

# HISTOIRE DES MESURES DE DISTANCES DANS L'UNIVERS

De l'Antiquité à nos jours

# SOMMAIRE

**Méthodes géométriques: - 500 à 1838**

*Aristarque de Samos, Erathostène, Hipparque,  
Copernic, Kepler, Cassini, Halley, etc*

**Méthode des parallaxes : 1838 à 1911 et 1998 - !**

*Bessel, Lacaille-Lalande puis Hipparcos, Gaïa*

**Méthode physique : 1911 -**

*Drapper, Leavitt, Hubble*

**Méthode cosmologiques : depuis 1927.**

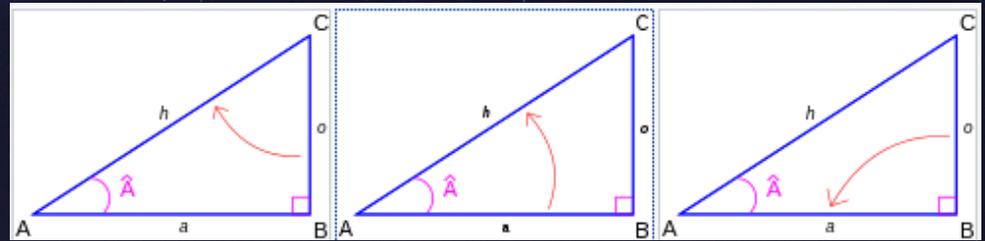
# Rappel de trigonométrie

Premières traces ~  
-4 000 ans

Preuves avérées ~  
-VII-VIII Inde

Enoncé et  
démonstration: Euclide

Formalisation :  
Hipparque, Ptolémée



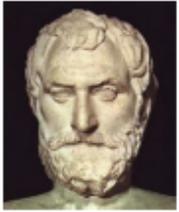
$$\sin(\hat{A}) = \frac{\text{Côté opposé}}{\text{Hypothénuse}}$$

$$\cos(\hat{A}) = \frac{\text{Côté adjacent}}{\text{Hypothénuse}}$$

$$\tan(\hat{A}) = \frac{\text{Côté opposé}}{\text{Côté adjacent}}$$



**Acte 1**  
**La Terre et la Lune**  
**par trigonométrie**



Thalès



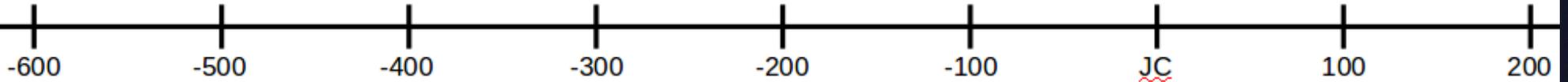
Aristarque



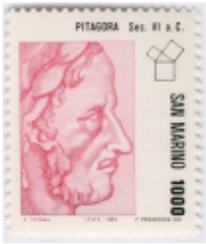
Hipparque



Ptolémée



Pythagore



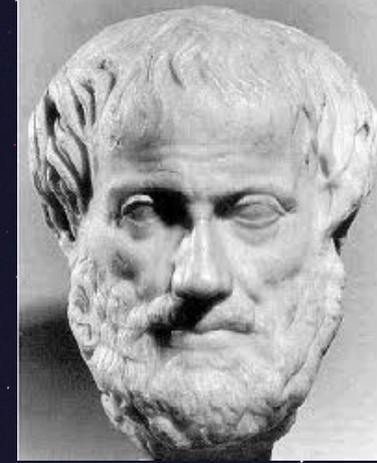
Aristote



Eratosthène



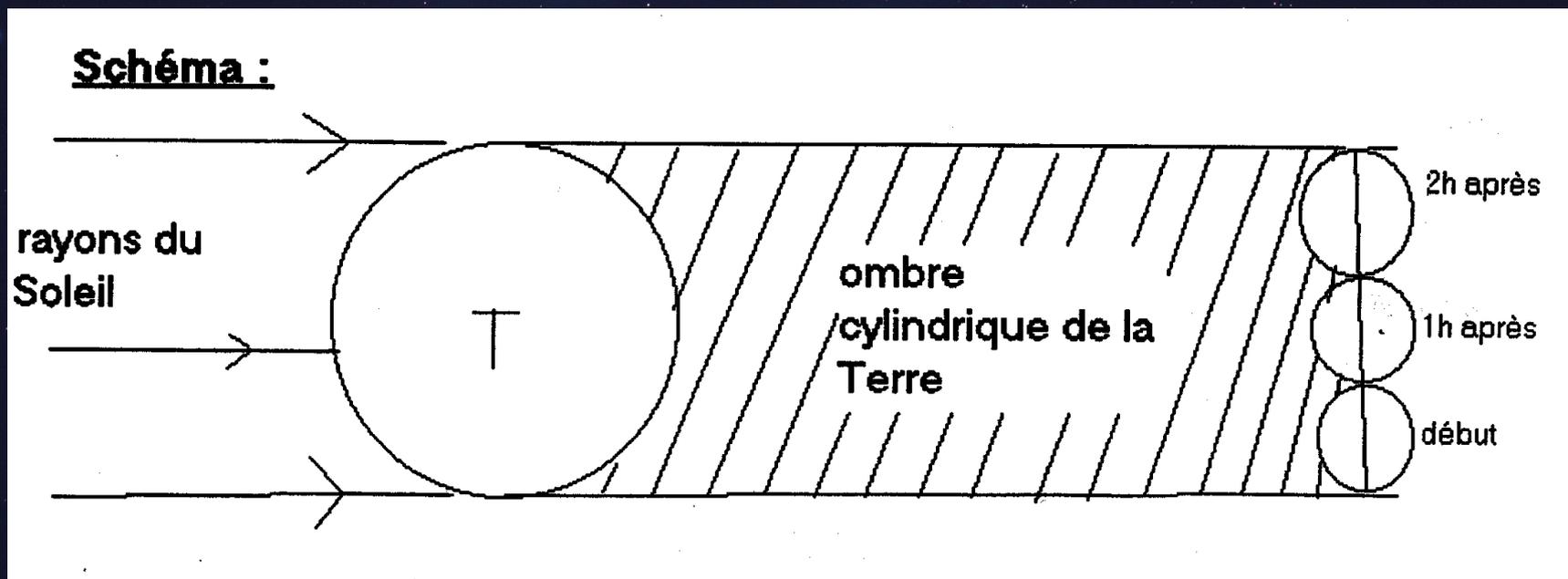
# Mesure de la lune



**Aristarque de Samos** (env. 310-239 av J.C)

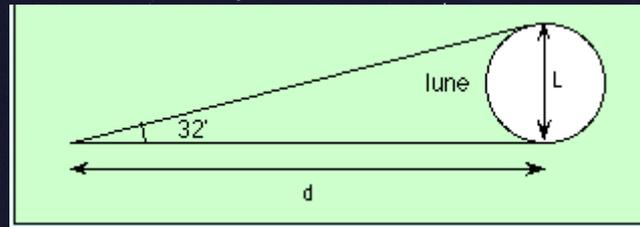
Lune parcourt en une heure l'équivalent de son diamètre et son éclipse totale dure au maximum deux heures.

La Terre est capable de cacher 3 Lunes => Diamètre terrestre = 3 \* diamètre lunaire.



# Mesure de la lune

A partir de cette mesure, on peut estimer la distance Terre-Lune



- $L = 0.3$  diamètre terrestre
- La Lune est vue sous un angle de  $2^\circ$  selon Aristarque (non mesuré)

$$\operatorname{tg}(2) = \frac{L}{d}$$

- $d = 26.3$  diamètre lunaire  $\times 3 = 79.9 D_T$

# Mesure de la lune : Hipparque

L'ombre de la

sphérique

Hipparque mes  
l'angle = 0.53

n cône et mesure

La Lune mes

diamètre de la Terre



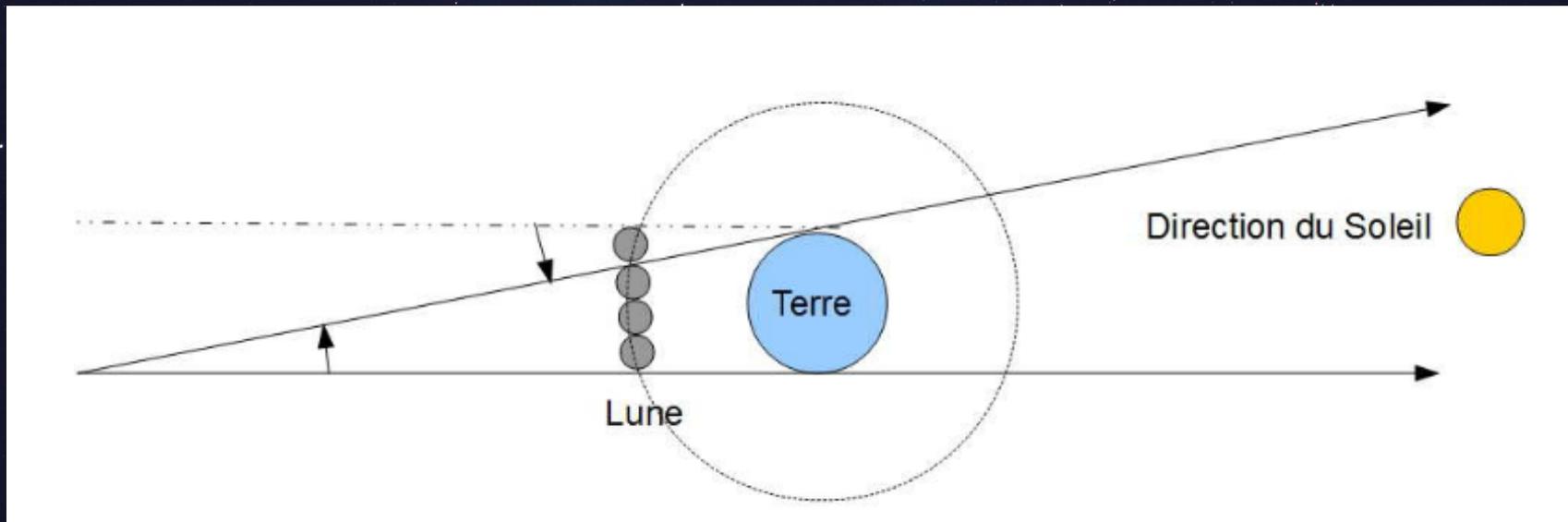
~ -190 - ~ -120

# Hipparque : la distance Terre-Lune

$$\operatorname{tg}(0.5) = \frac{0.2732 * D_T}{d}$$

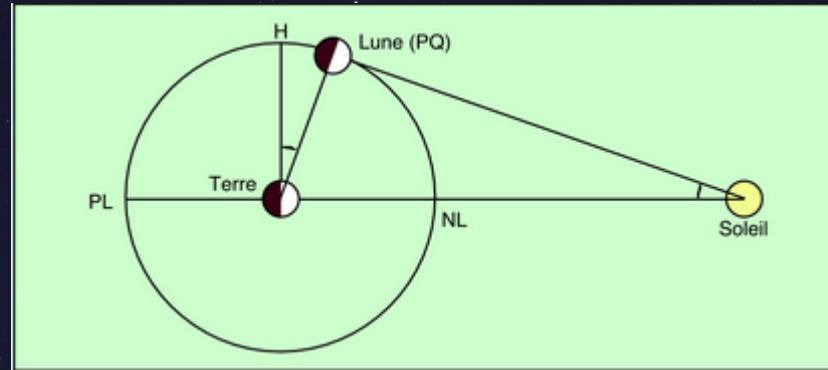
$$d = 31.3 D_t = 62.6 R_T$$

La valeur exacte est de 60 !



# Mesure de la distance du Soleil

Aristarque a évalué cette distance



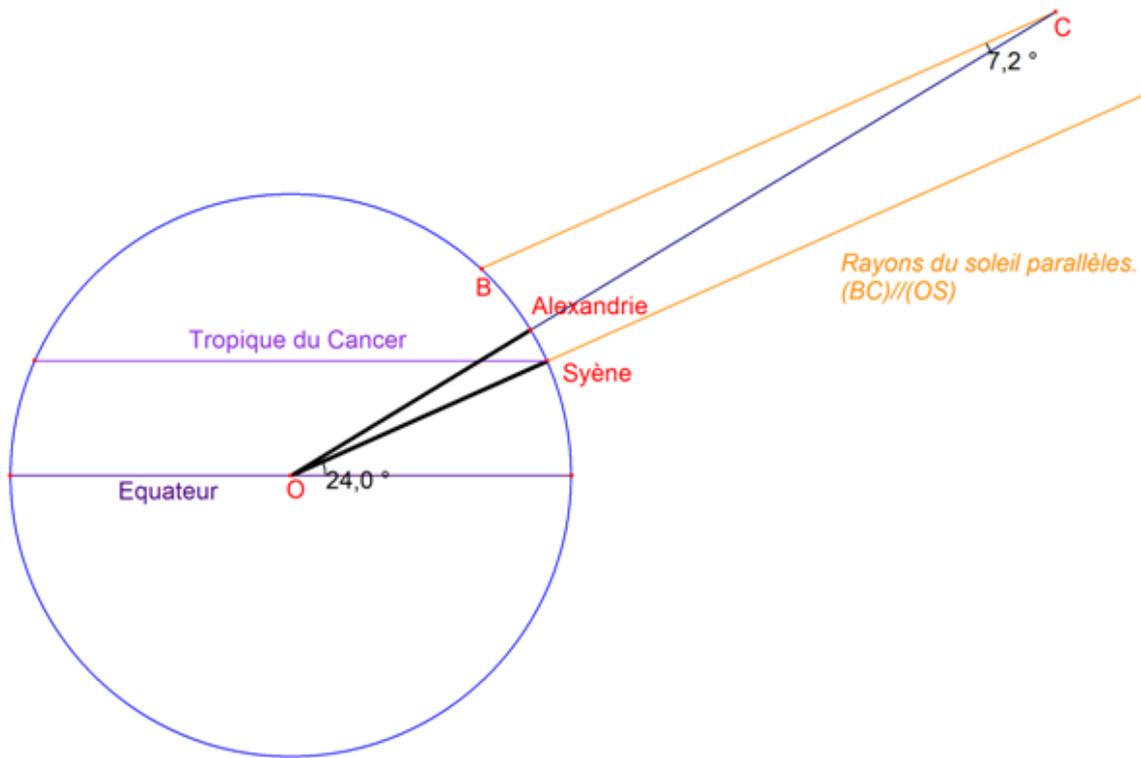
Angle HTL =  $3^\circ \Rightarrow$

Il trouve 20 fois plus loin que la Lune.  
En réalité c'est 400 fois.



# Mesure de la Terre

- **ERATOSTHENE (-284 / -192)**



Au solstice d'été :

A Alexandrie ombre de  $7,2^\circ$   
A Syène pas d'ombre

$$360^\circ / 7,2^\circ = 50$$

=>  $d * 50 =$  Circonférence Terre

250 000 stades

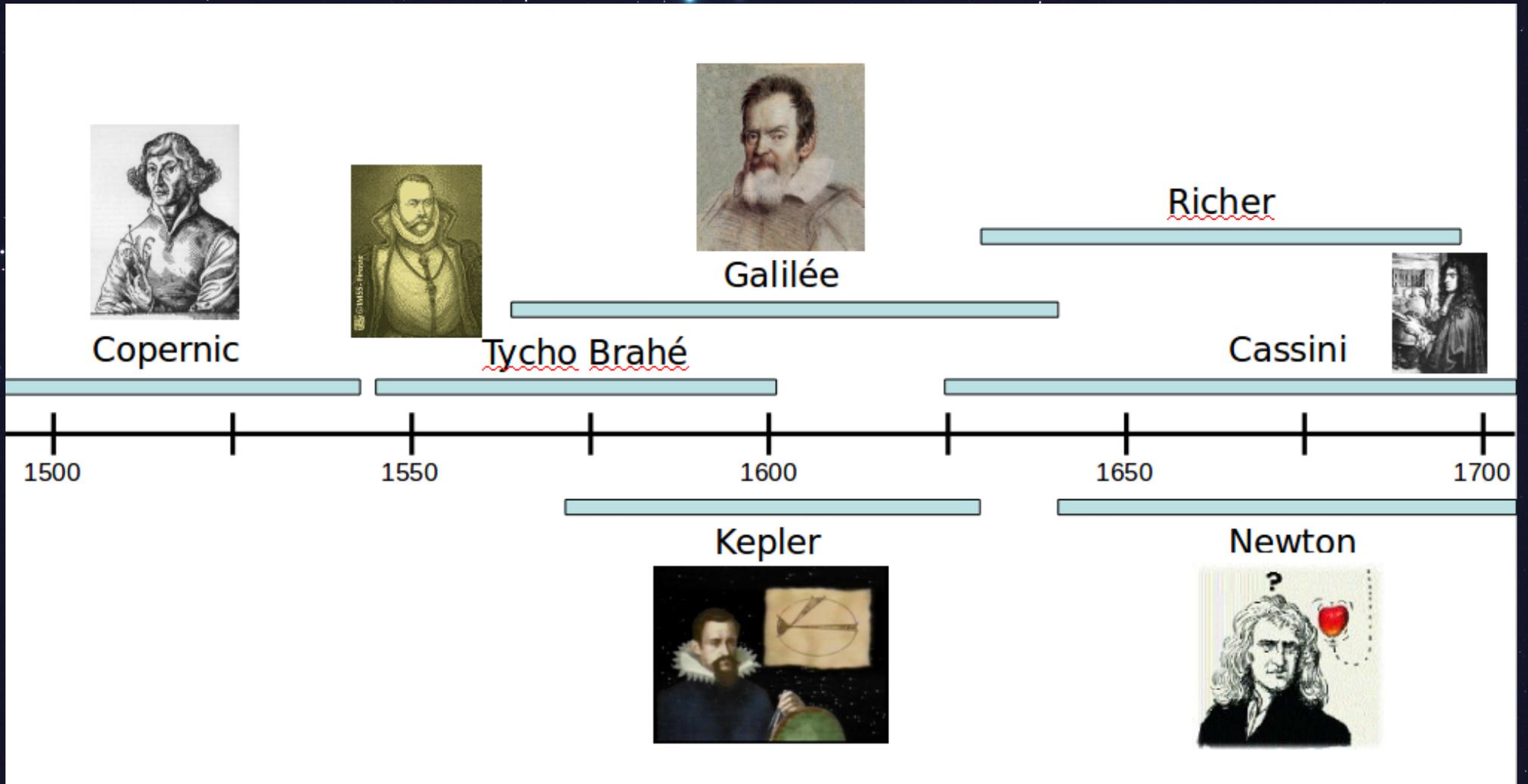
Combien la stade ????

Stade égyptienne = 157,2m

=> 39 375 km !!



**Acte II**  
**Le système solaire**



Copernic



Tycho Brahé



Galilée



Kepler



Richer



Cassini



Newton

1500

1550

1600

1650

1700

# Distance relative de Vénus

Elongation maximum de Vénus / Soleil.

Angle Terre-Venus-Soleil =  $90^\circ$

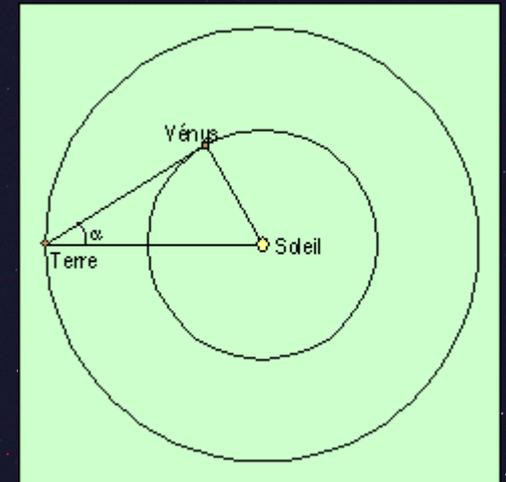
Copernic (1473-1543)

détermine  $\alpha = 46^\circ$

$$SV = \sin(46) * ST$$

$$SV = 0.7 * ST$$

(Avec  $ST = 150 \text{ MKm} \Rightarrow SV = 105 \text{ Mkm}$ )



# Kepler 1609 : Distance de Mars

## 1) Mesure de l'angle SMT'

Terre:  $T_T = 365,25$  jours Mars:  $T_M = 688$  jours

Conjonction  $\rightarrow$  quadrature = 106 jours.

L'angle balayé par la Terre vaut :

$$t = \frac{360}{365} * 106 = 105^\circ$$

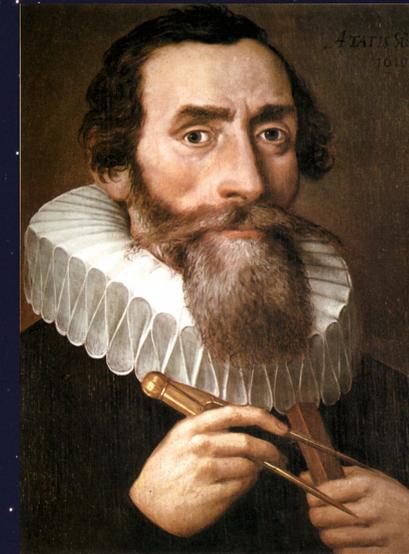
L'angle balayé par Mars durant cette période vaut

$$m = \frac{360}{688} * 106 = 55^\circ$$

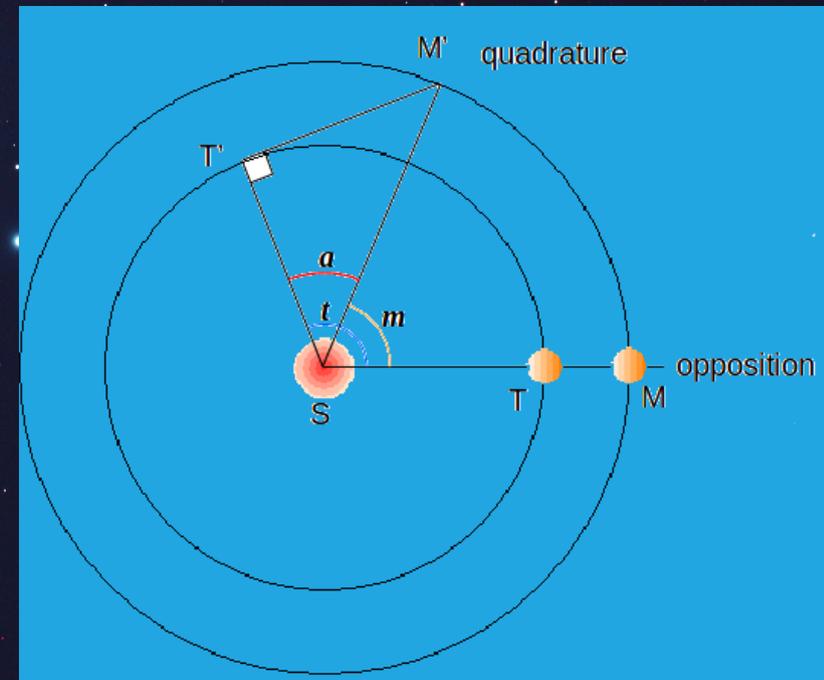
L'angle  $a$  vaut donc  $105^\circ - 55^\circ = 50^\circ$

$$\cos(a) = \frac{\text{Côté adjacent}}{\text{Hypothénuse}}$$

2) Un peu de trigo  $\Rightarrow MS = 1.55 TS$



1571 - 1630



# Lois de Képler : Mesure relative

1618 : Selon la 3ème loi de Képler (1571-1630)

$$\frac{a^3}{T^2} = C$$

T = période de révolution en année

a = demi-grand axe en UA

On en déduit que Jupiter est 5 fois plus éloigné du Soleil que la Terre.

$$\frac{1^3}{1^2} = \frac{d^3}{12^2}$$

$$d = \sqrt[3]{144} = 5,24 \text{ UA}$$

# KEPLER : Les autres planètes

Soleil – Mercure = 0.4 UA

Soleil – Vénus = 0.7 UA

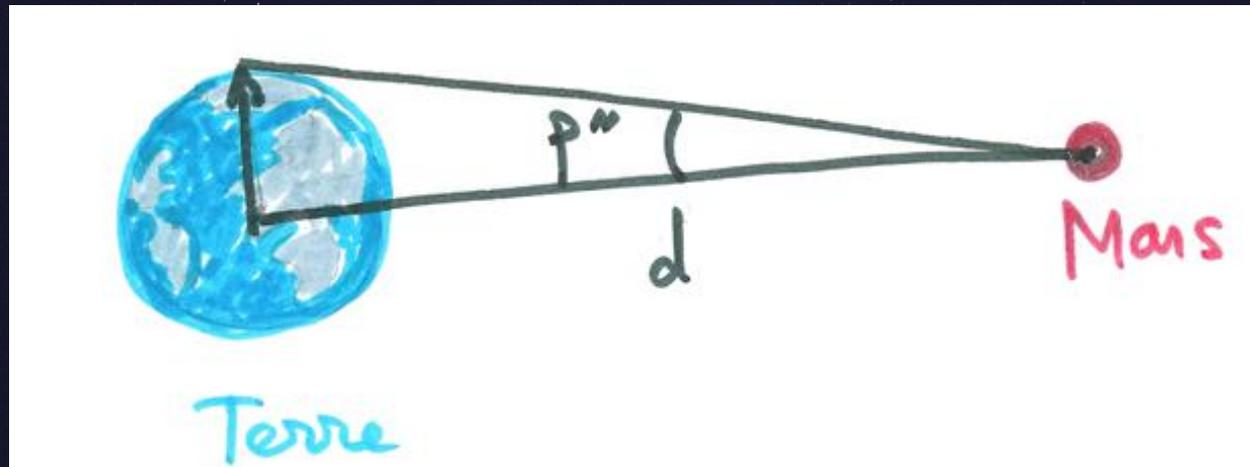
Soleil – Mars = 1.5 UA

Soleil – Jupiter = 5.2 UA

Soleil – Saturne = 9.5 UA

# Cassini 1672 : Calcul de l'UA

- Mars est observée depuis Paris et Cayenne le même jour.
- On connaît la distance Paris-Cayenne,
- On mesure l'angle Paris-Mars-Cayenne
- Par trigo il détermine la distance  $d = \frac{\frac{3754}{2}}{\sin(0.00236)}$  45 Mkm.  
(Cassini donne 55 !)
- Il applique la 3ème loi de Kepler et trouve UA=144 Mkm
- Erreur de 8,5% seulement, sur 149 597 Mkm !



# Calcul de Cassini pour l'UA

Excentricité de Mars	$e=0.093$	Kepler
Révolution de Mars	$T_m=1.88$ an	Kepler
Révolution Terre	$T_t=1$ an	
Distance Terre-Mars	$TM=55$ Mkm	Cassini

$$ST = \frac{TM}{(1-e) * \left(\frac{Tm}{Tt}\right)^{\frac{2}{3}} - 1} = 144 \text{ MKm}$$

# Mesure de l'UA

1742 : Halley et le transit de Vénus 1761

L'Académie Royale organise des expéditions :

JB CHAPPE en Sibérie

PINGRE à Madagascar

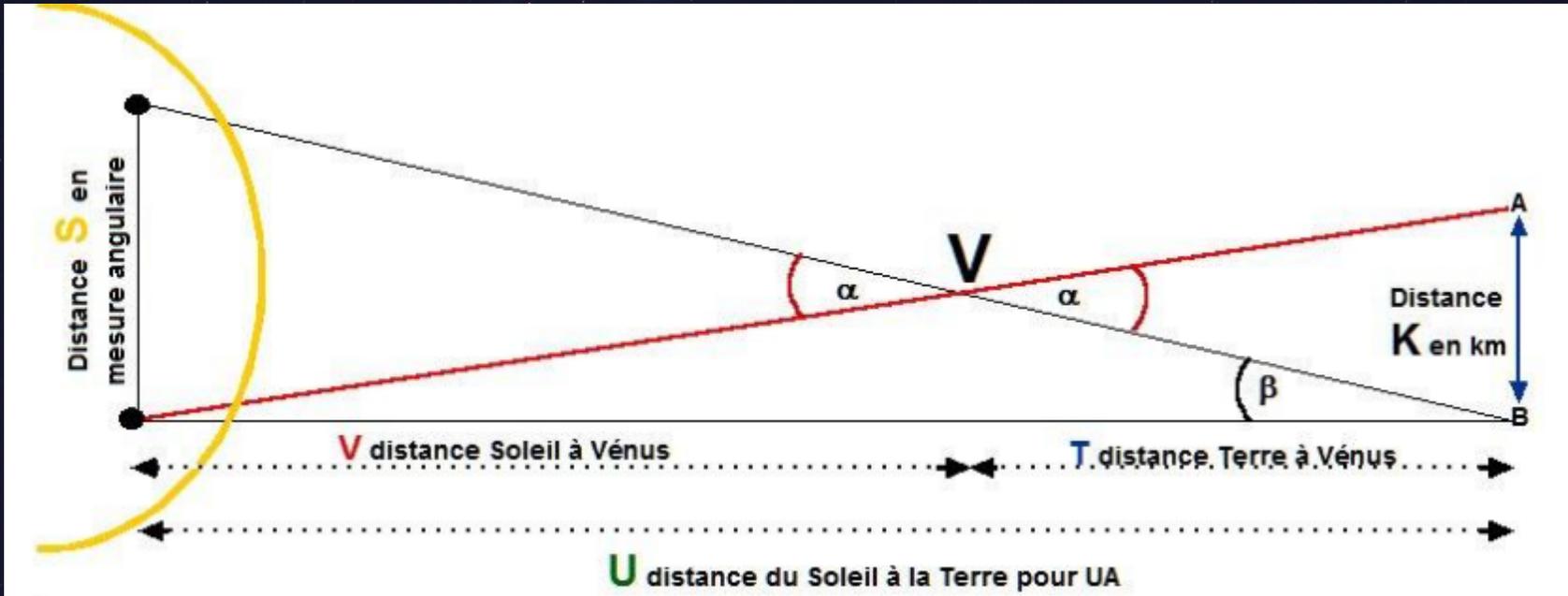
LE GENTII à Pondichery

COOK à Tahiti

1769 : Mesure depuis Varda en Suède et Tahiti.



# Mesure de l'UA



Transit de 1672	144 Mkms
Transits de 1761 et de 1769	153 MKms
Transits 1874 et de 1882	149,9 Mkms
Télémétrie radar	149 597 870 700 $\pm$ 30 m

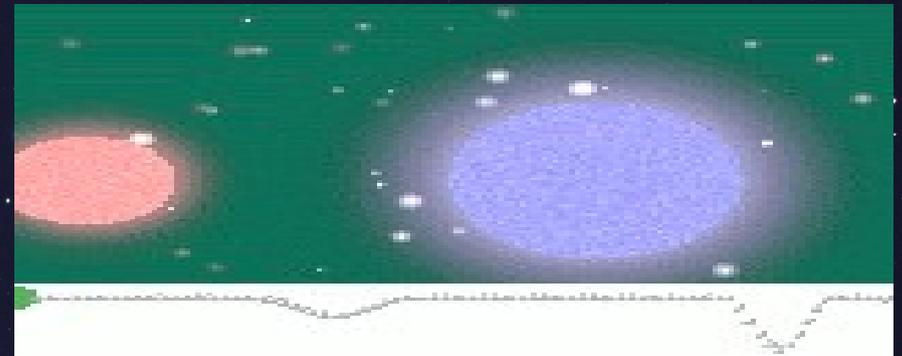


**Acte III**  
**Les étoiles et les galaxies**

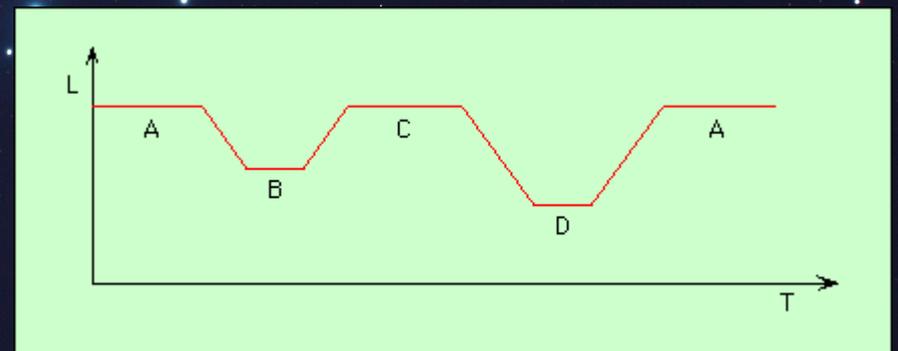
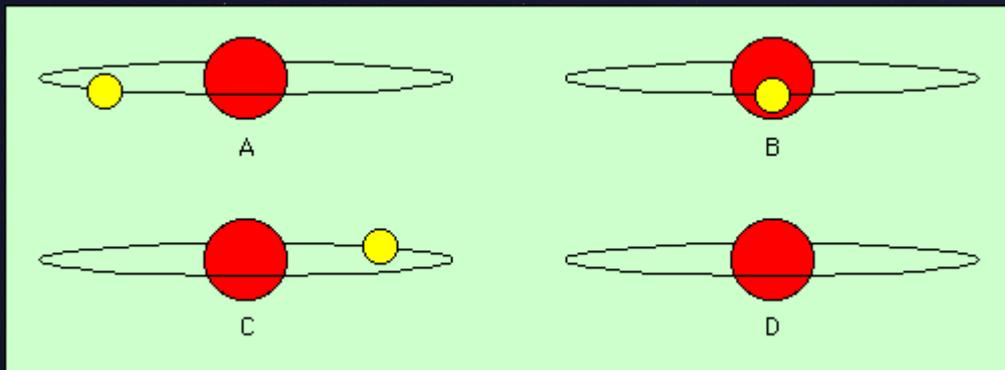
# Mesure des distances – Les céphéïdes

1781-1784 : Premier acte, John Goodricke

Etude de Algol,  
étoile variable



Variation par éclipse

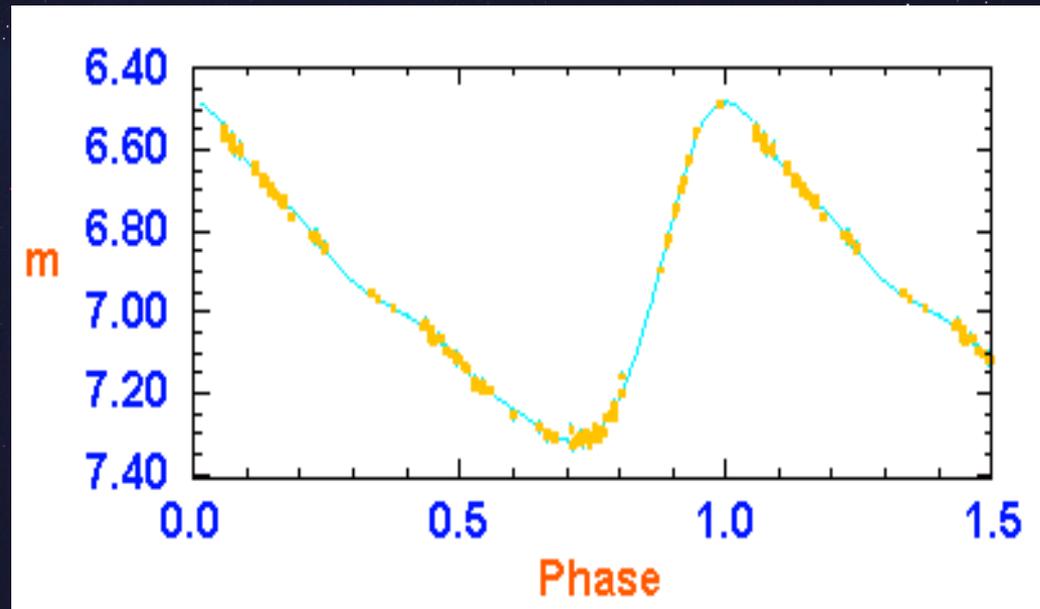


# Mesure des distances – Les céphéïdes

1784 : Deuxième acte, les céphéïdes

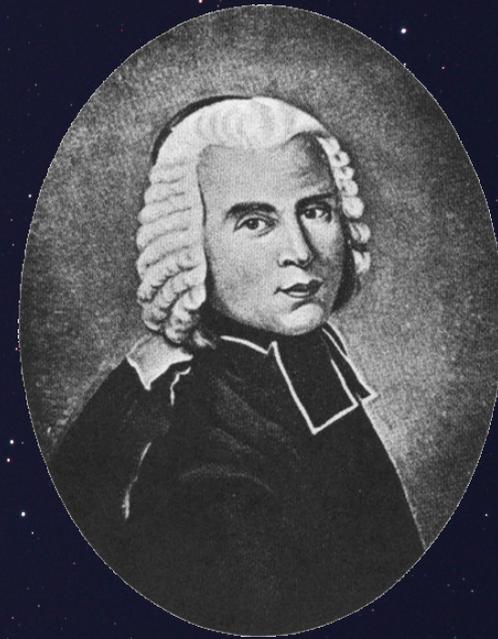
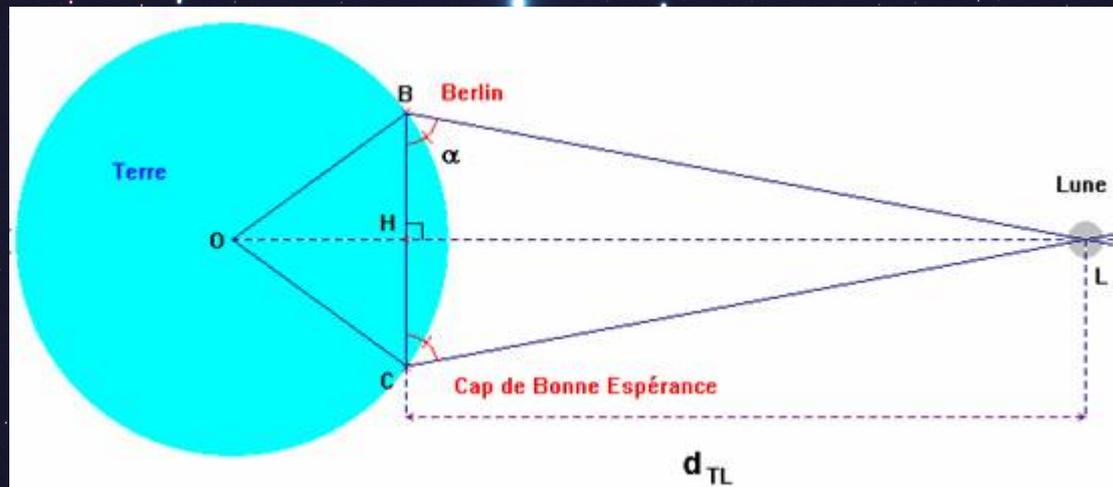
Etude de Eta Aquilae, Delta Céphéïe.

Pas d'éclipse.



# Mesure de la parallaxe

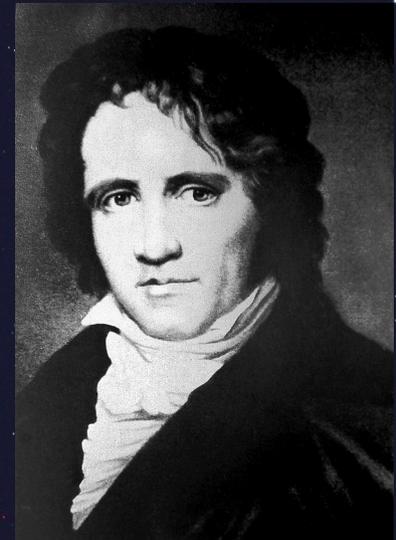
1751-1752 : Mesure de la parallaxe de la Lune par La Caille (au Cap) et Lalande (à Berlin).



Méthode valable sur quelques centaines d'AL

# Mesure de la parallaxe

1838 : Mesure de 61 Cygni par Bessel

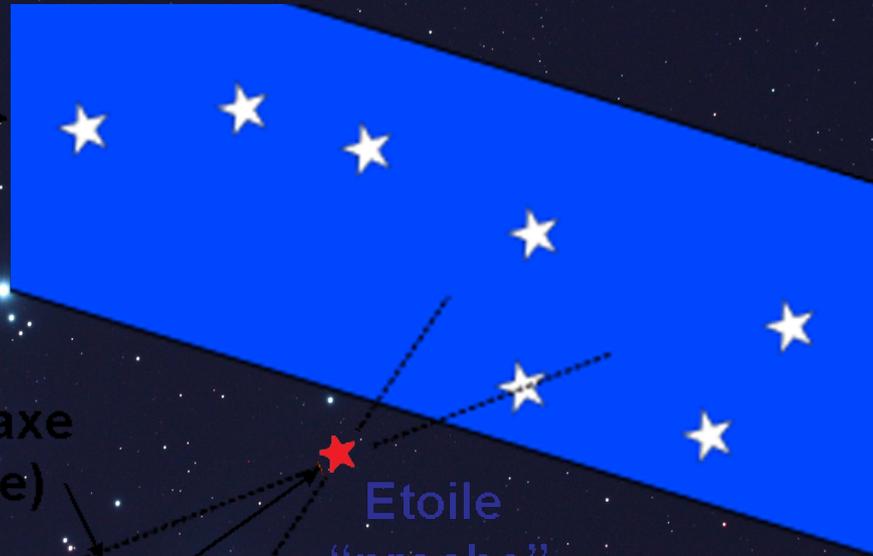


# Bessel : distance de Cygnus61

- Mesure de la position de l'étoile à 6 mois d'intervalle.
- Mesure de l'angle de déplacement sur le fond du ciel ou parallaxe =  $1/10\ 000^\circ$ 
  - $a$ =angle mesuré en radian (0,31")
  - $d$  diamètre de l'orbite terrestre (1 UA = 300 Mkm)
  - $D$  la distance Terre – étoile
  - On a  $\text{tg } a = d/D$ ,  $a$  est très petit  $\Rightarrow a=d/D \Rightarrow D=d/a$   
 $D \sim 10,5 \text{ AL}$

# Bessel : distance de Cygnus61

Etoiles lointaines  
fixes pour l'observateur



Observation en décembre



Parallaxe  
(angle)

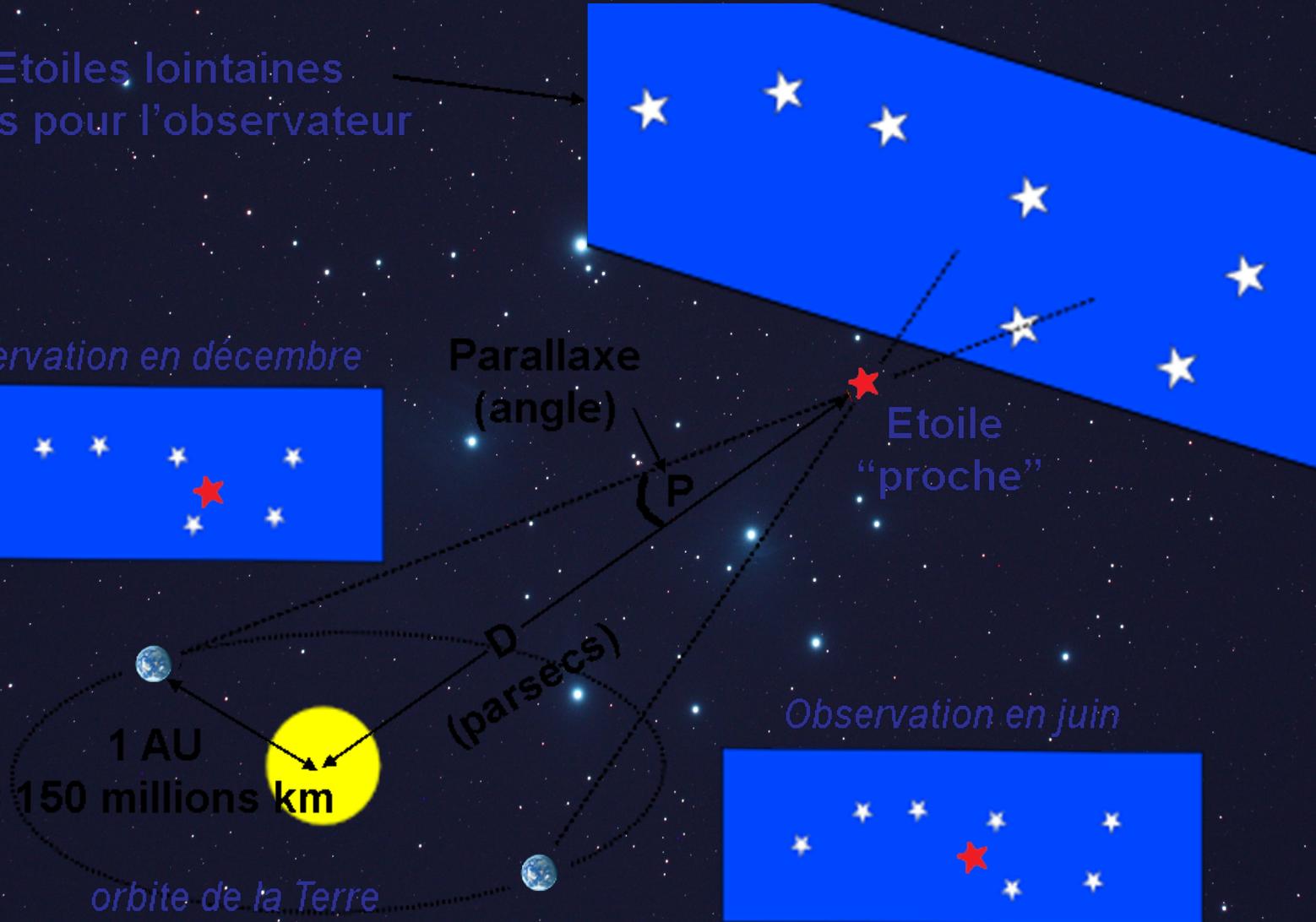
Etoile  
"proche"

1 AU  
= 150 millions km

orbite de la Terre

D  
(parsecs)

Observation en juin



# Mesure des distances – Les céphéïdes

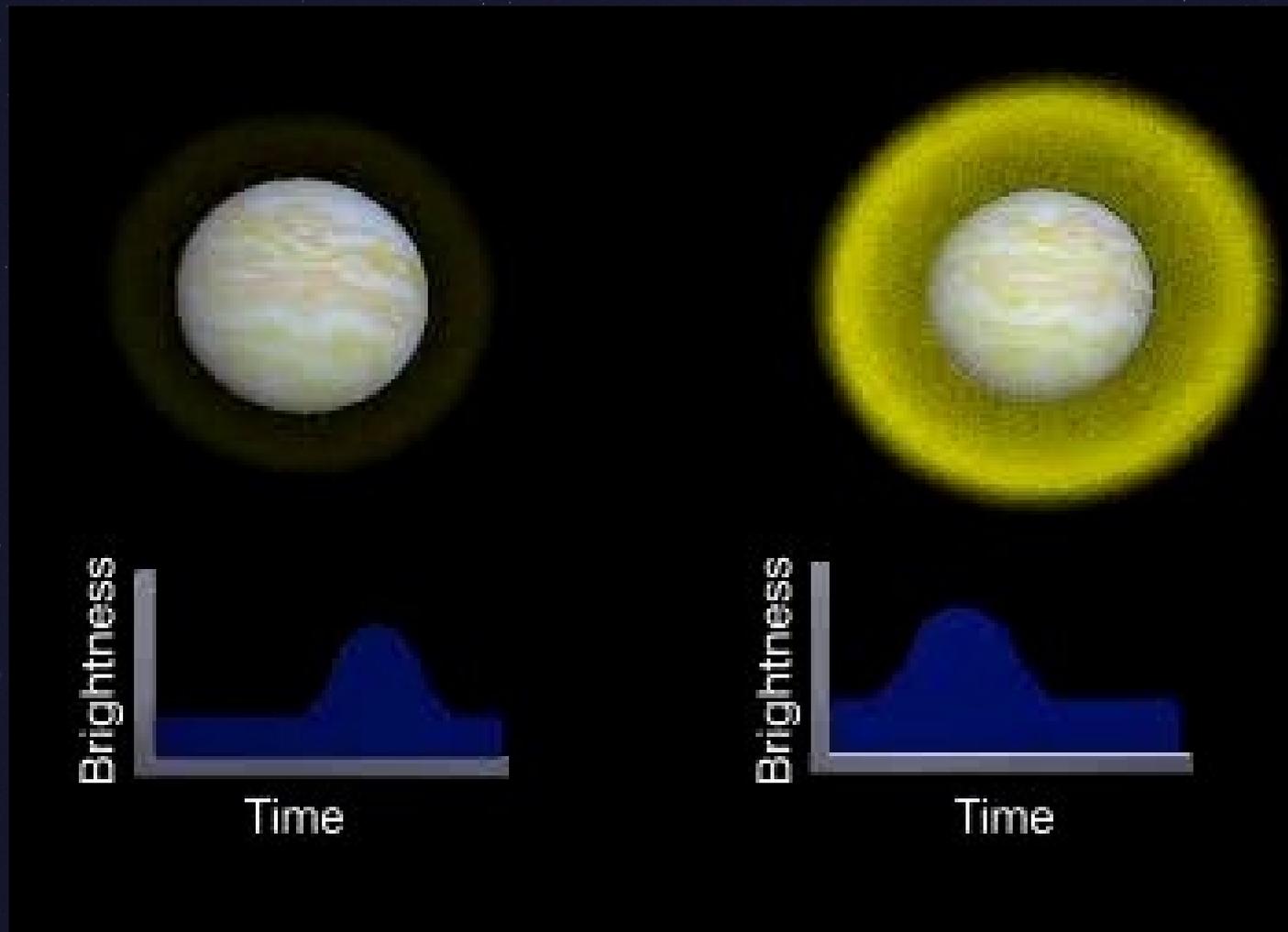
1839 : Troisième acte, la  
photographie.

Premier daguerréotype de la lune par  
John Drapper aux USA en 1840.

Objectivité des observations



# RETOUR VERS LES CEPHEIDES



# Mesure des distances – Les céphéïdes

Henrietta LEAVITT étudie les céphéïdes (1915) du petit nuage de Magellan

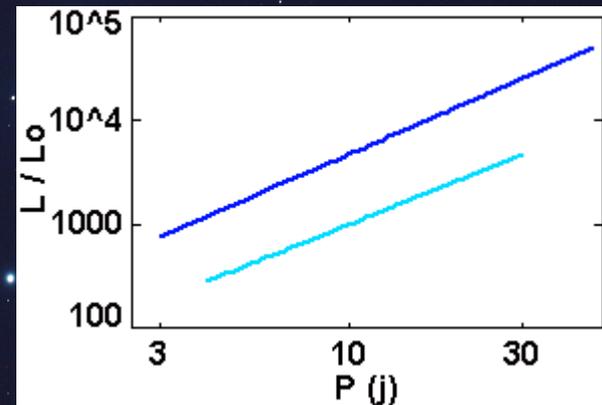
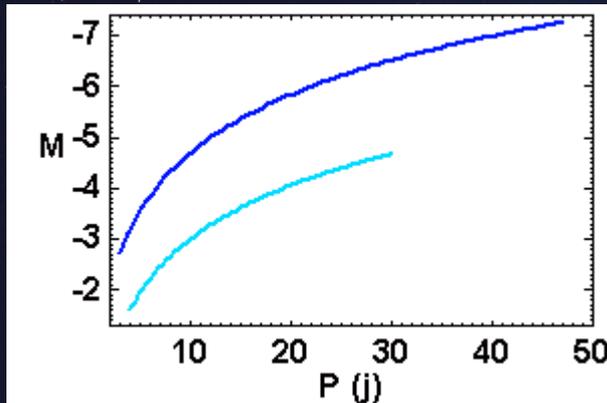


# Mesure des distances – Les céphéïdes

1912

Elle établit une relation entre  
périodicité et luminosité

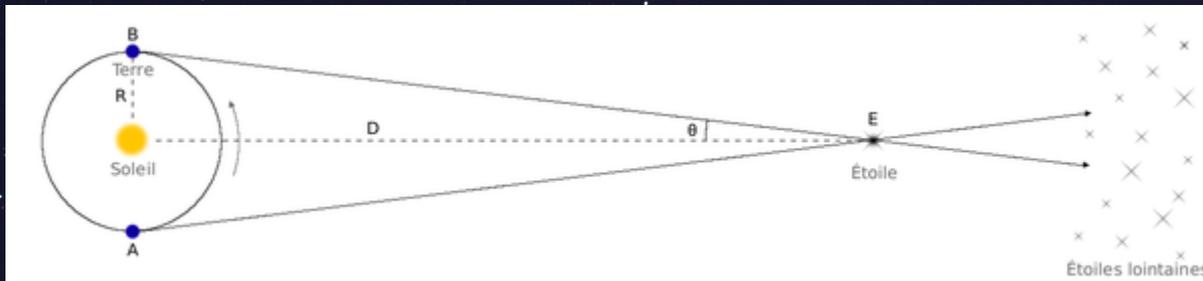
$$L = c * P$$



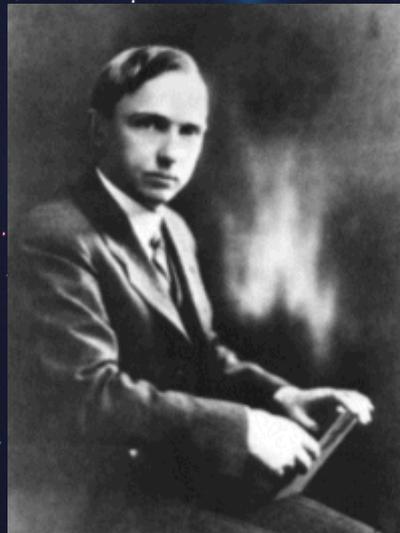
# Mesure des distances – Les céphéïdes

## Quatrième étape : La conclusion

1913 Mesure de la parallaxe d'une céphéïde par Shapley et Hertzsprung. Il détermine le coef  $c$ .



Valide jusqu'à 100 millions d'AL

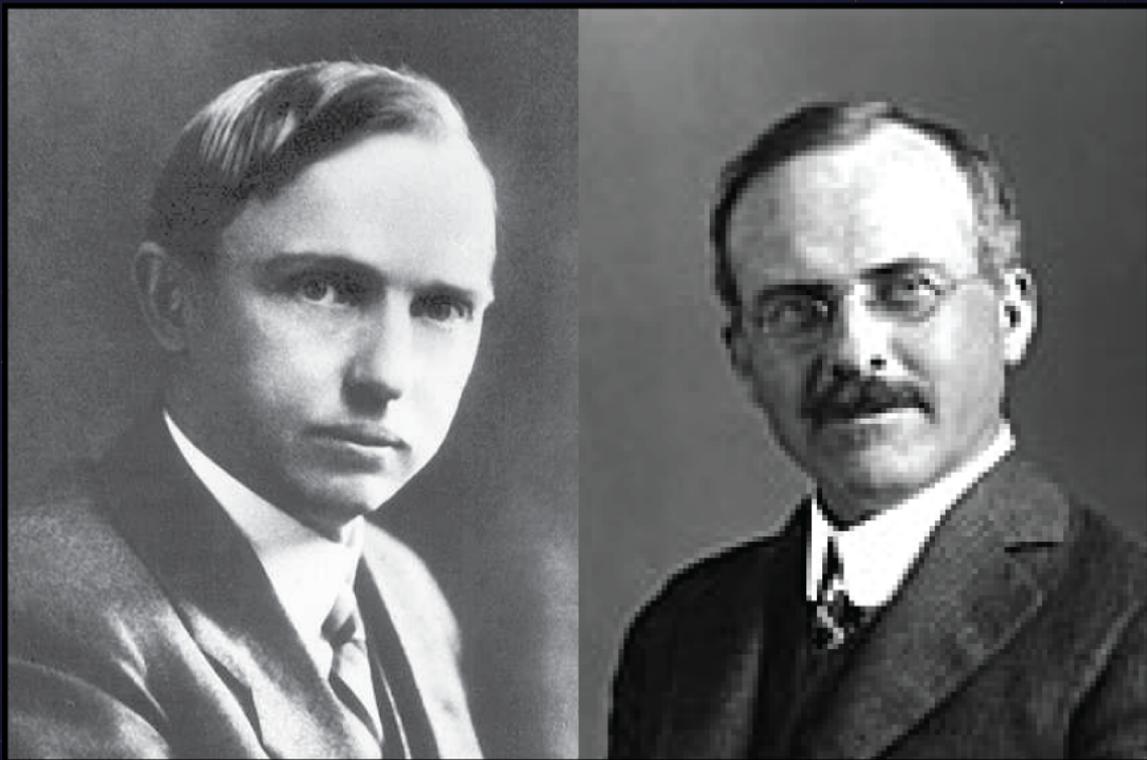


# Le Grand Débat

Dans les années 1920 :

Shapley affirme que la voie Lactée est le seul objet de l'univers

Curtis soutient le contraire



# Mesure des distances – Les céphéïdes



1923-1924 : Edwin Hubble à partir de céphéïdes détectées dans M31 (galaxie d'Andromède), mesure sa distance, 900 000 AL. M31 est extra-galactique, c'est une galaxie.  
Il analyse 46 "galaxies" proches

Hubble adresse une lettre à Shapley avec ses résultats.  
Celui-ci dira : « Voici la lettre qui a détruit mon univers. »

1950, on découvre que les céphéïdes proches et lointaines ne brillent pas de la même façon (population I et II). Il faut doubler les distances pour les lointaines.

# Edwin Hubble est chanceux !



1912-1917 Vesto Slipher analyse les spectres de 15 "nébuleuses" proches.

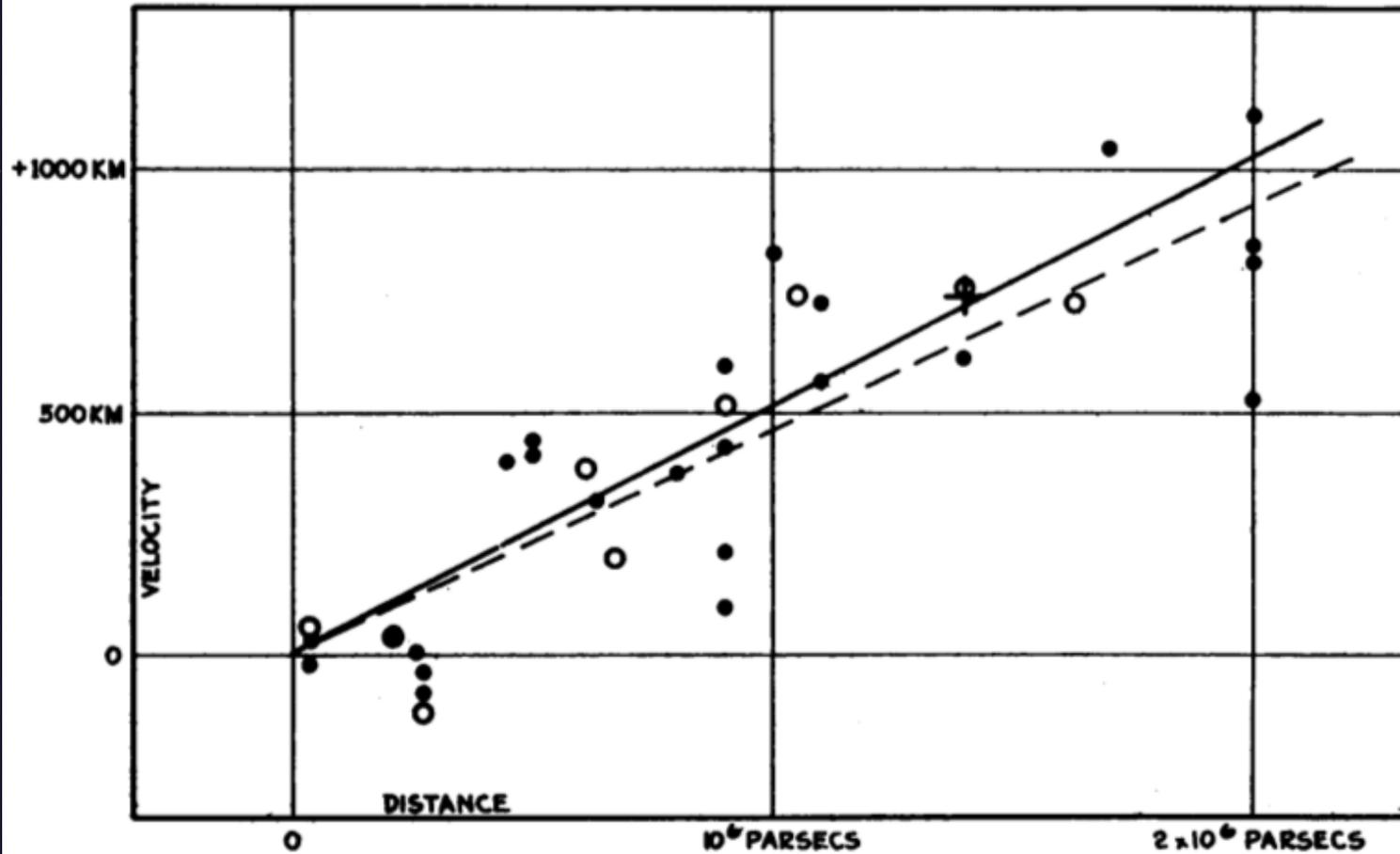
11 s'éloignent de nous

4 se rapprochent dont Andromède à 300Kms/s

Il interprète le décalage comme une vitesse. Correct !

Echantillon insuffisant = on oublie ses recherches !

# La loi de Hubble



# SN Ia : nouvelle chandelle cosmique

Prendre un couple, naine blanche – géante rouge .

Attendre que la naine blanche atteigne une masse  $> 1,38 M_{\text{Sol}}$ .

Explosion thermonucléaire en supernovæ

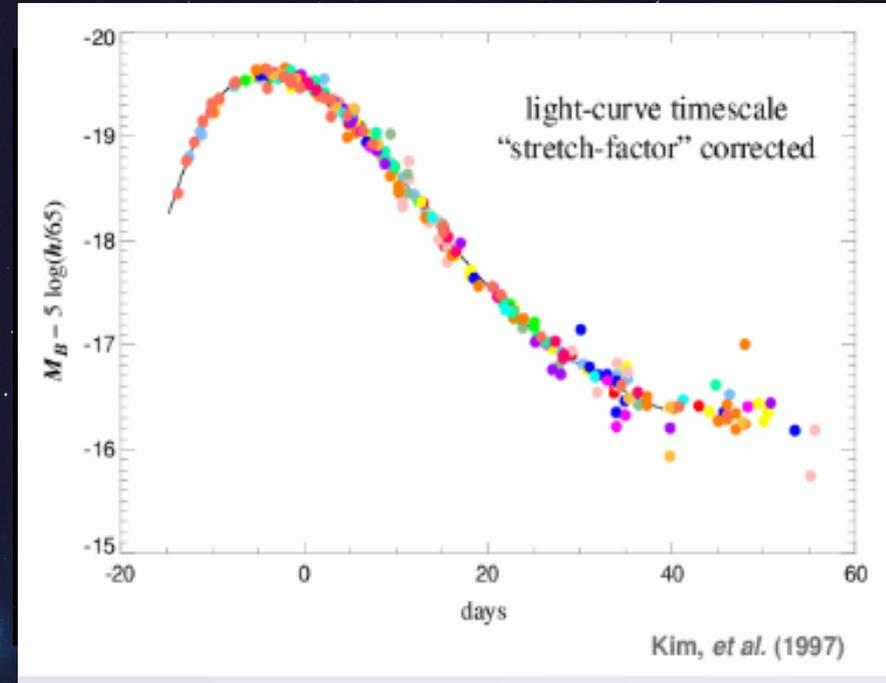
Calculer la magnitude absolu de la SN Ia  
 $\sim -19.4$  ( $10^{10}$  Soleil)

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

$$D = 10^{\frac{m - M + 5}{5}}$$

La courbe de lumière est identique pour toute les SN Ia => étalon standard

On sait calculer D.



Un os de taille : On n'a jamais observé le compagnon de la SN IA !

# Une autre méthode !

## Tully-Fisher : 1977

- Relation entre vitesse de rotation d'une galaxie et sa magnitude absolue.

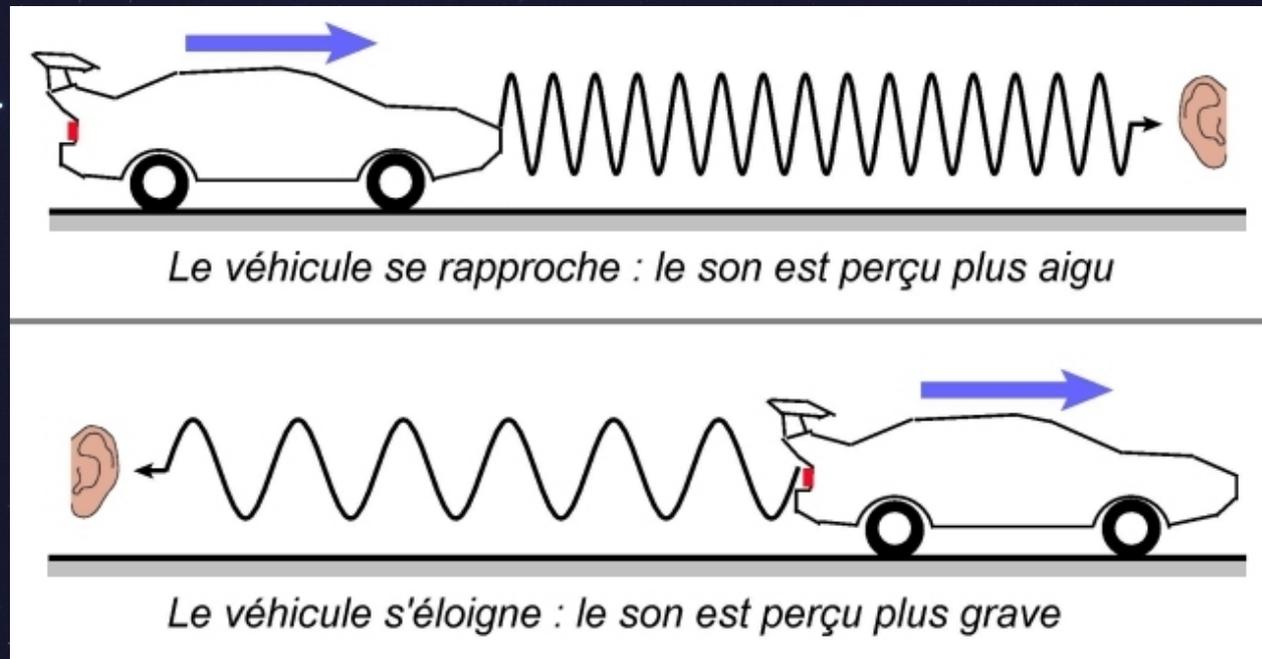
$$M = a * \log(V_m) + b$$

- Mesure de  $V \Rightarrow M \Rightarrow$  Distance

$$D = 10^{\frac{m - M + 5}{5}}$$

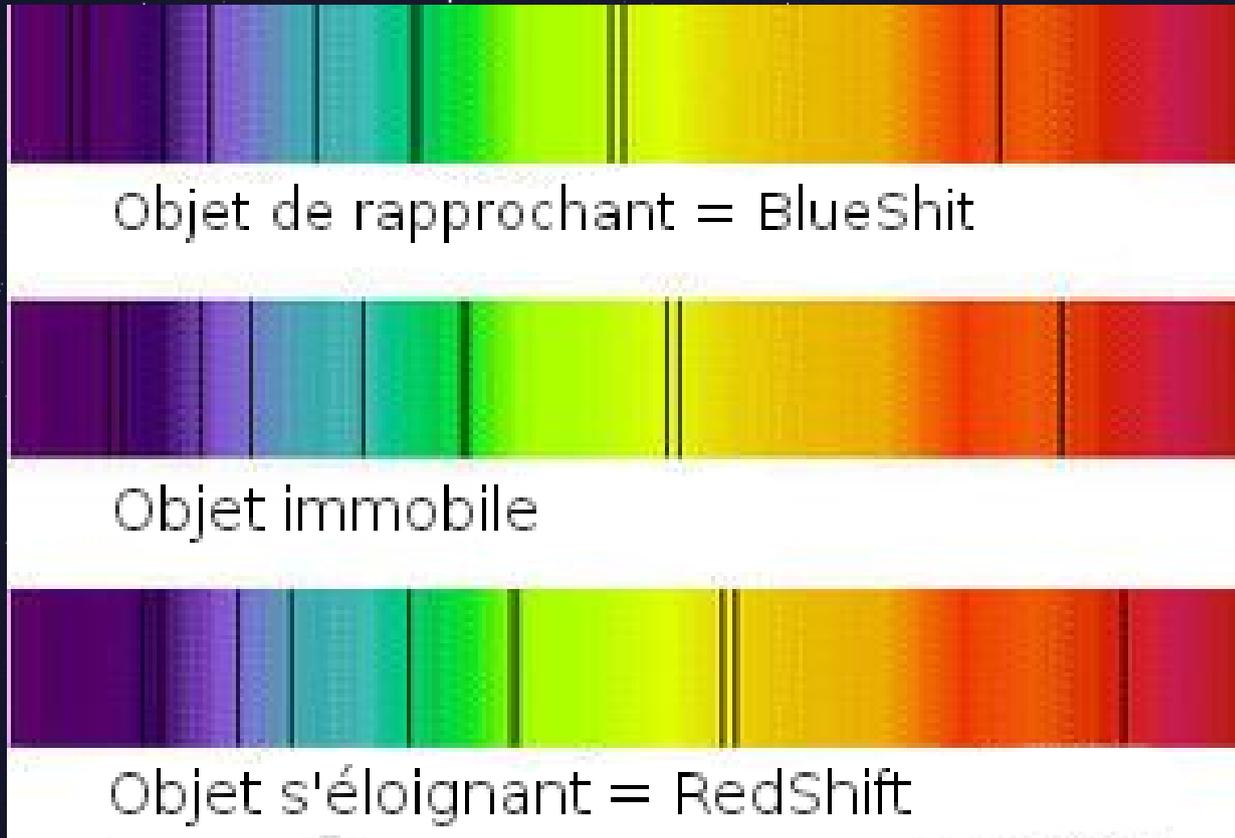
# Vitesse radiale et décalage cosmologique

## Spectroscopie d'un objet en déplacement.



# Vitesse radiale et décalage cosmologique

Spectroscopie d'un objet en "déplacement".



$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_0}{\lambda_0}$$

$$V_f = c * \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1}$$

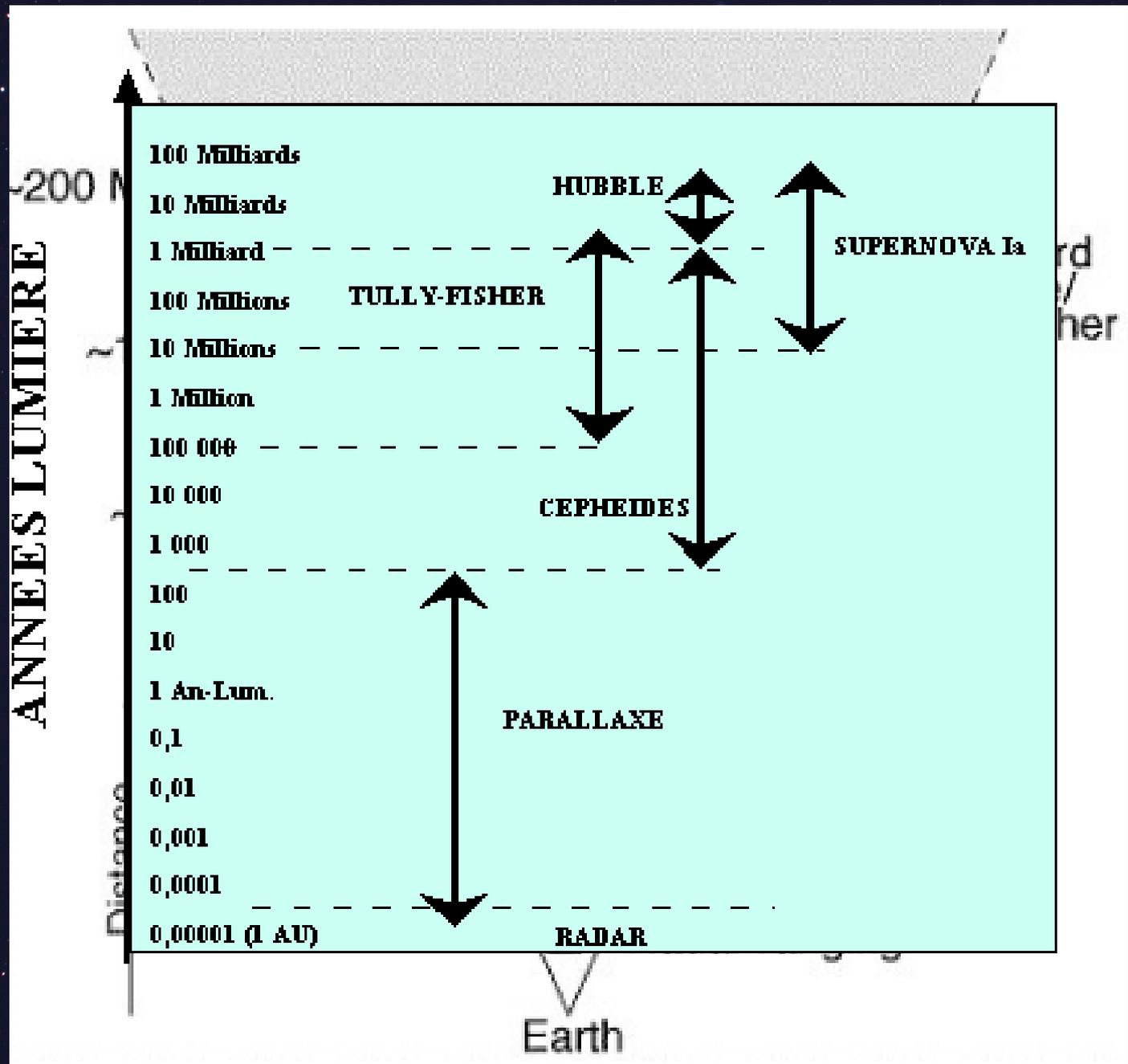
$$D = V_f * H$$

Fraction de l'âge de l'univers  $= (t_{\text{univers}} - t_{\text{lookback}}) / t_{\text{univers}}$   
 $(\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7, H_0 = 70 \text{ km.s}^{-1}\text{Mpc}^{-1})$  où  $t_{\text{univers}} = 13.5 \text{ Gyr}$

Z	Universe age		Lookback time
	Gyr	%	Gyr
0.2	11.1	81.9 %	2.4
0.5	8.5	62.6 %	5.0
0.7	7.2	53.2 %	6.3
0.8	6.7	49.3 %	6.8
1	5.8	42.7 %	7.7
2	3.2	24.0 %	10.3
4	1.5	11.3 %	12.0
5	1.2	8.6 %	12.3
6.5	0.8	6.1 %	12.7
10	0.5	3.5 %	13.0
20	0.2	1.3 %	13.3
30	0.1	0.7 %	13.4

En 2015 avec le VLT, détection d'une galaxie à redshift 8.6 ! Soit 600 Ma après le BB.

# En résumé



**Merci de votre attention**