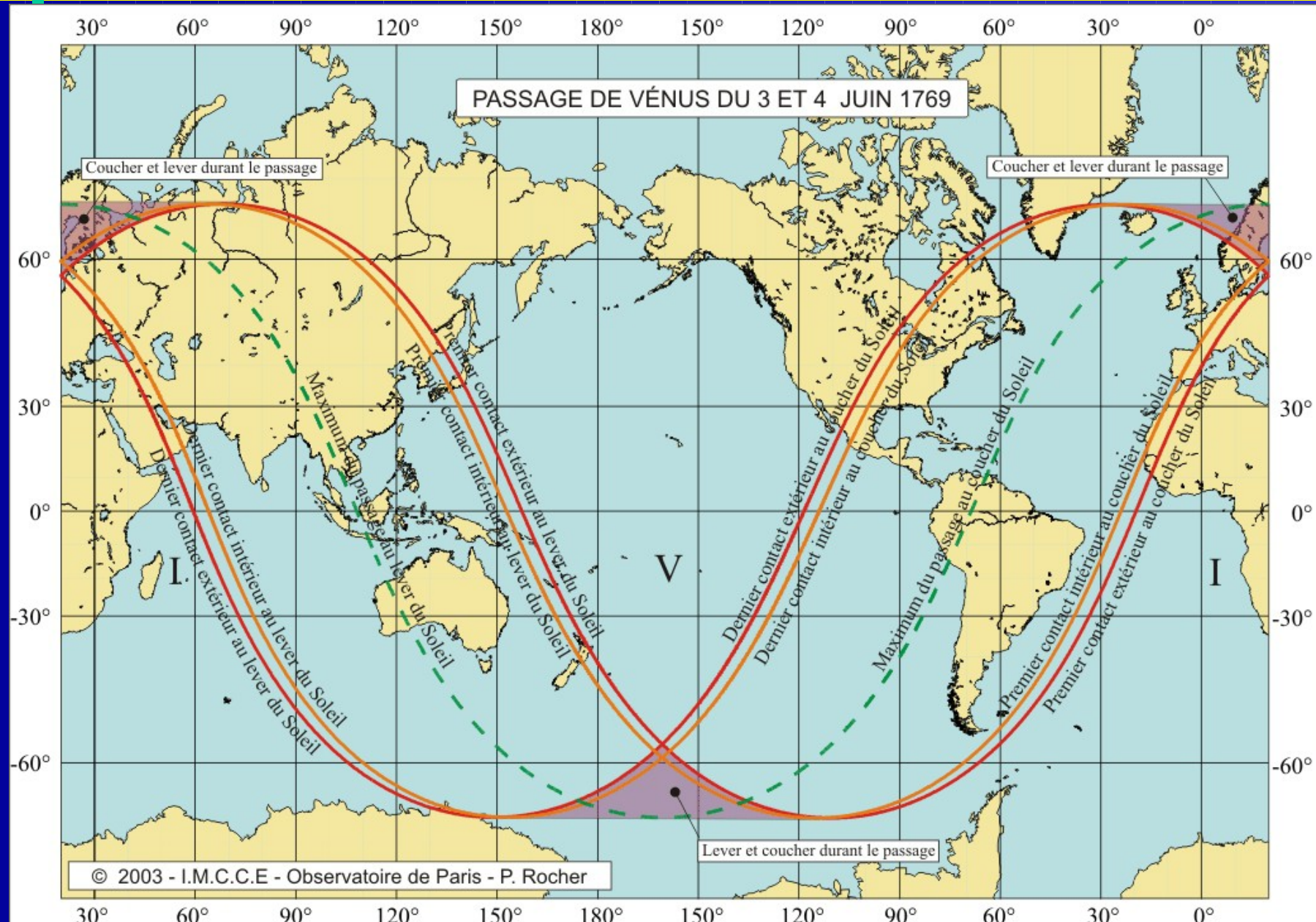
Courtesy of F.Espenak, NASA's GSFC

- Phénomène rare: 1639, 1761, 1769, 1874, 1882, 2004, 2012

- Ici : 2004



La nécessité de voyages lointains



Le passage de 1769 : une mesure très précise

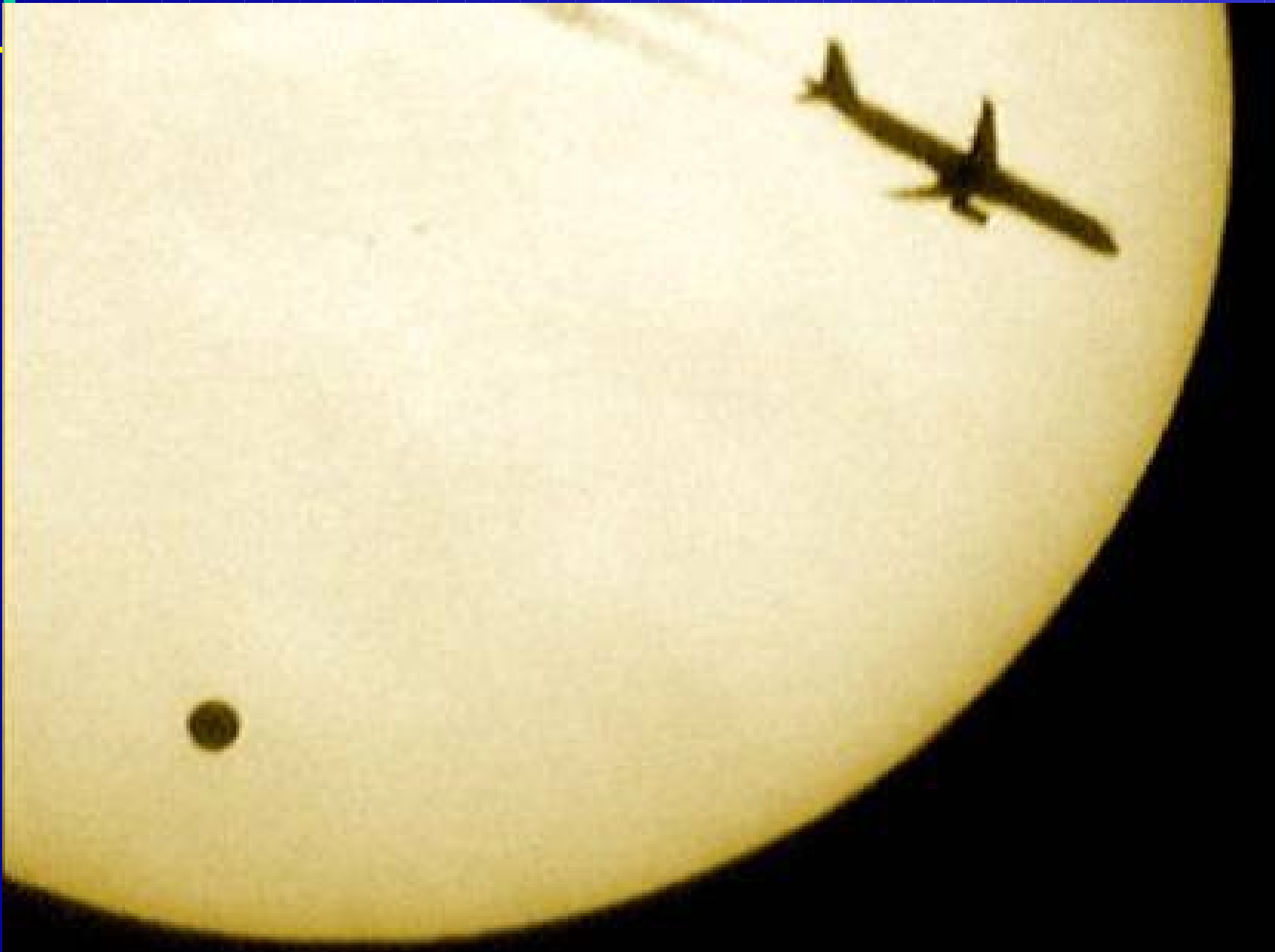


Le capitaine Cook à Tahiti à « Point Venus »
Il faut être au bon endroit au bon moment.

L'unité astronomique dans le temps

Epoque	ua en km	Ecart	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: Viking+radar
2004	149 608 708	10 838	Vénus: « VT-2004 »

Le passage de Vénus en 2004

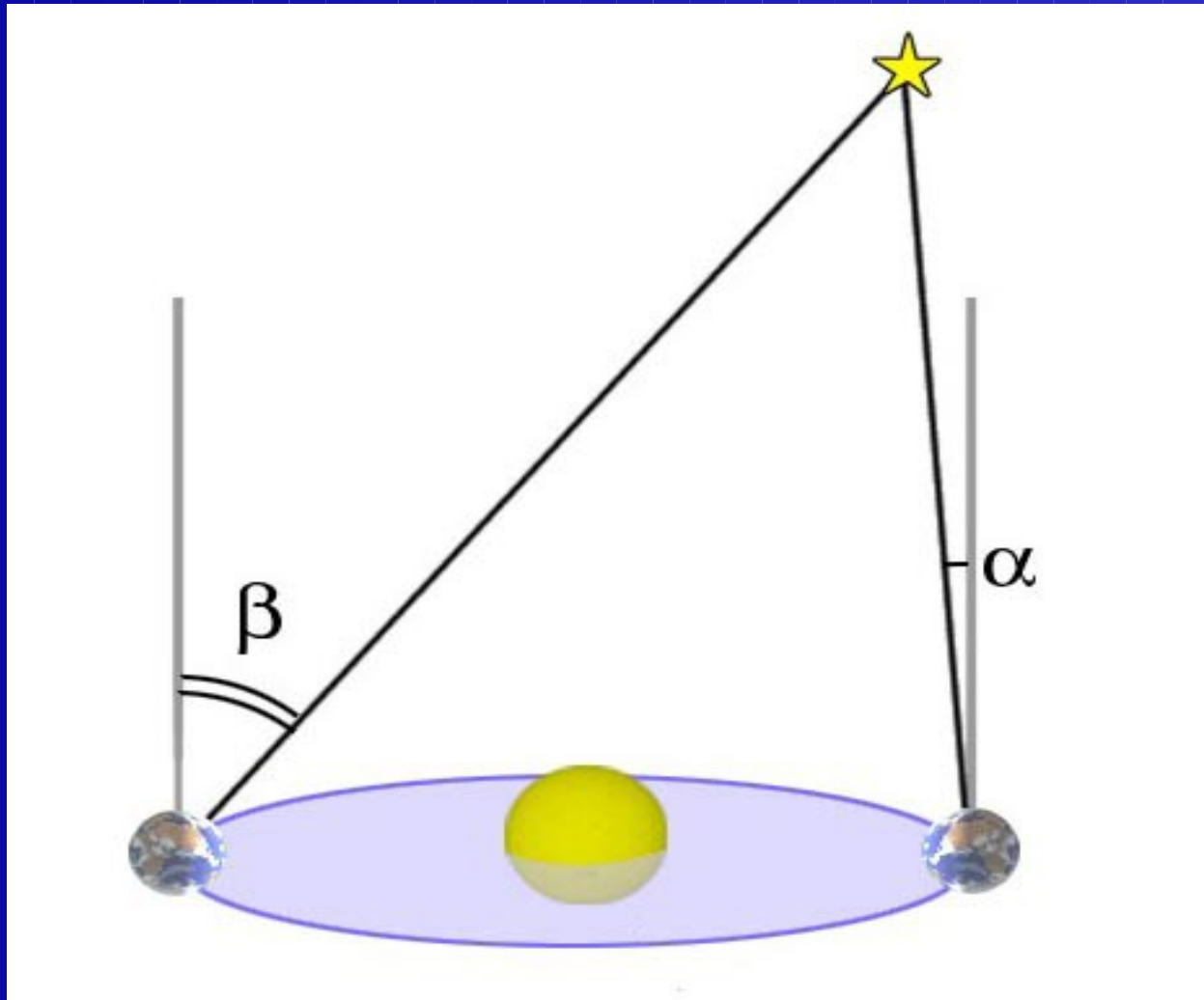


Mesure de la distance des étoiles



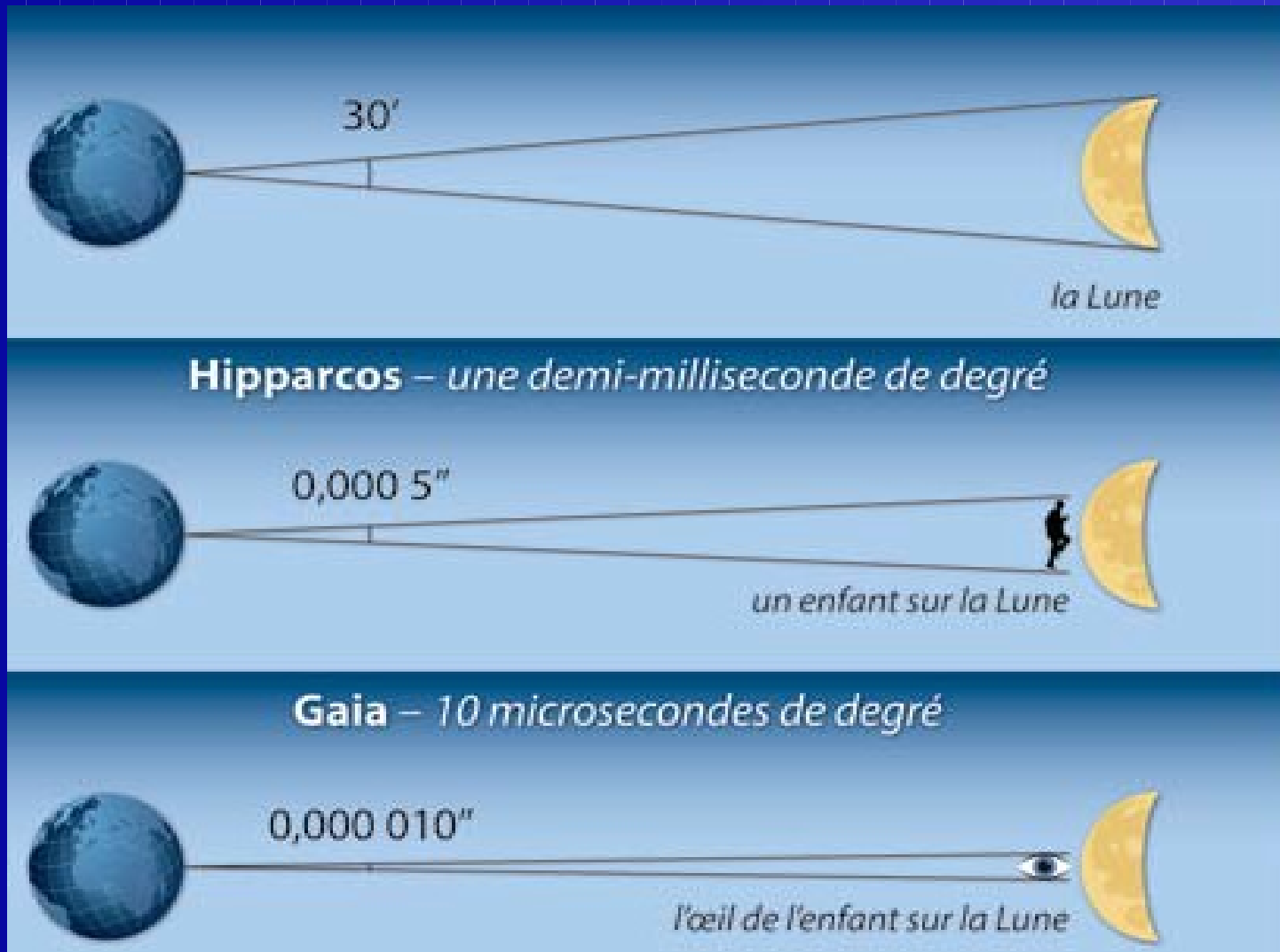
La distance des étoiles: la parallaxe annuelle

- Nécessité d'une grande base. En restant sur terre, utilisation des saisons.



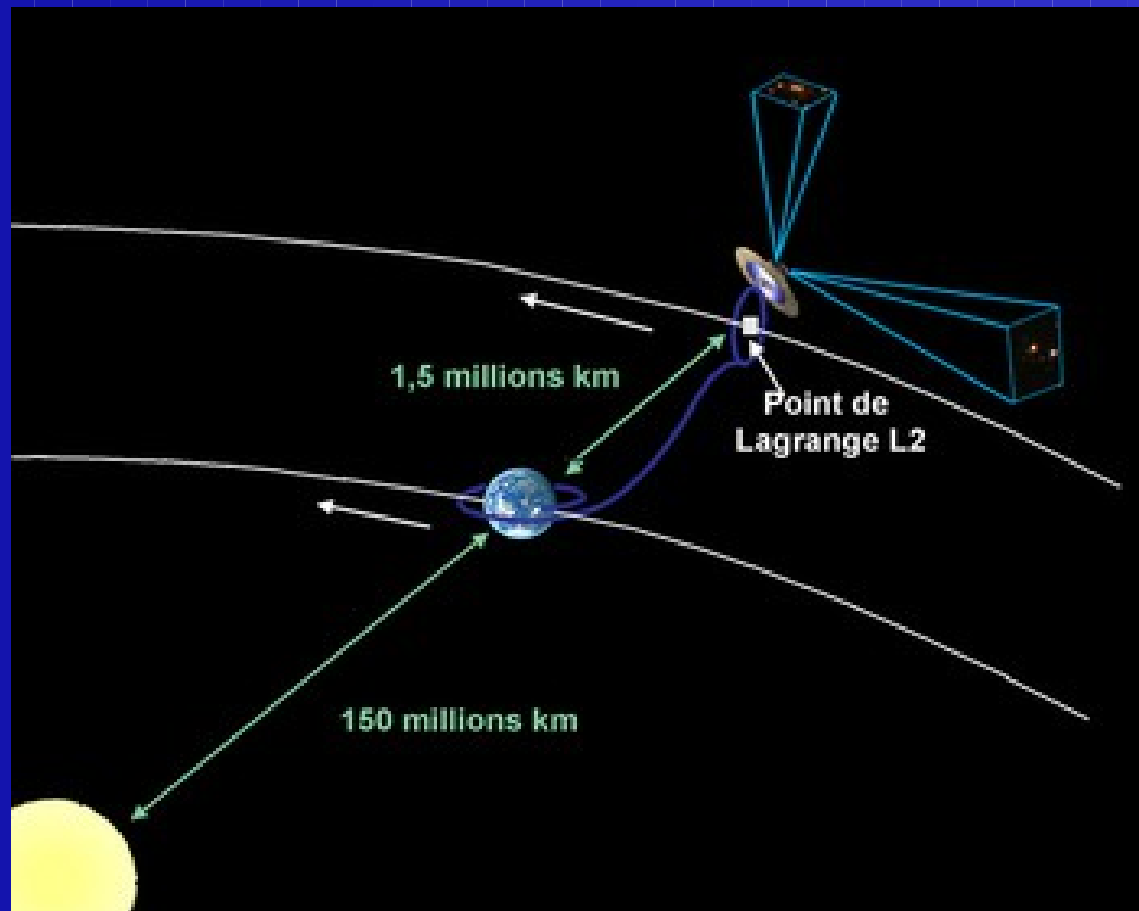
La mesure par la parallaxe et les satellites

Gaia surpasse le premier satellite astrométrique Hipparcos (1989-1993) d'un facteur 10 000 en nombre d'objets observés et d'un facteur 50 en précision.



La parallaxe par le satellite GAIA

- Mesure précisément les paramètres astrométriques des étoiles
- Calibration précise des chandelles standard



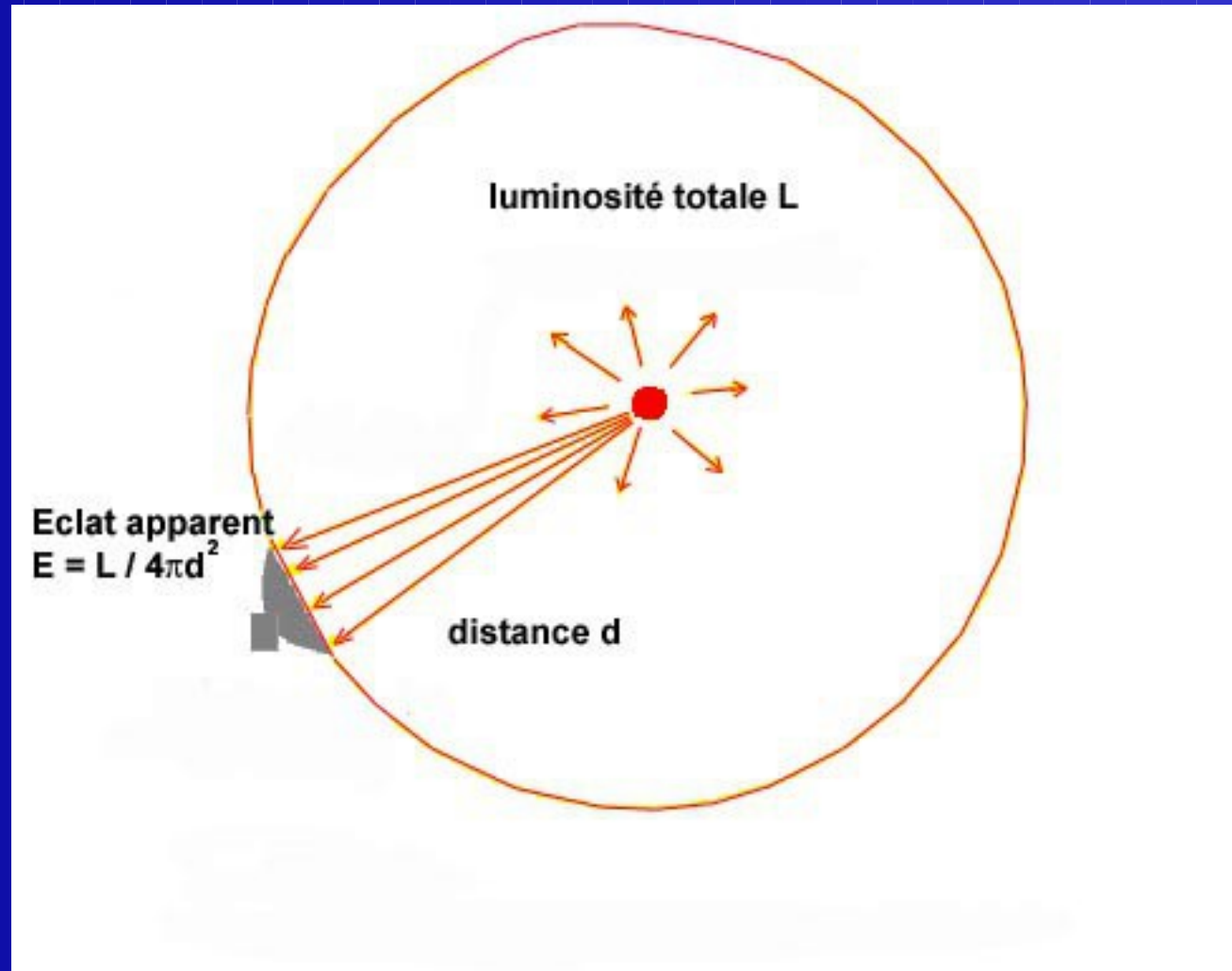
Distances par photométrie

Luminosité fonction de la distance



La luminosité des étoiles comme critère : Les chandelles cosmiques

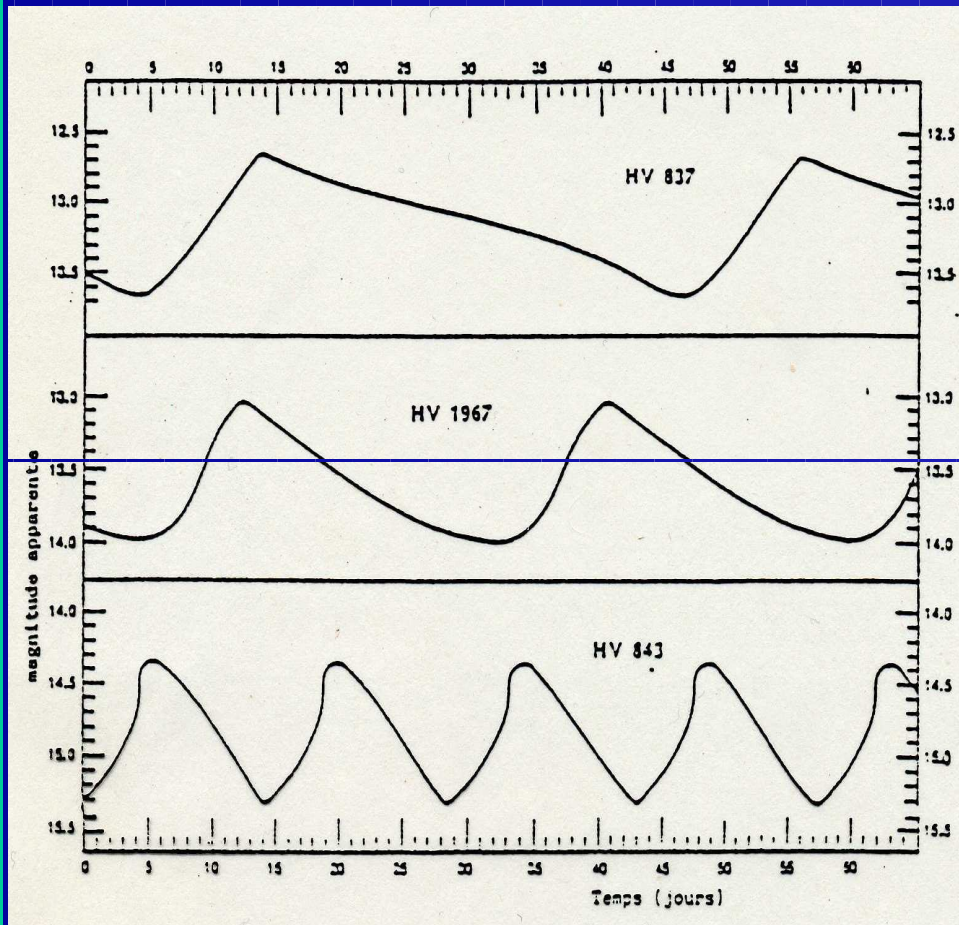
On mesure un éclat apparent et on le compare à ce que l'on connaît de la luminosité intrinsèque de l'objet.
Plus une étoile est loin, moins elle est brillante



UN PREMIER INDICATEUR DE DISTANCES : LES VARIABLES PULSANTES : Rr-Iyrae et CÉPHÉIDES

Céphéïdes : la période P des variations dépend de leur masse donc de leur luminosité moyenne : Plus une céphéïde est lumineuse, plus sa période est longue. La relation est de la forme :

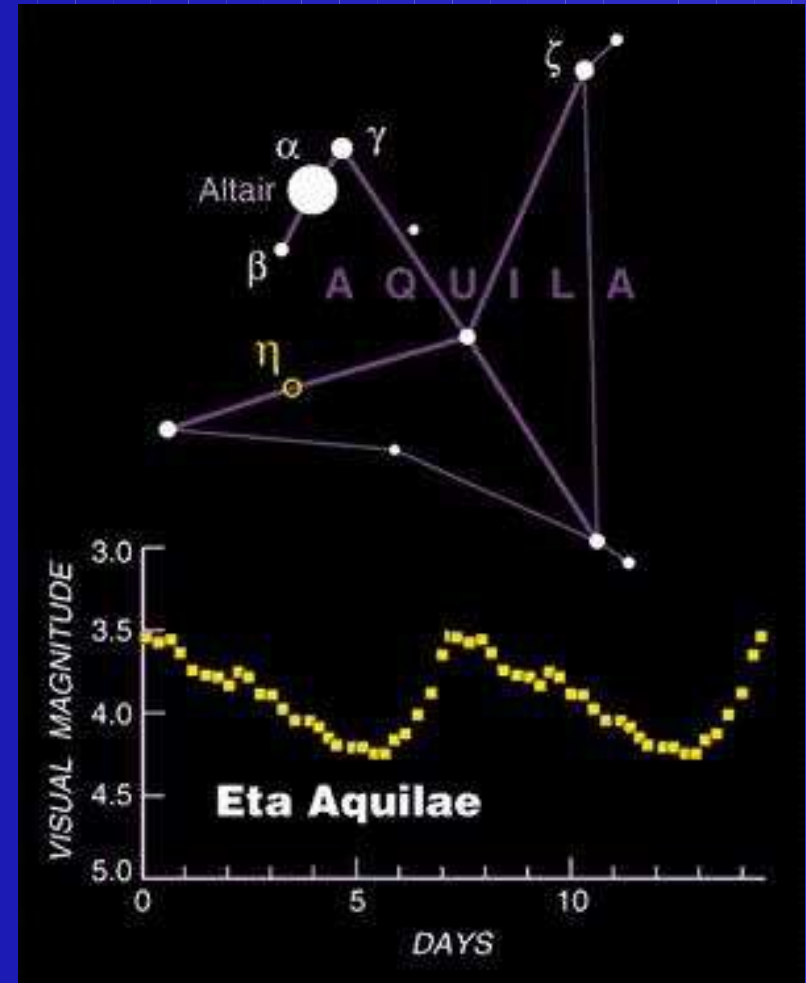
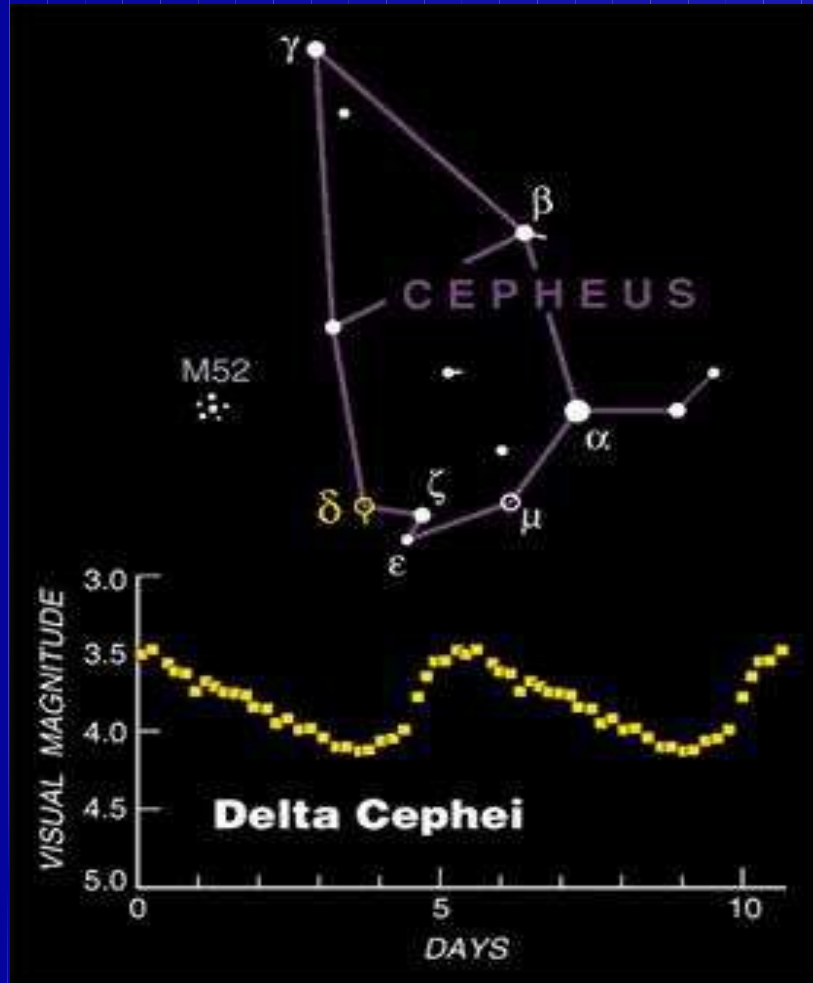
$\langle M \rangle = a \log P + b$ où $\langle M \rangle$ est la magnitude absolue moyenne.



(Henrietta Leavitt, 1912)



Deux exemples de Céphéïdes (étoiles pulsantes)



Différences entre Céphéides et RR-Lyrae

- Varient de manière similaire

RR Lyrae's

- RR-lyrae plus vieilles, moins massives donc moins lumineuses mais plus nombreuses.
- Magnitude entre -1 et -6, période de 1 à 45j
- Situées dans le bulbe galactique

Céphéides

- Super géantes très brillantes, jeunes, 5 à 15 masses soleil
- Situées dans le disque galactique
- Luminosité jusqu'à 100.000 fois le soleil, visibles dans les galaxies « proches ».
- Hubble a déterminé les distances de galaxies de cette façon, notamment Andromède.

Le calcul de la distance par les magnitudes

RR-Lyrae : $\langle M \rangle$ constante : 0,71

Céphéides :

$$\langle M \rangle = a \log P + b$$

a et b déterminés à partir de Céphéides de notre Galaxie (distance mesurée par ailleurs, par ex. avec parallaxes)

on mesure la période P

on déduit la magnitude absolue $\langle M \rangle$

$$\text{actuellement } \langle M \rangle = -1.40 - 2.76 \log P$$

on mesure la magnitude apparente m

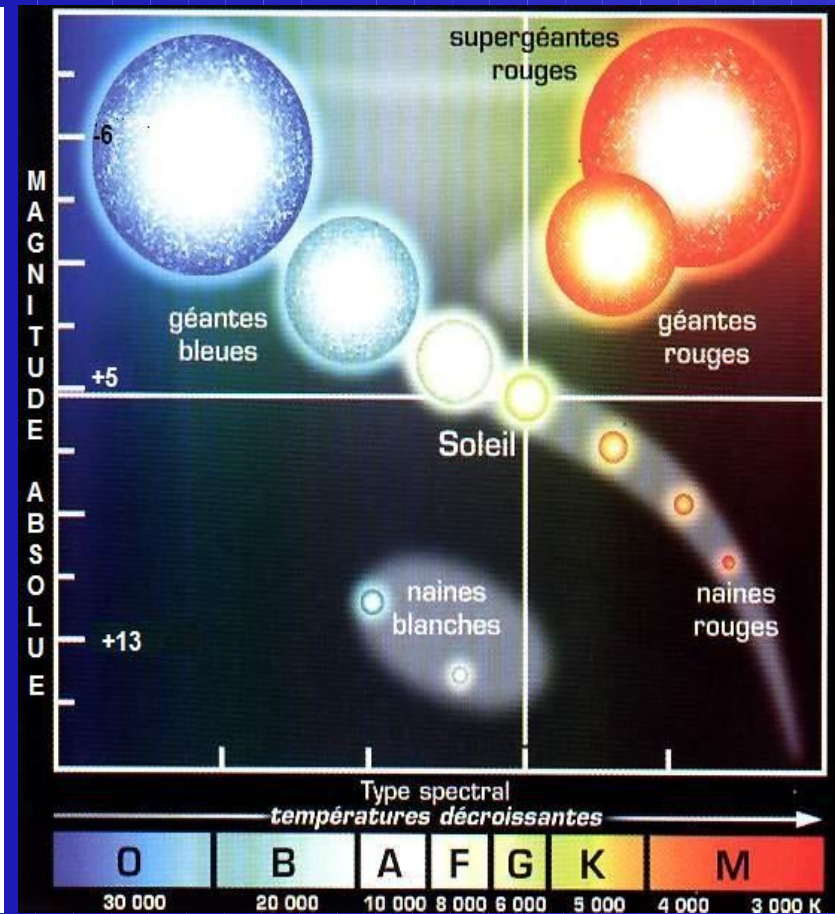
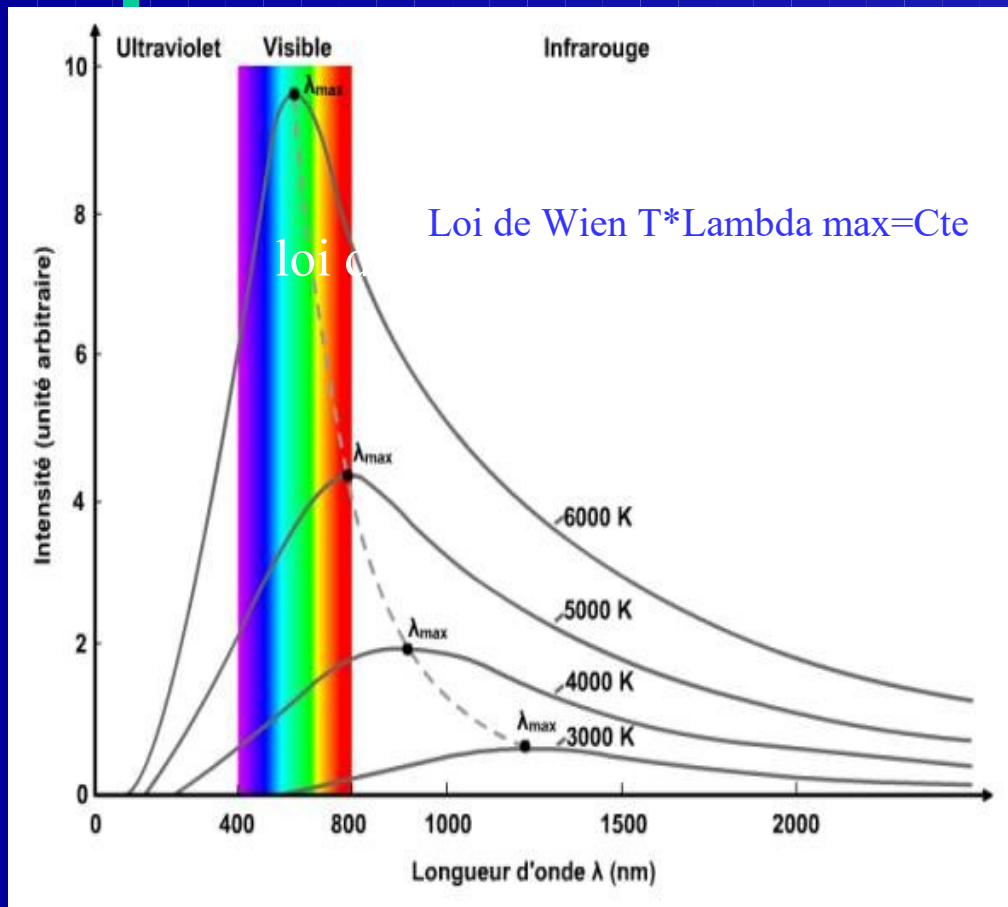
on obtient la distance D de la galaxie grâce à la relation:

$$m - M = 5 \log D_{\text{pc}} - 5$$

Classification des étoiles et calcul de distance

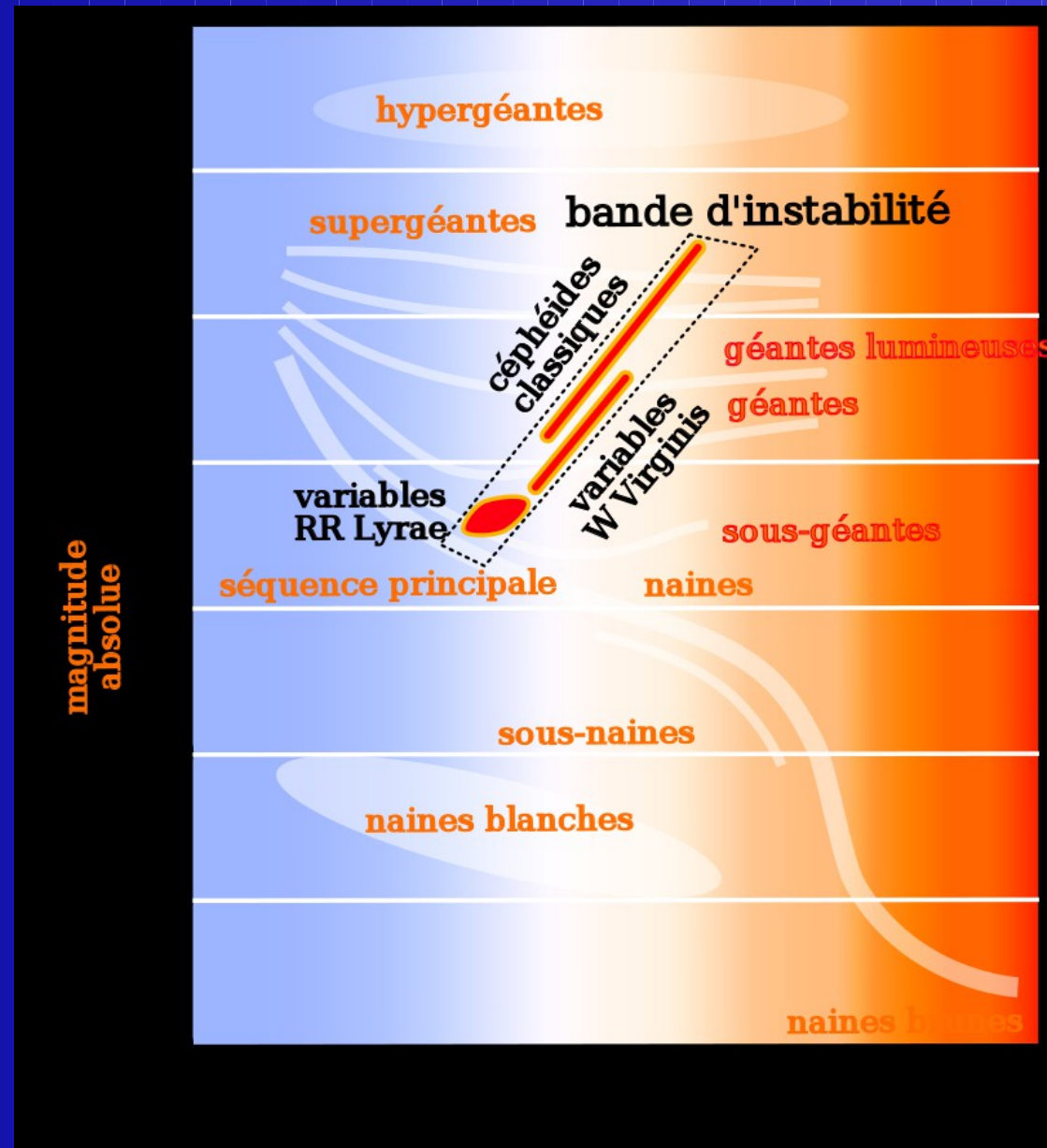
On peut classer les étoiles par leur type spectral. La magnitude absolue M est liée à la température. La température est estimée en spectroscopie. On mesure la magnitude apparente m .

$$m - M = 5 \log D_{\text{pc}} - 5$$



Classification des étoiles et calcul de distance

- Les variables pulsantes sont sur une « bande d'instabilité » perpendiculaire à la séquence principale.



UN DEUXIEME INDICATEUR DE DISTANCES : Les variables éruptives : NOVAE et SUPERNOVAE

- Les novae et supernovae sont des étoiles massives qui explosent à la fin de leur « vie » en libérant une quantité d'énergie considérable.
- Les Novae sont des étoiles doubles serrées.
- Ex: géante rouge + naine blanche
- Plusieurs dizaines par an dans la voie lactée. Elles sont récurrentes.
- Les superNovae résultent de l'explosion d'une étoile en fin de vie.
- Un certain type de supernovae, les SNIa, résulte de l'explosion thermonucléaire d'une naine blanche à la suite d'une accréation de matière arrachée à une étoile voisine.
- La magnitude absolue M_{max} qu'atteignent les SNIa au maximum de leur éclat est constante d'une étoile à l'autre à 25% près et vaut environ -19.5. (Novae max = -6,5)
- Très rares : 3 dans la voie lactée depuis 1054 (Crab, chinois), 1 dans le nuage de Magellan en 1987.

En mesurant leur magnitude apparente au maximum d'éclat, on peut donc déterminer leur distance.

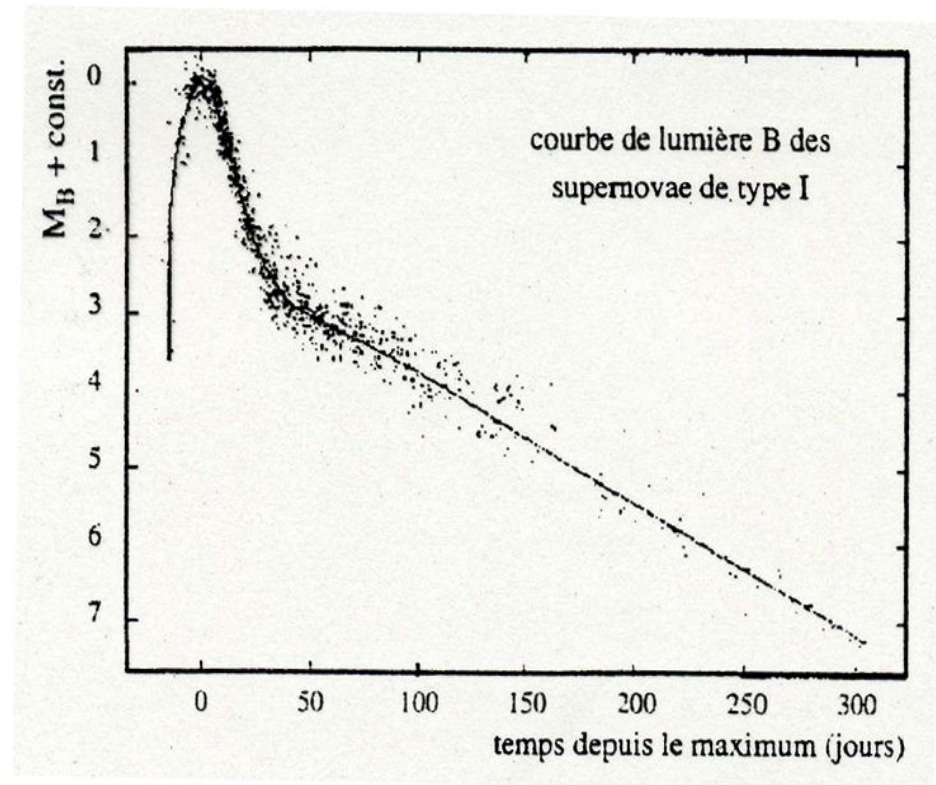
Courbe de lumière d'une SN1a

SN 1994D dans NGC 4526 (Virgo cluster, 14 Mpc)

SN 1994D dans NGC 4526
(Virgo cluster, 14 Mpc)



COURBES DE LUMIÈRE DES SUPERNOVAE



UN TROISIEME INDICATEUR DE DISTANCES : LA RELATION DE TULLY-FISCHER

Il existe une relation entre la magnitude absolue totale M d'une galaxie et la valeur maximale V_{\max} de la vitesse de rotation du disque de la galaxie :

$$- M = a \log V_{\max} + b$$

Galaxies spirales uniquement.

On a ainsi pu construire de proche en proche des échelles de distances pour mesurer les distances des galaxies, aboutissant à la loi de Hubble qui permet de calculer la distance des galaxies à partir de leur décalage spectral.

LA MESURE DES DISTANCES DES GALAXIES PAR SPECTROSCOPIE

- Les spectres des galaxies sont la superposition des spectres des étoiles qui les constituent
- On constate que les spectres de toutes les galaxies (sauf quelques galaxies très proches) sont décalés vers le rouge (grandes longueurs d'onde, ou petites fréquences) par rapport aux spectres des étoiles de notre Galaxie : analogie avec effet Doppler-Fizeau
- Donc les galaxies s'éloignent les unes des autres
- On mesure leur décalage spectral et on déduit leur vitesse d'éloignement, puis leur distance avec la loi de Hubble

Galaxie de décalage spectral Z inconnu

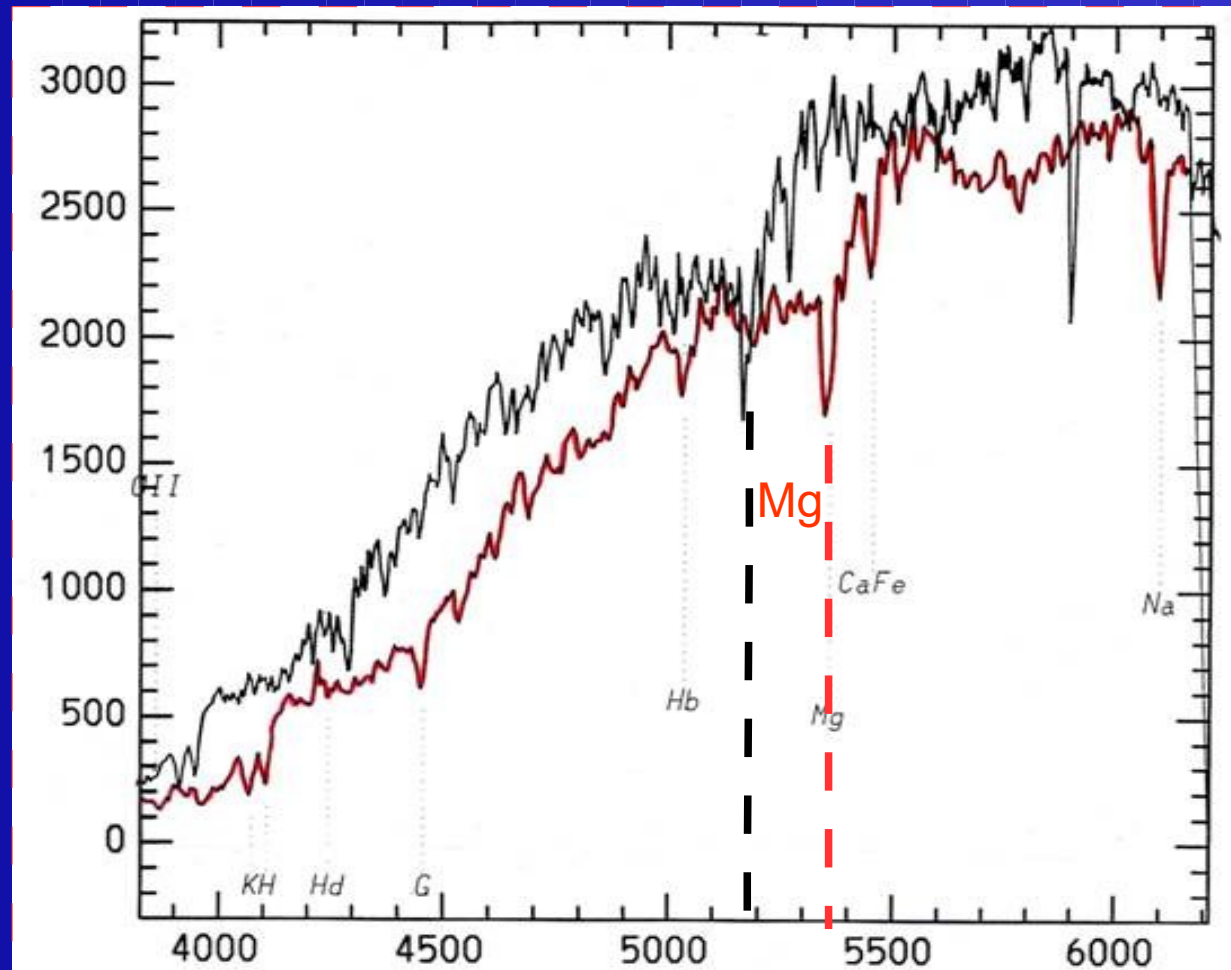
Noir : M31

Rouge :
Z à mesurer

$$Z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$$

Vitesse de la
galaxie $c \cdot Z$ par
rapport à M31
 10583 ± 20 km/s
 $Z = 0.0353$

$D = V / H$
 $H =$ cte de Hubble
 72 km/s/Mpc



Calcul de distance des galaxies

La spectroscopie permet de mesurer le décalage vers le rouge (redshift) Z de chaque galaxie :

$$Z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$$

λ = longueur d'onde d'une raie mesurée dans le spectre de la galaxie étudiée

λ_0 = longueur d'onde de la même raie mesurée en laboratoire.

Le décalage spectral Z permet d'estimer leur vitesse d'éloignement :

$$V \sim c Z \text{ si } Z \text{ est petit}$$

$V \sim c [(1+Z)^2 - 1] / [(1+Z)^2 + 1]$ pour Z plus grand (relativité!)

Hubble a montré que la distance D des galaxies était proportionnelle à leur vitesse d'éloignement V (relation de Hubble)

$$V = H_0 D$$

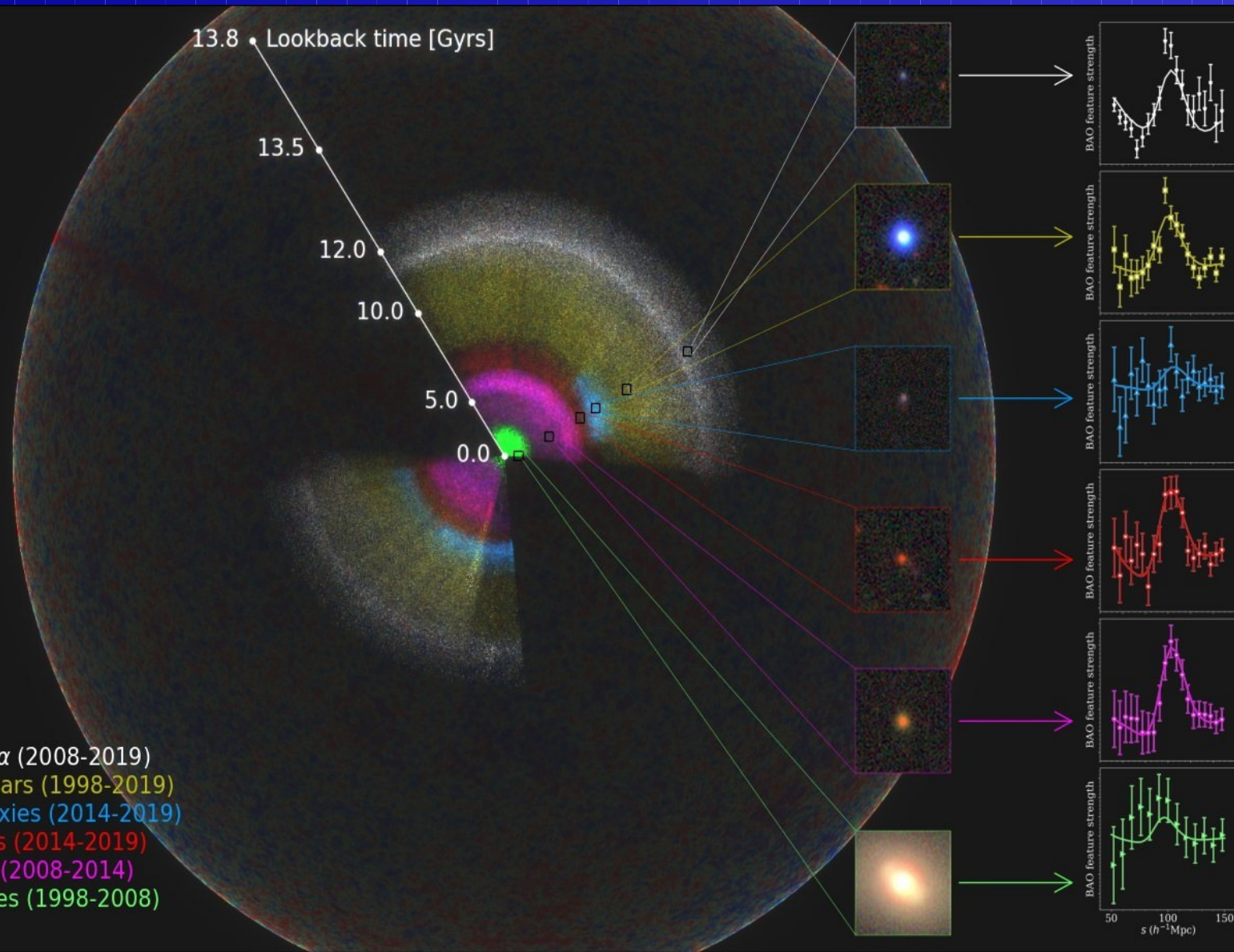
Le SDSS : cartographie du ciel en 3D

- Programme basé à Apache point observatory, Nouveau Mexique
- Débute en 2000. Plusieurs phases, de plus en plus loin : galaxies rouges, bleues, quasars et l'absorption par les nuages d'hydrogène de la lumière des quasars, appelée « forêt Lyman- α »
- Ainsi, les chercheurs ont pu reconstituer la distribution tridimensionnelle de la matière à grande échelle, sur une large portion d'Univers, au-delà de 10 milliards Al.



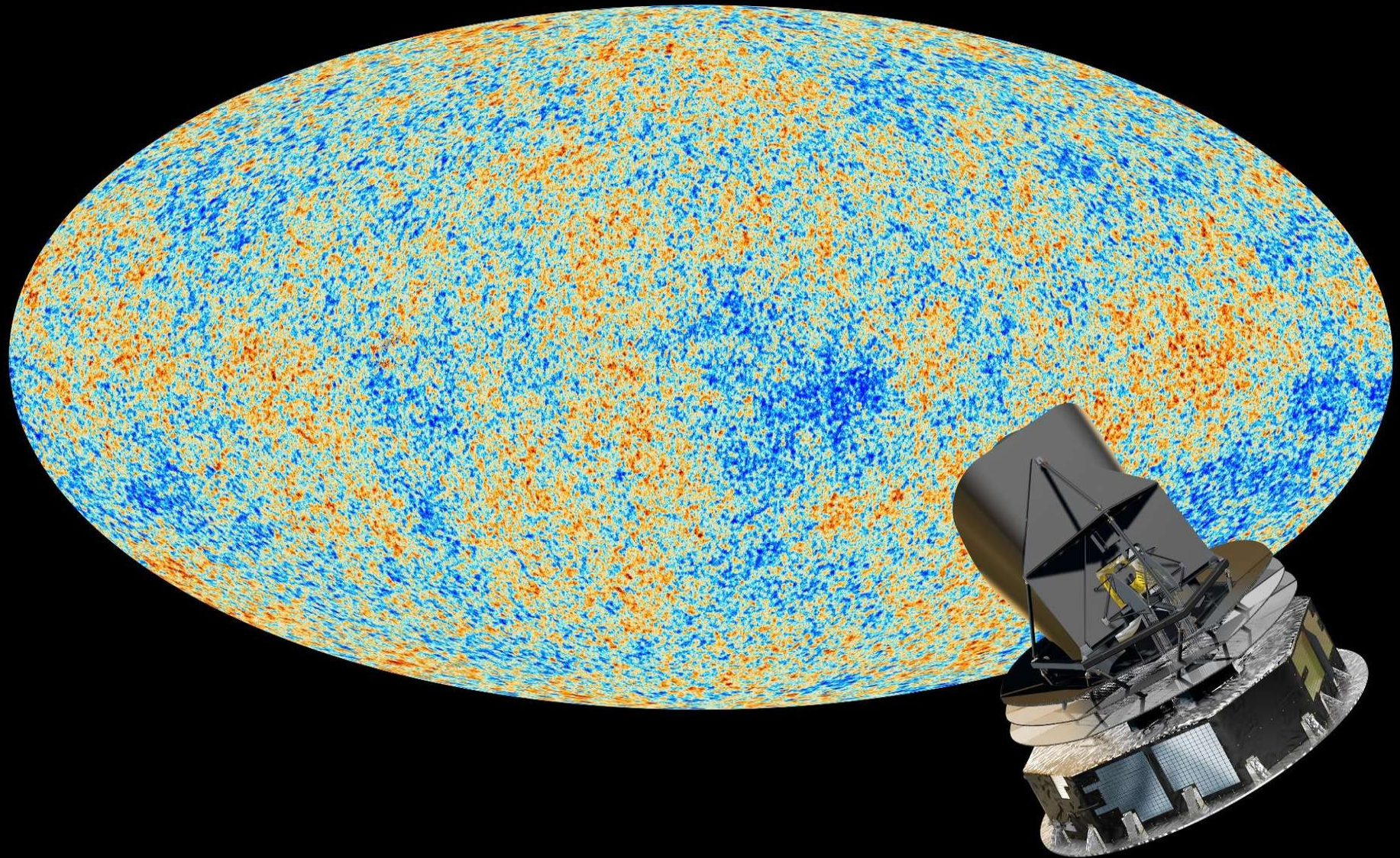
SDSS « Sloan digital sky survey »

eBOSS « extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey »



Planck : le fonds diffus cosmologique CMB

Cartographie de l'univers primordial



Conclusion

- 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
 - La quête n'est pas finie: la taille de l'univers est encore incertaine
- 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