



Mesure des distances dans l'univers

Ressources bibliographiques

http://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/index.html (Observatoire de Paris-Meudon)

- http://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_mesure-distances/introduction-mesure-distances.html
- http://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_position/introduction-position.html
- http://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_distance/introduction-distance.html

<http://astronomia.fr> (Observatoire de Marseille)

- http://astronomia.fr/1ere_partie/distances.php

<http://clea-astro.eu/lunap>

<http://clea-astro.eu/lunap/TerreSoleil>

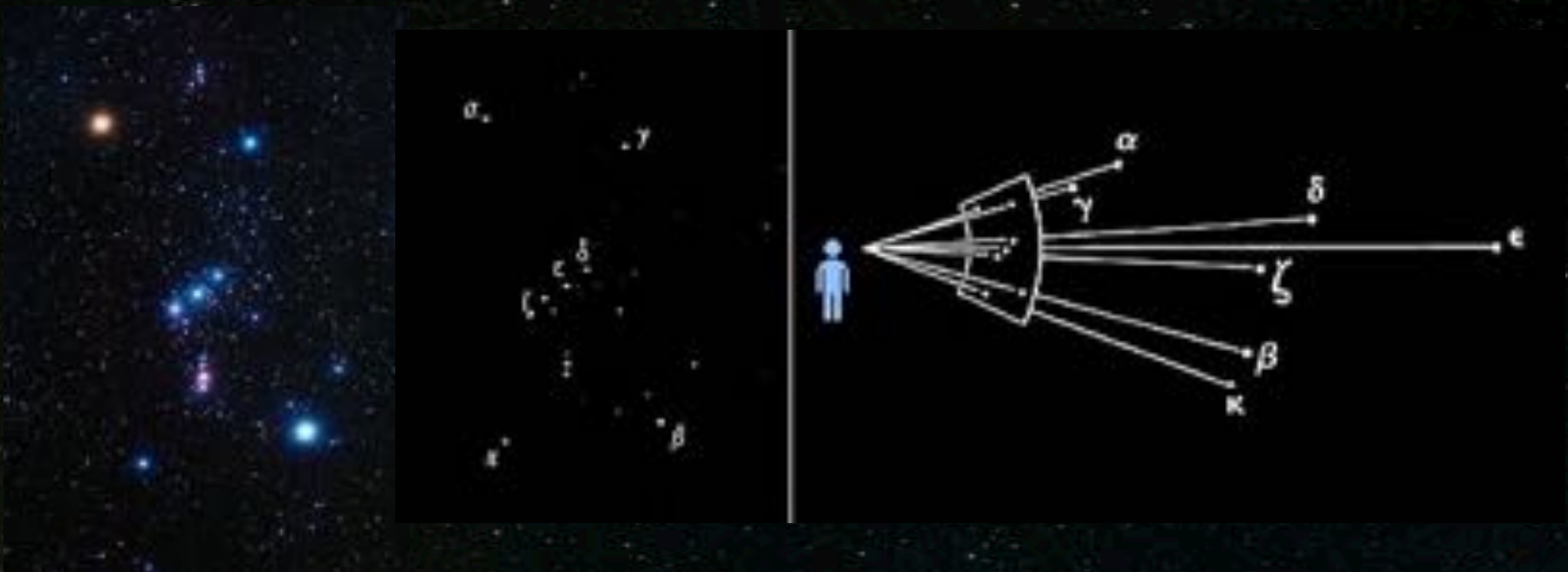
<https://cral.univ-lyon1.fr/labo/fc/cdroms/> (Observatoire de Lyon)

<http://astronomie-smartsmur.over-blog.com/>

- *La Voie lactée vue par la mission spatiale Gaia*, conférence de Carine Babusiaux, IPAG

Introduction

- position des astres dans le ciel :
 - ➔ Plutôt bien maîtrisée aujourd'hui
- la troisième dimension, la distance des objets astronomiques :
 - est moins bien maîtrisée



Introduction

Mesure des distances

- problème se posant pour tous les objets célestes
- pas de solution unique
- plus un objet est loin, plus sa distance est difficile à mesurer.

Méthodes astronomiques de mesure des distances : mesures indirectes

- Méthodes géométriques \Leftrightarrow objets proches
- Méthodes physiques \Leftrightarrow objets plus lointains
- Méthodes cosmologiques \Leftrightarrow objets les plus distants



Partie 1

Méthodes géométriques

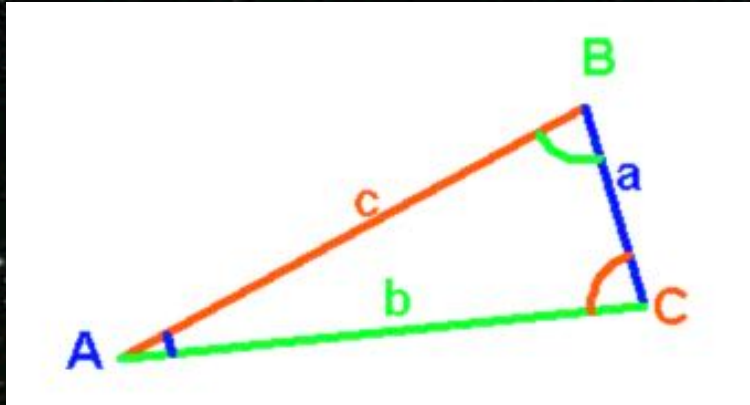
Triangles et triangulation

Premières mesures

Parallaxe

Triangulation

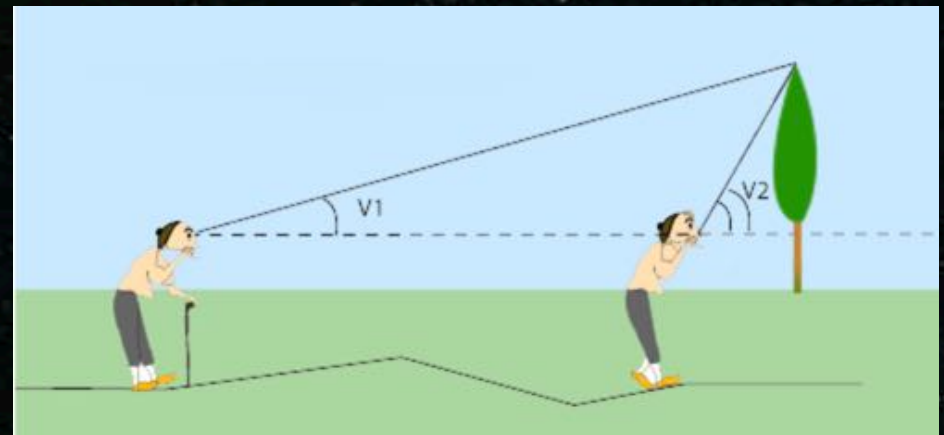
Relations dans un triangle



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

$$A + B + C = 180$$

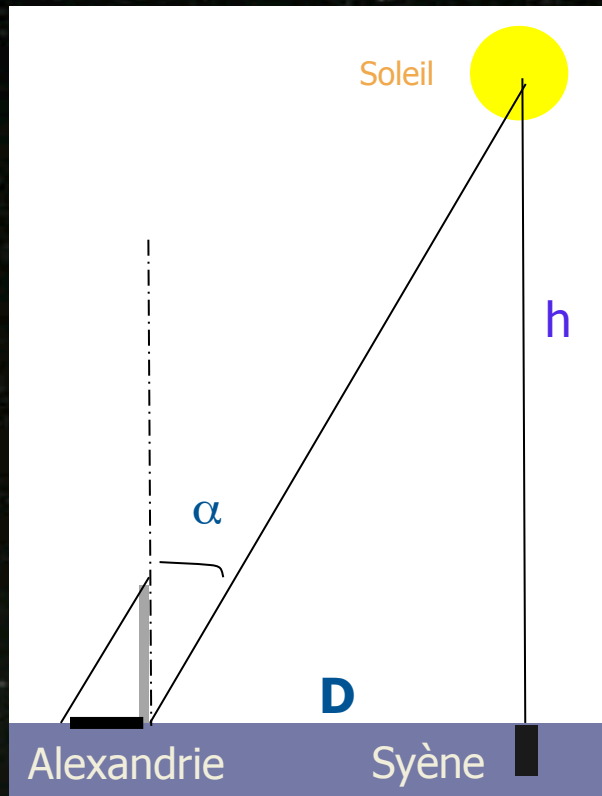
- la mesure de deux angles et d'un côté du triangle permet de calculer les autres côtés.
- La triangulation permet de mesurer des distances... à distance



Tentative de mesure: Distance Terre-Soleil

Anaxagore (-500, -428), Grèce antique

- jour du solstice d'été, en deux endroits différents (même méridien)
- déduction de la distance h avec des approximations géométriques...



$$D = 800 \text{ km}$$

$$\alpha = 7^\circ$$

$$\text{Distance : } h = D / \text{tg } \alpha \Rightarrow h = 6515 \text{ km}$$

$$\Phi = 0.5^\circ$$

$$\text{Diamètre : } d = h \cdot \Phi \text{ (rad)} \Rightarrow d = 56,9 \text{ km}$$

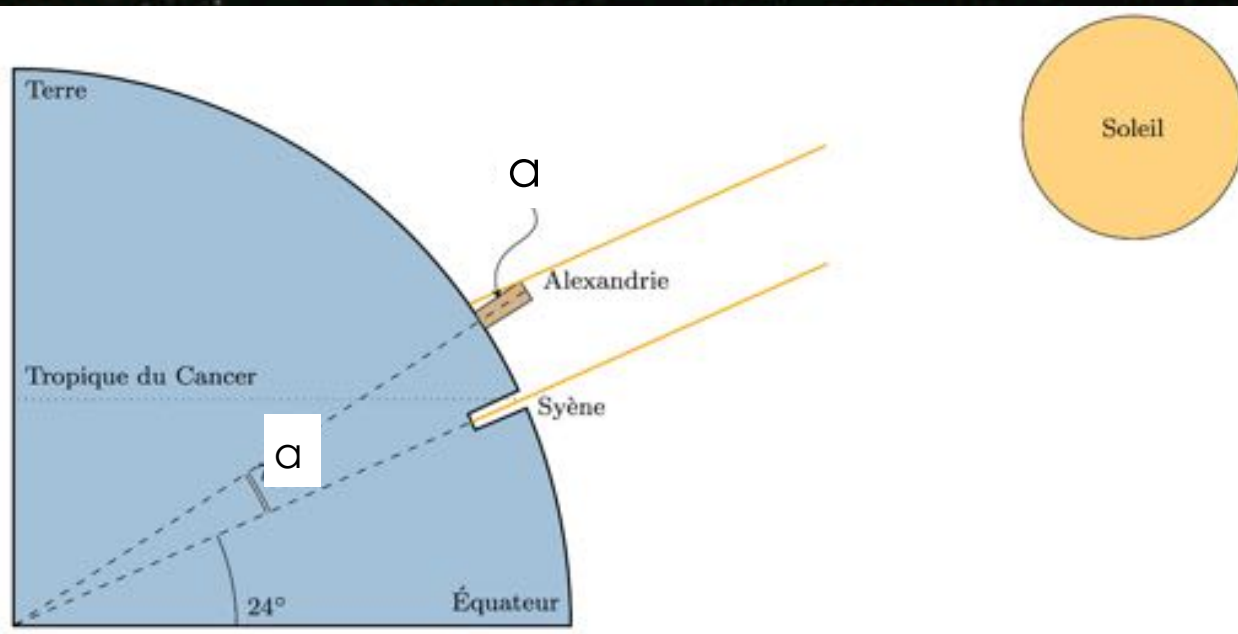
Donc, pour Anaxagore
Soleil : petite boule de feu d'une
soixantaine de km de diamètre flottant
dans l'air à 6 500 km d'altitude.

Erreur d'Anaxagore :
la terre n'est pas plate !

Rayon de la terre

Eratosthène (276-194 avant JC)

- reprend les mesures et calculs d'Anaxagore
- modification des hypothèses !
 - Soleil très éloigné de la terre : rayons arrivant //
 - La terre est une sphère
- Plus possible de calculer distance terre soleil, mais rayon de la terre



$$R = D \cdot \alpha \text{ (rad)}$$

$$R = 6548 \text{ km}$$

Résultat remarquable
pour l'époque

$$\langle R \rangle = 6\,371 \text{ km}$$

Lune : diamètre et distance

Aristarque de Samos (-310, -230), grèce antique

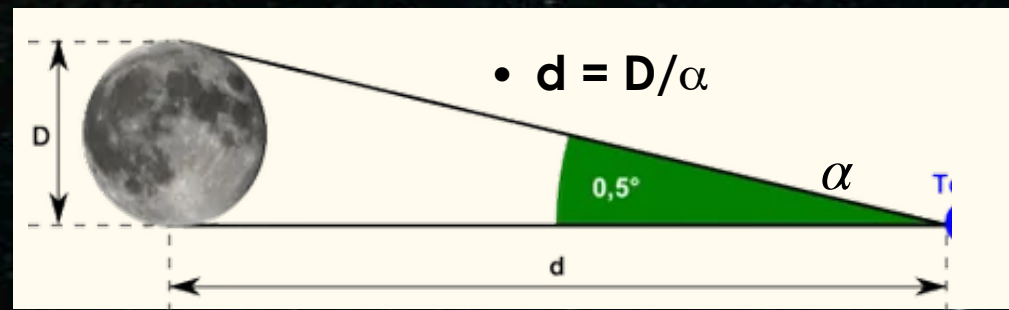
– Diamètre de la lune



- La Lune parcourt une distance égale à son diamètre en une heure environ
- Lors d'une éclipse de Lune, la Lune reste deux heures entièrement éclipsée.

➔ Le diamètre D de la lune est 3 fois plus petit que celui de la terre T (rapport vrai=3,67)

– Distance Terre Lune
Aristarque évalue α à 2°
 $d = 0,33 D_T / \alpha \Rightarrow d = 19R_T$

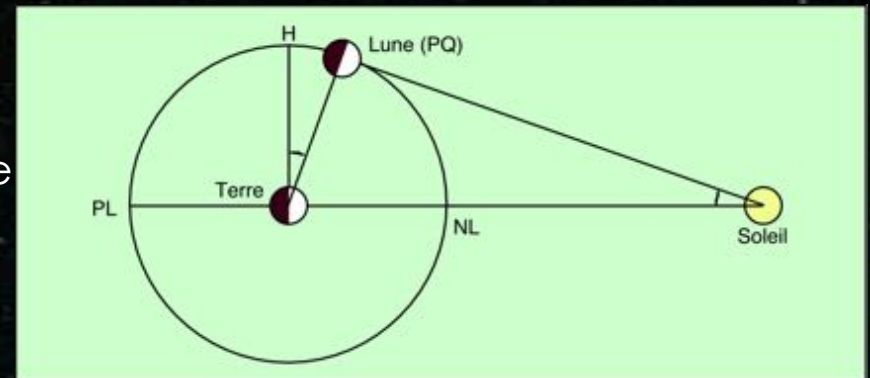
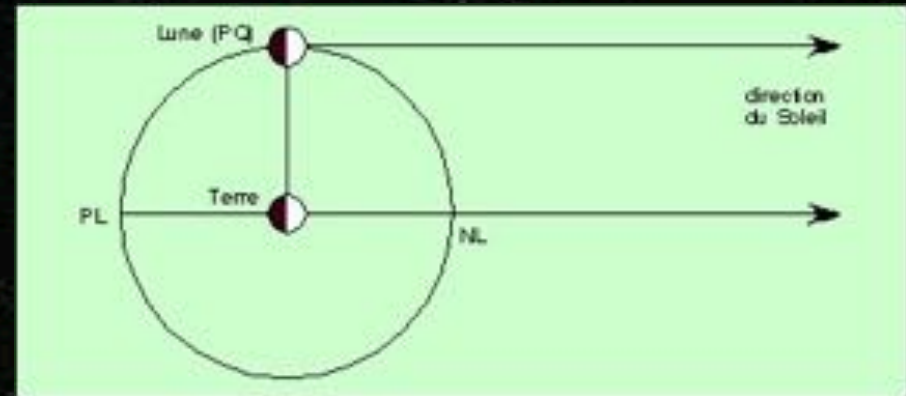


avec $\langle \alpha \rangle = 0,518$, la valeur correcte est de $60 R_T$

Distance relative Terre-Soleil

Aristarque de Samos (-310, -230), Grèce antique

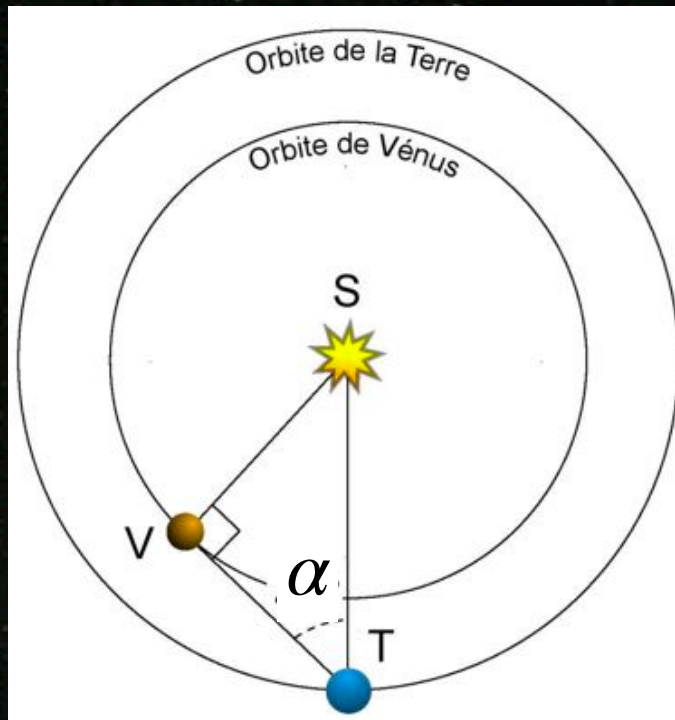
- PQ : moitié de la lune éclairée
- Soleil à l'infini :
 - $T(PL) - T(PQ) = T(PQ) - T(NL)$
- Soleil à distance finie :
 - $T(PL) - T(PQ) \neq T(PQ) - T(NL)$
 - $\Delta T: 6h \Rightarrow \text{angle } 3^\circ$
soleil 20 fois plus loin que la lune
- En fait, $\Delta T=35mn$
 - soleil 389 fois plus loin que la lune



Planètes inférieures

Distance Vénus-Soleil

- Mesure relative par rapport à la distance Terre-Soleil
- Vénus visible parfois le matin, parfois le soir
- **Angle α à la plus grande élongation** : plus grand éloignement angulaire au Soleil
- droite joignant la Terre à Vénus tangente à l'orbite de Vénus.



$$SV = \sin \alpha ST$$

$$\alpha = 46^\circ \text{ (Copernic)}$$

$$SV = 0,7 ST$$

Vénus est à 0,7 UA du soleil

Plus difficile de mesurer des distances absolues

Planètes supérieures

Opposition et Quadrature

– On mesure le temps entre l'opposition et la quadrature : $\Delta t = t - t'$

–

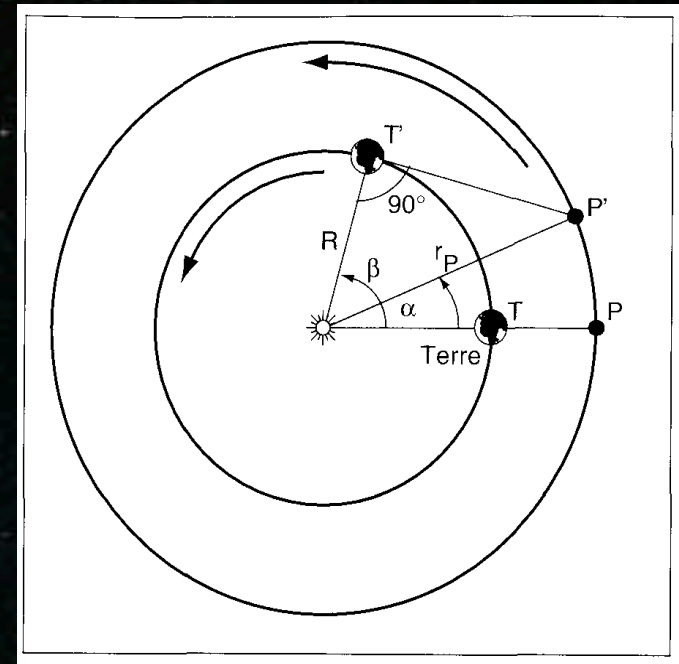
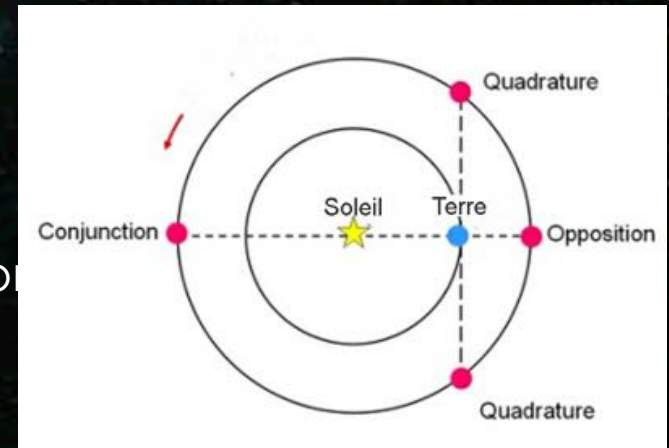
On connaît T_t et T_p , périodes sidérales de la Terre et de la planète

– Évaluation des angles α et β

- $\Delta t / T_p = \alpha / 360$

- $\Delta t / T_t = \beta / 360$

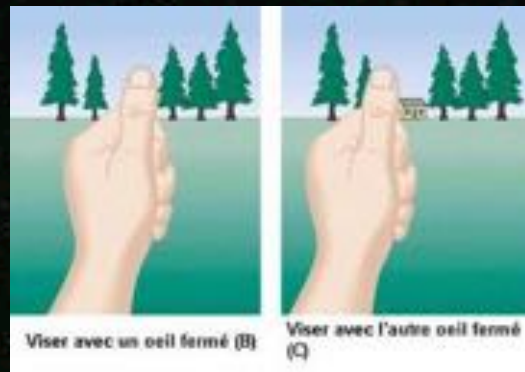
– $\cos(\beta - \alpha) = R / r_p$



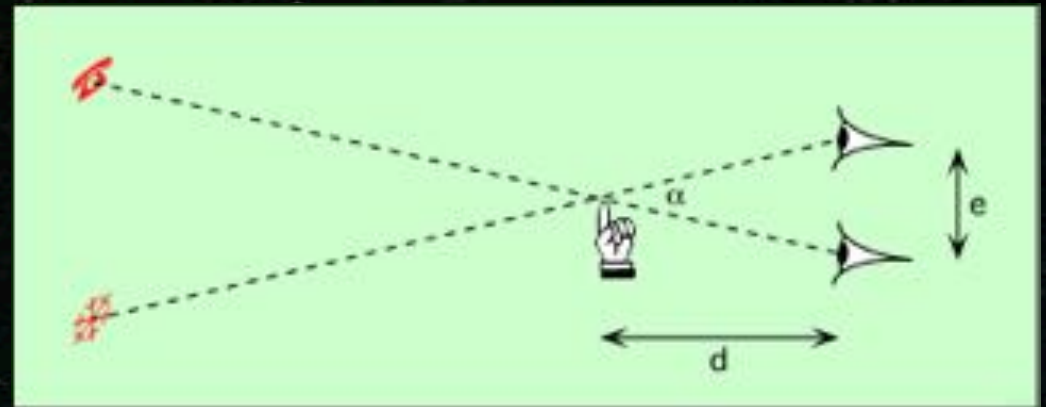
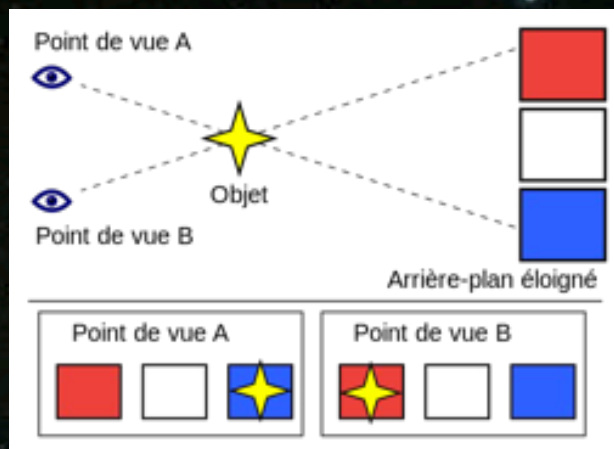
Méthode de la parallaxe : Principe

Avec nos yeux

- La distance entre les deux yeux produit un effet de perspective, que l'on nomme parallaxe.



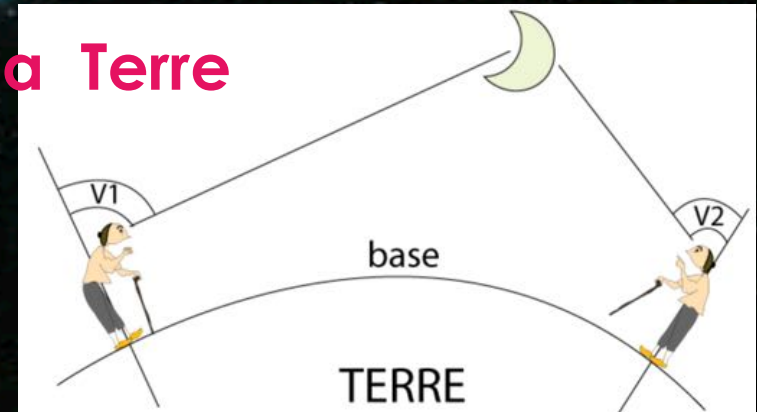
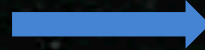
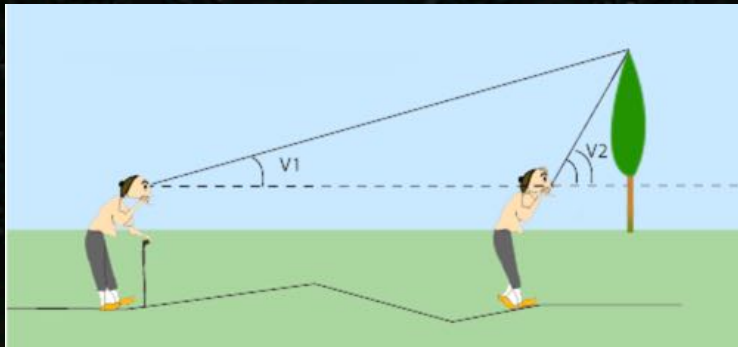
- Thalès le premier décrit la méthode ; il l'a utilisée pour mesurer de loin la hauteur d'une pyramide.
- Notre cerveau fait ça en permanence !



- Pour mesurer la distance des objets célestes, e doit être grand

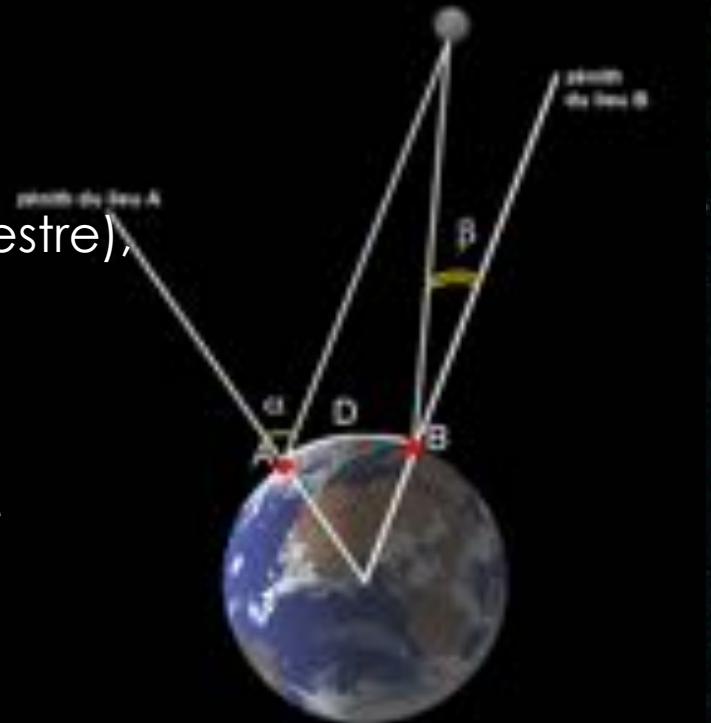
Triangulation et parallaxe terrestre

Distance d'un corps céleste à la Terre



Limitations :

- la plus grande base terrestre : 12000 kilomètres (le diamètre terrestre),
- différence d'angle de visée entre les deux observateurs mesurable
 - jusqu'au XVII^{ème} siècle, la distance de la Lune n'était pas accessible par cette méthode.



Parallaxe diurne : 1ères mesures précises

Parallaxe de Mars, 1672

Picard, Cassini et Richer : position de Mars depuis deux sites (Paris et Cayenne) au moment d'une opposition de Mars

= mesure sa parallaxe

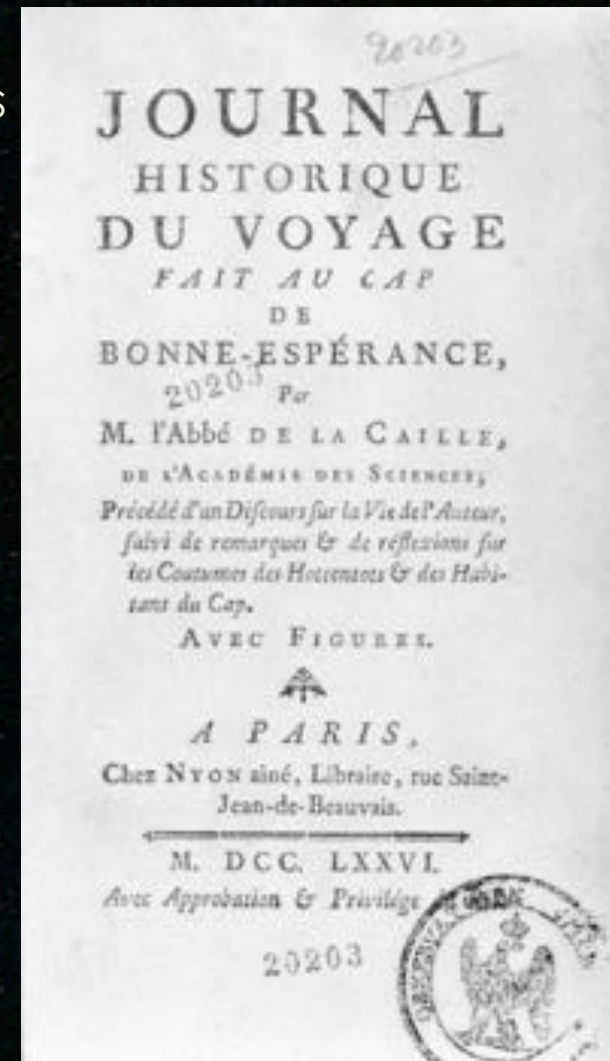
Parallaxe \rightarrow distance terre-mars

+ loi Kepler \rightarrow distance Terre-Soleil

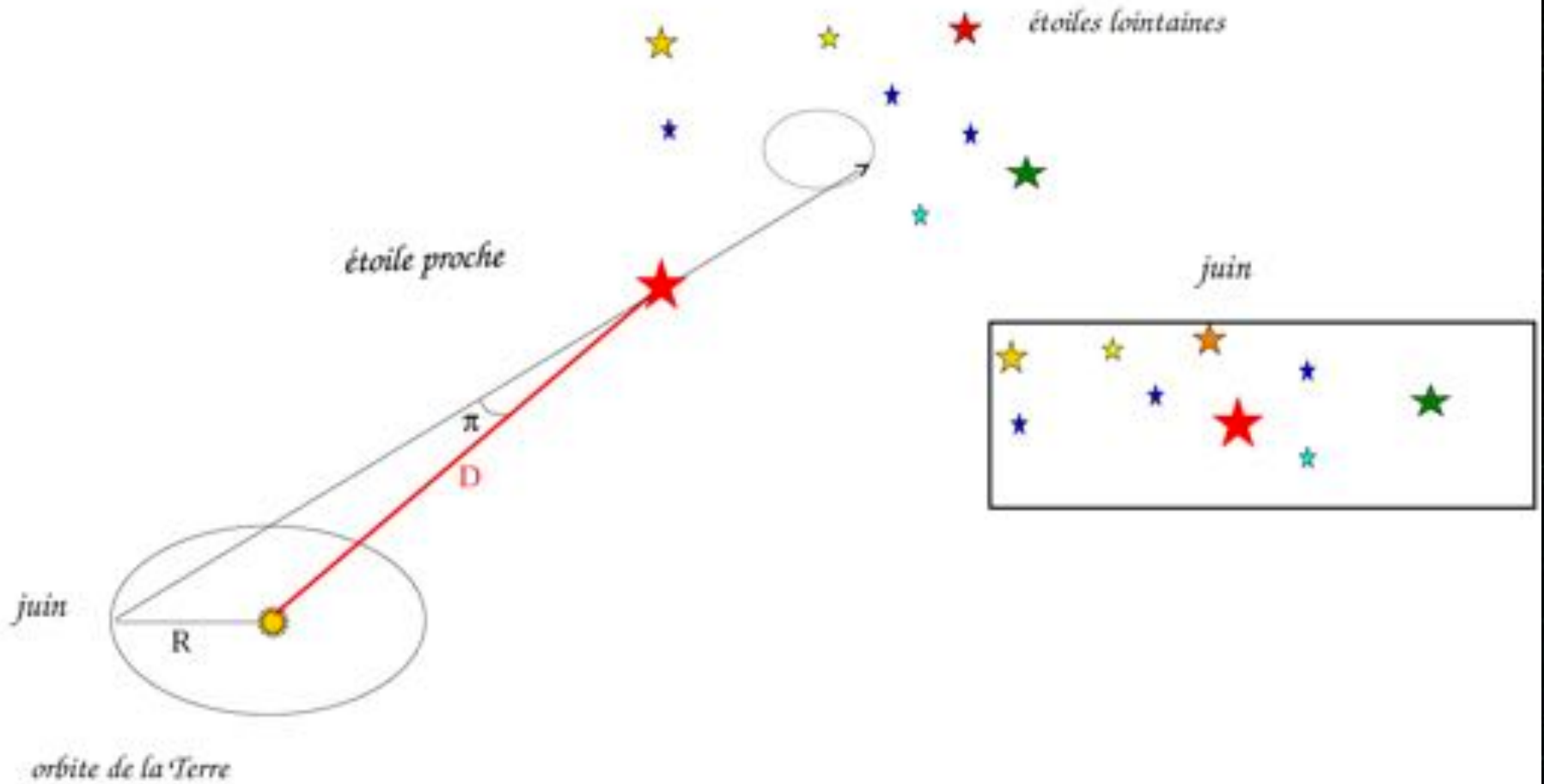
Parallaxe lunaire, 1751

De Lacaille au Cap de Bonne-Espérance, de Lalande à Berlin (même longitude)

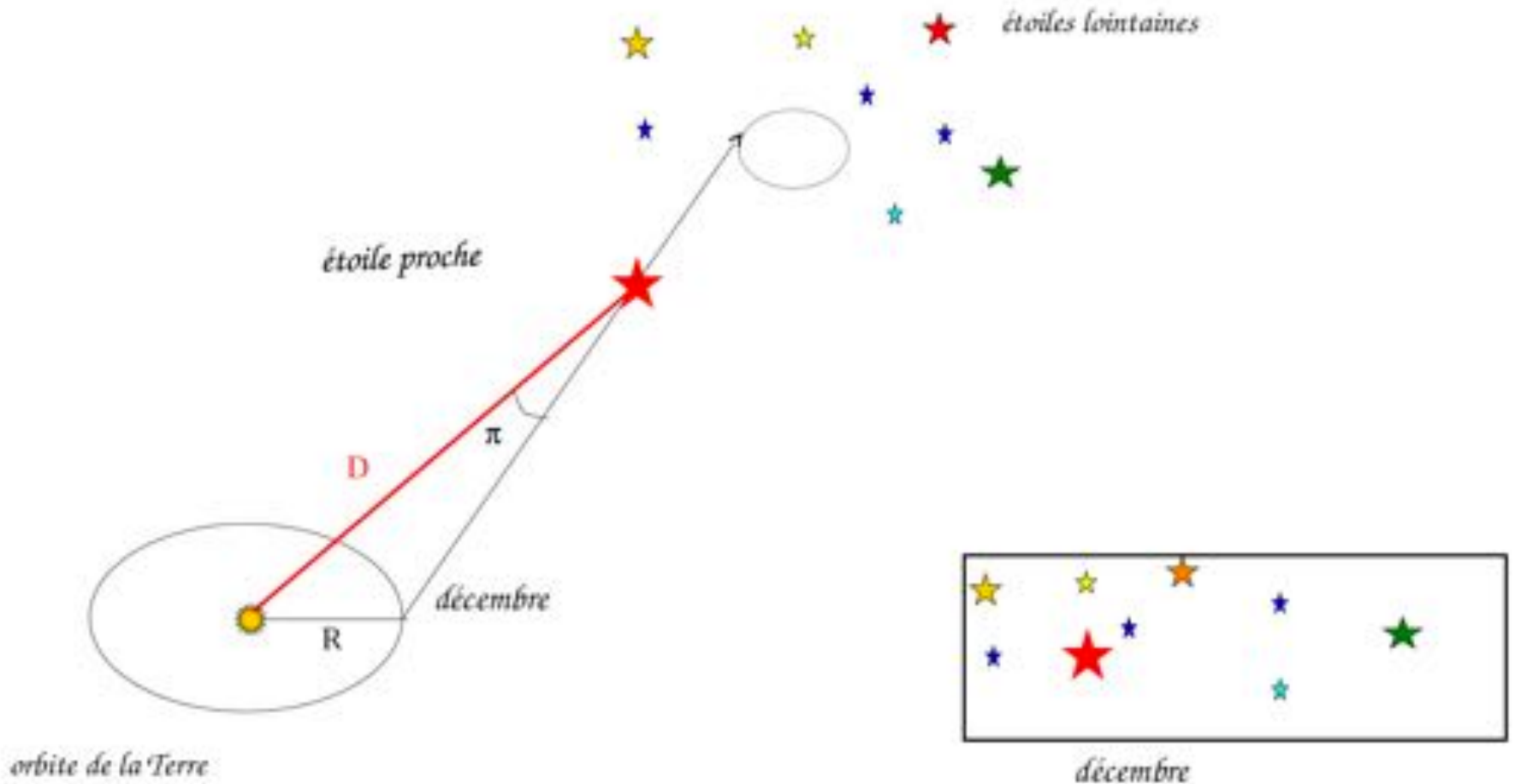
Exploitation des mesures de positions, des observations (en 1754)



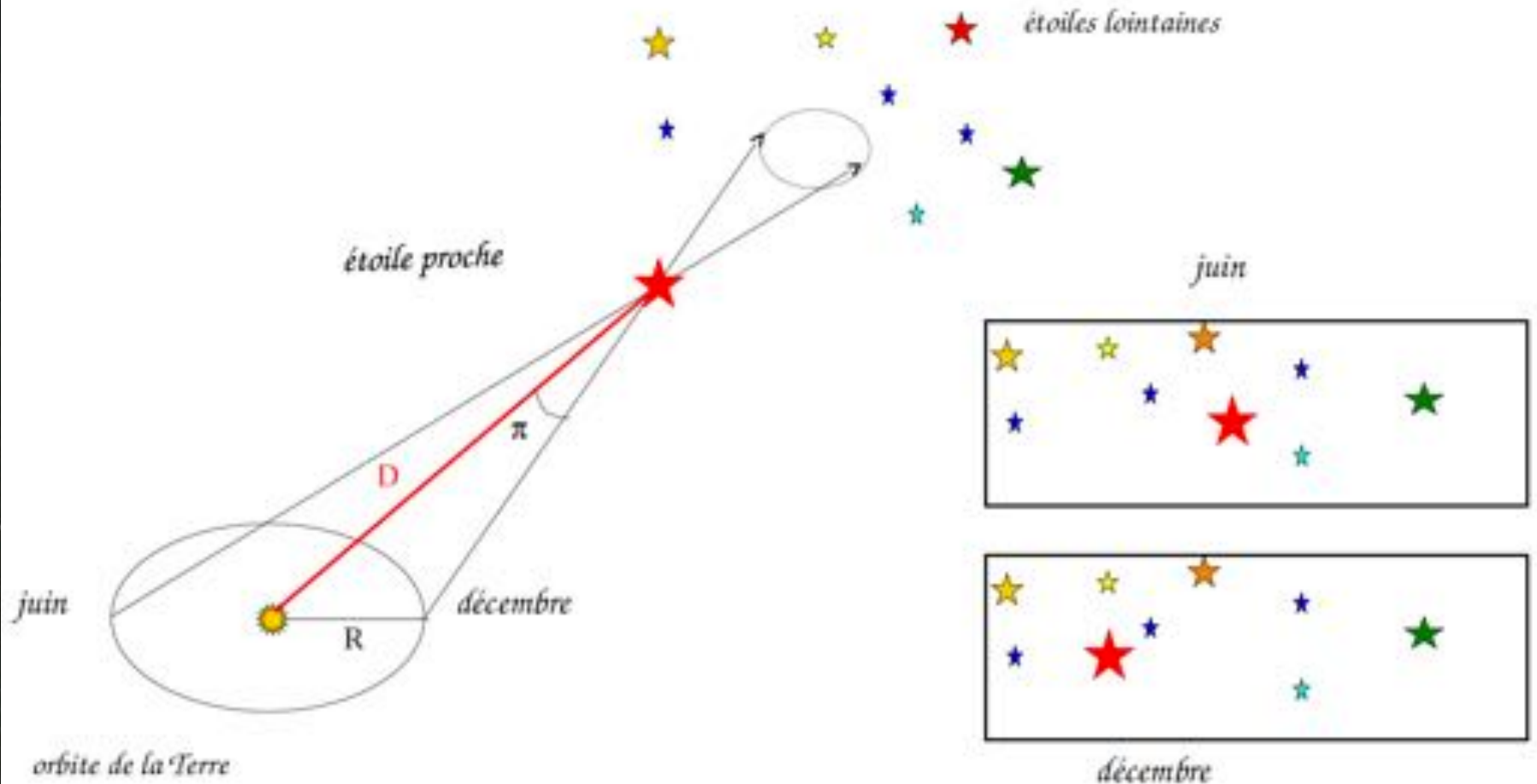
Mesures de distance avec la parallaxe annuelle



Mesures de distance avec la parallaxe annuelle



Mesures de distance avec la parallaxe annuelle



Mesures de parallaxe

Distance des étoiles les plus proches

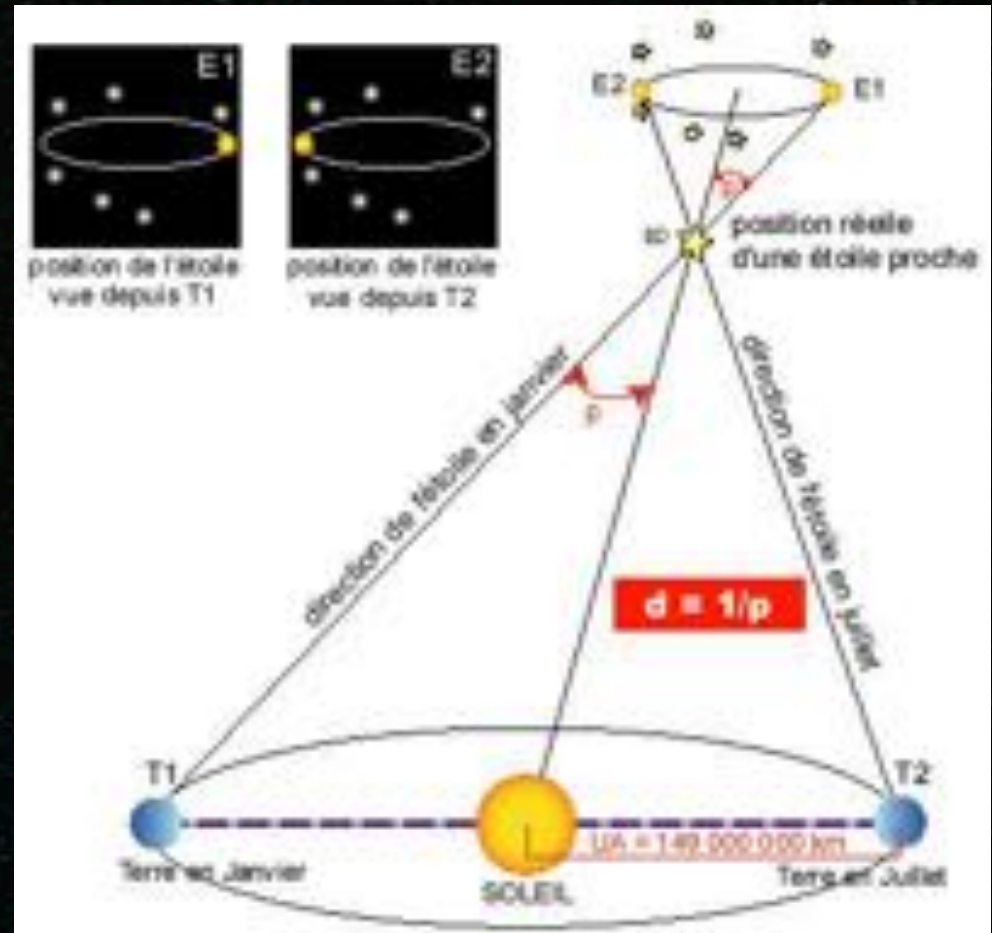
- On nomme parallaxe l'angle sous lequel on voit le rayon de l'orbite terrestre R_T
- On utilise R_T car c'est l'unité astronomique.

$$\tan p = R/D$$

$$d = 1/p \quad (p \text{ très petit}, R = 1 \text{ u.a.})$$

p : parallaxe en seconde d'arc

d : distance en parsecs (pc)

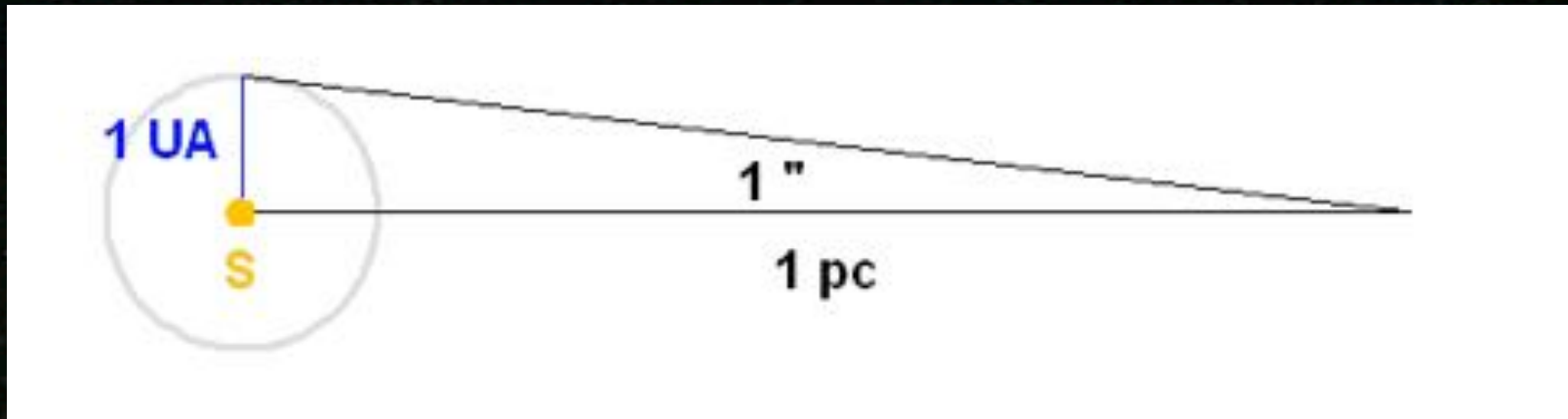


Définition du parsec

Nouvelle unité de distance

– parsec : distance correspondant à une parallaxe d'une seconde

–



– 1 parsec = distance à laquelle on voit l'Unité Astronomique sous un angle d'une seconde

– 1 pc = 3,26 années-lumière = à peu près $3 \cdot 10^{13}$ km

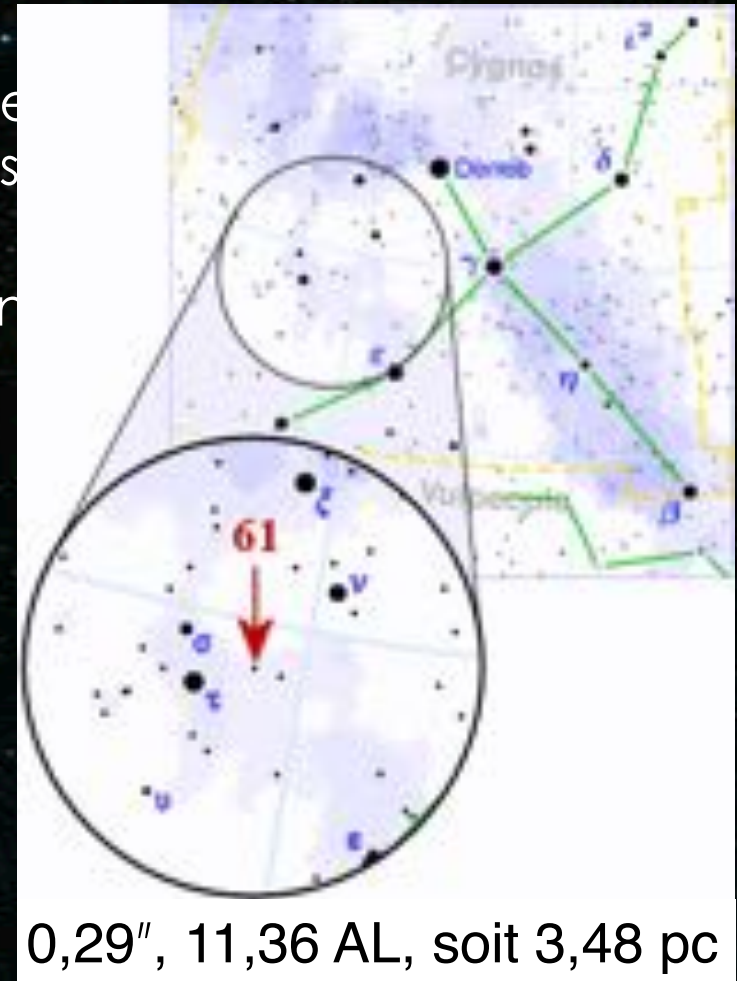
– $p = 1$ mas à $D = 1000$ pc

– NB : Unité Astronomique mesurée lors du transit de Venus

Mesures des parallaxes depuis le sol

Difficulté de la mesure

- Parallaxes faibles
- Nécessité d'avoir de bons instruments et de réaliser des mesures précises
- Bessel : première mesure en 1838, de la parallaxe de l'étoile 61 Cygni
 - Estimation $d = 10,5 \text{ AL}$
- Proxima du Centaure (étoile la plus proche), parallaxe de $0,768''$
 $\Rightarrow 1,3 \text{ pc}$, soit $4,2 \text{ al}$.
angle 2500 fois plus petit que le diamètre apparent de la lune



Mesures des parallaxes par satellite

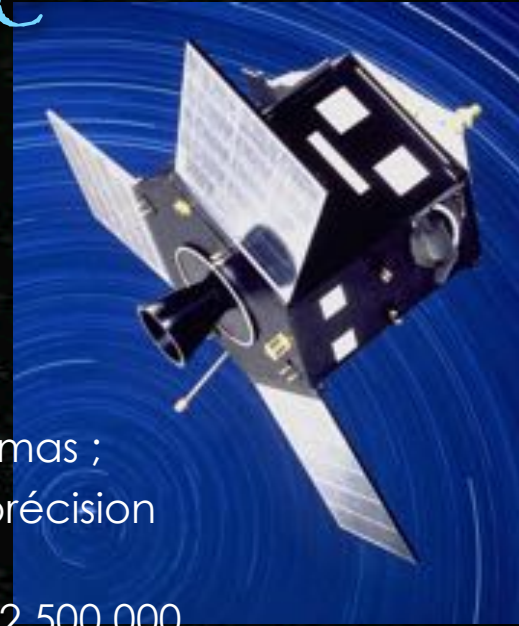
0:29:41,36 AL: soit 0:48:00

Avantages

- échapper à la turbulence atmosphérique
 - Images stables, non déformées
- Echapper à la pesanteur
 - pas de flexion des instruments
- Echapper aux irrégularités du mouvement de la Terre

- Observation de l'ensemble du ciel avec le même instrument

Mesures par satellite



Hipparcos

- High Precision PARallax COLlecting Satellite, ESA
- Lancement en 1989 - fin des transmission en 1993
- étoiles à moins de 500 AL de la Terre
 - catalogue Hipparcos, 120.000 étoiles mesurées à 1 mas ;
 - catalogue Tycho, plus d'un million d'étoiles à une précision de 20 à 30 mas ;
 - catalogue Tycho2 (2000), extension du précédent, 2.500.000 étoiles, précision un peu améliorée. Il couvre 99 % de toutes les étoiles de magnitude inférieure à 11.
- Erreur sur la distance $\Delta d = \Delta p / p * d$
 - Un objet à 500 pc, $\Delta p = 1$ mas : erreur de 50% sur la distance

– Modification de toutes les distances dans l'Univers.
Augmentation de la taille estimée de l'Univers.

Mesures par satellite



Mesures par satellite

Gaia

- Mission sélectionnée en 2000, Gaia est lancé le 19 déc. 2013, pour une mission nominale de cinq ans.
- démarrage en 2014
- mesures astrométriques, photométriques, spectroscopiques
 - Positions, distances, mouvements des étoiles
 - Composition, formation, évolution de la Galaxie

Mesures par satellite

Gaia

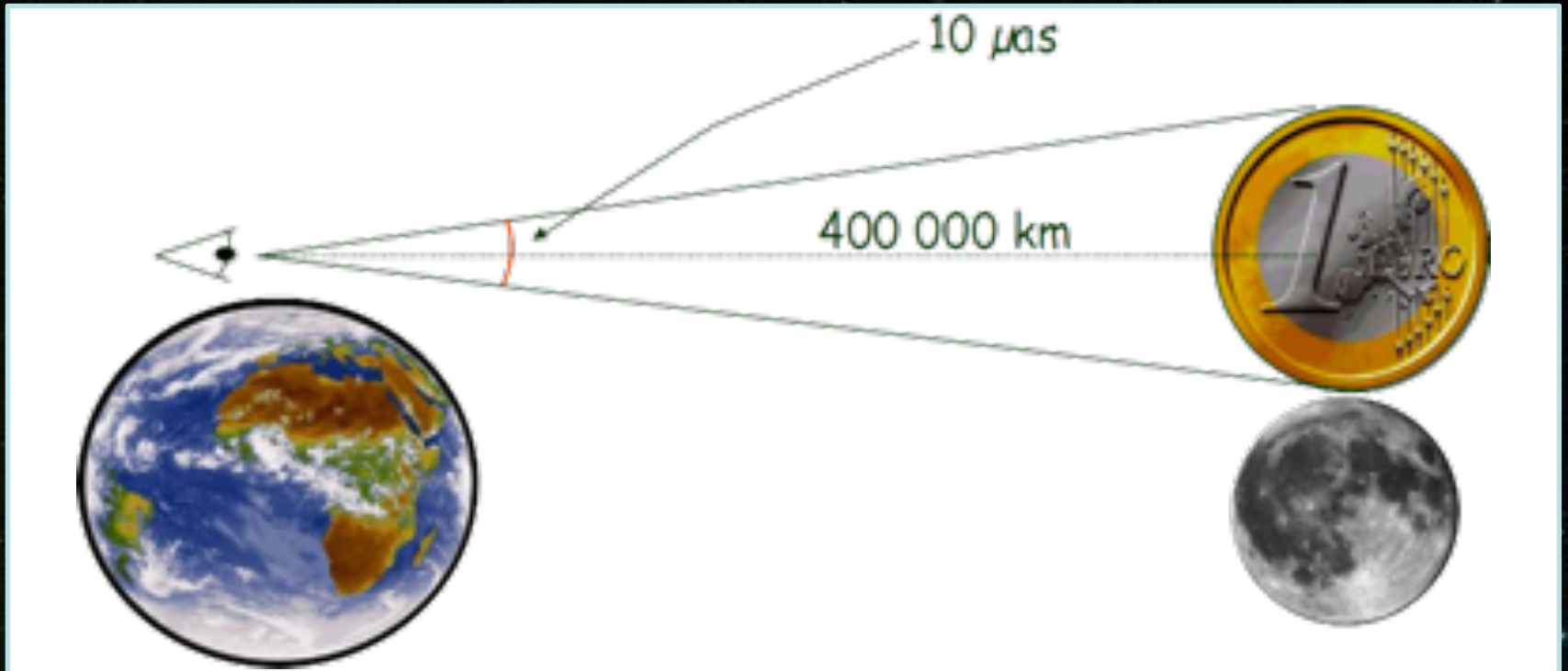
- deux mois et demi après le lancement, autour du point de Lagrange L2, à environ 1,5 million de km
- 25 juillet 2014, les observations scientifiques démarraient.
- 3434 jours à balayer régulièrement l'ensemble du ciel
- 126 000 GB de données collectées.
- 1,5 milliards de mesures astrométriques (1% des étoiles de la galaxie)



Mesures par satellite

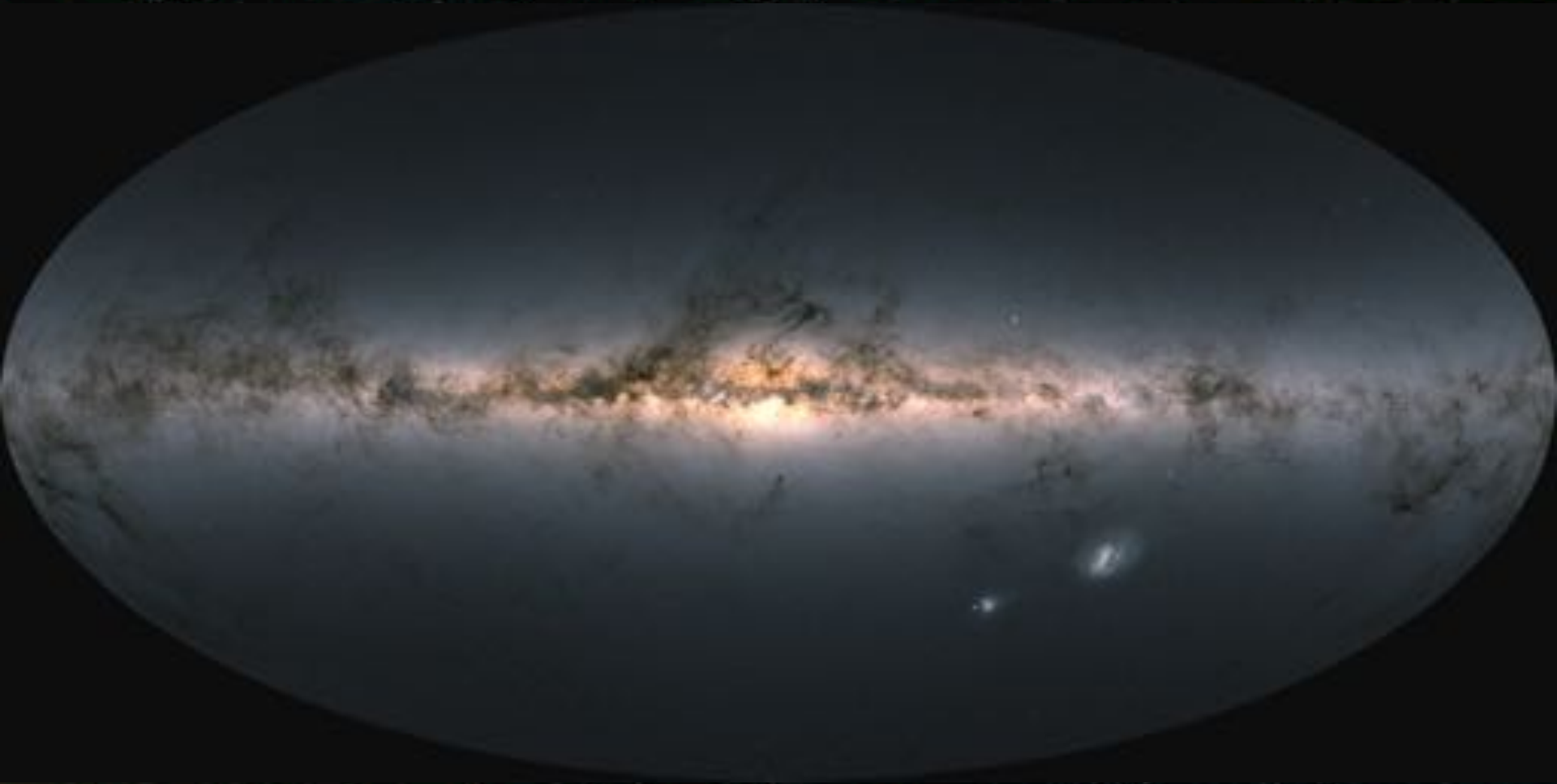
Gaia

Précision : 7 μas pour $M=10$
12-25 μas pour $M=15$
100-300 μas pour $M=20$



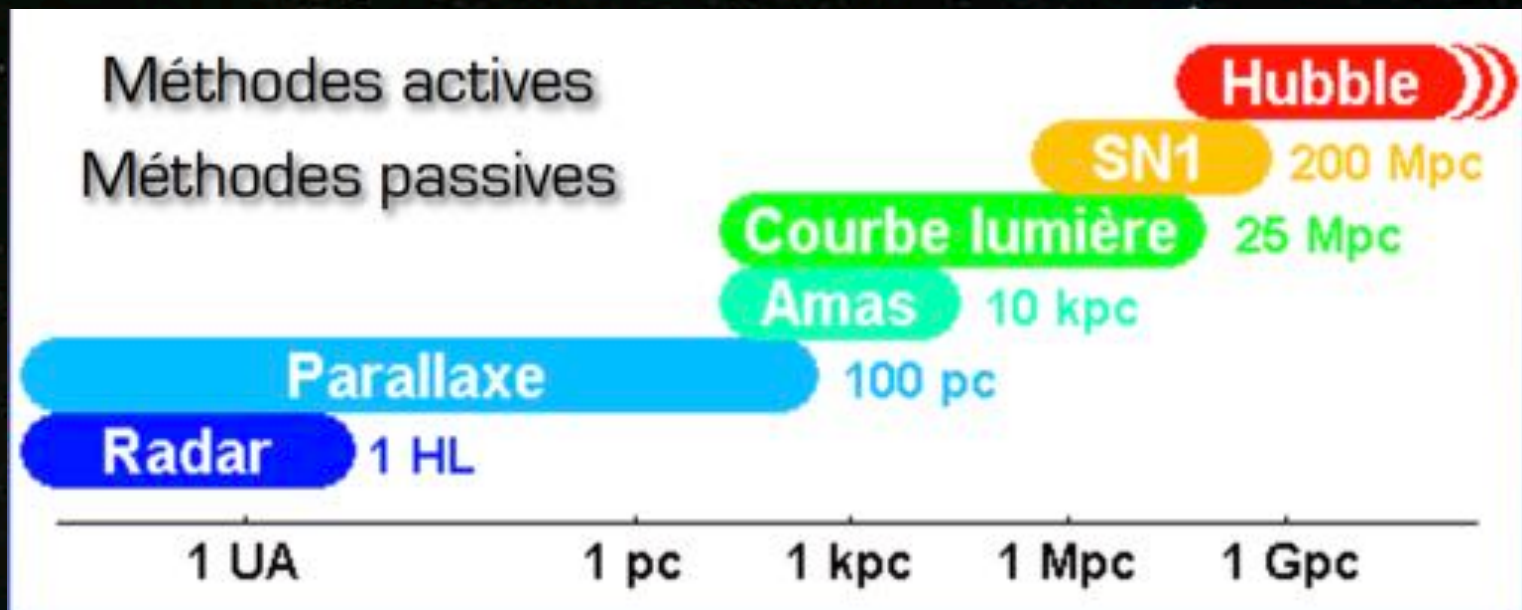
Mesures par satellite

Gaia EDR3





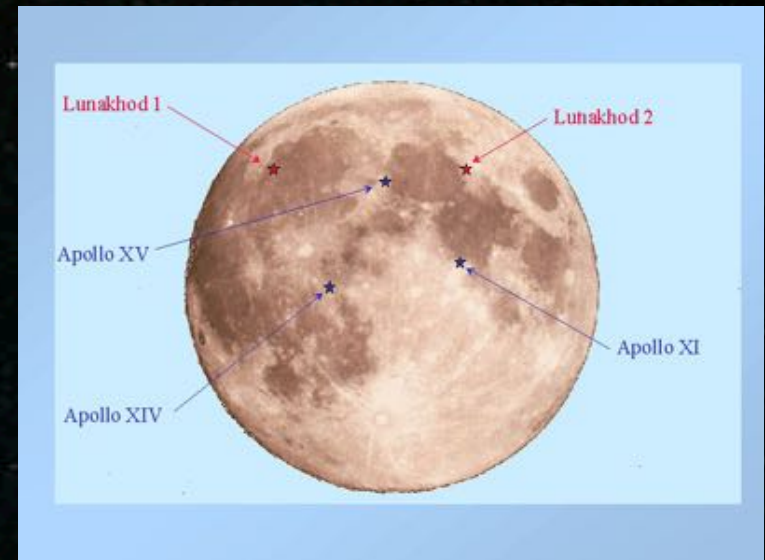
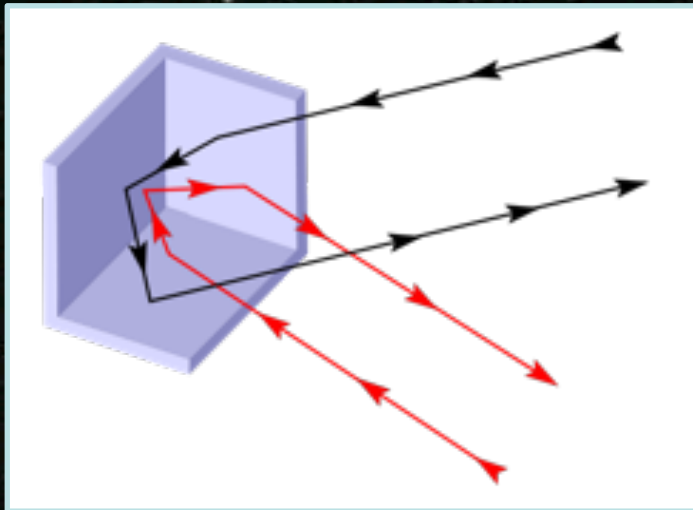
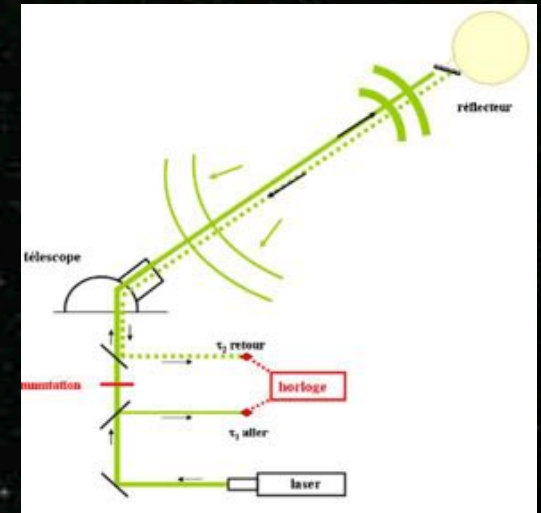
Méthodes physiques



Méthodes actives

Mesures par tirs Laser

- pour mesurer la distance Terre-Lune (télémétrie laser-Lune)
- Réflecteurs déposés sur la Lune, coins optiques renvoient tout rayon lumineux qui les frappe, quelle que soit l'incidence, vers l'émetteur



Méthodes actives

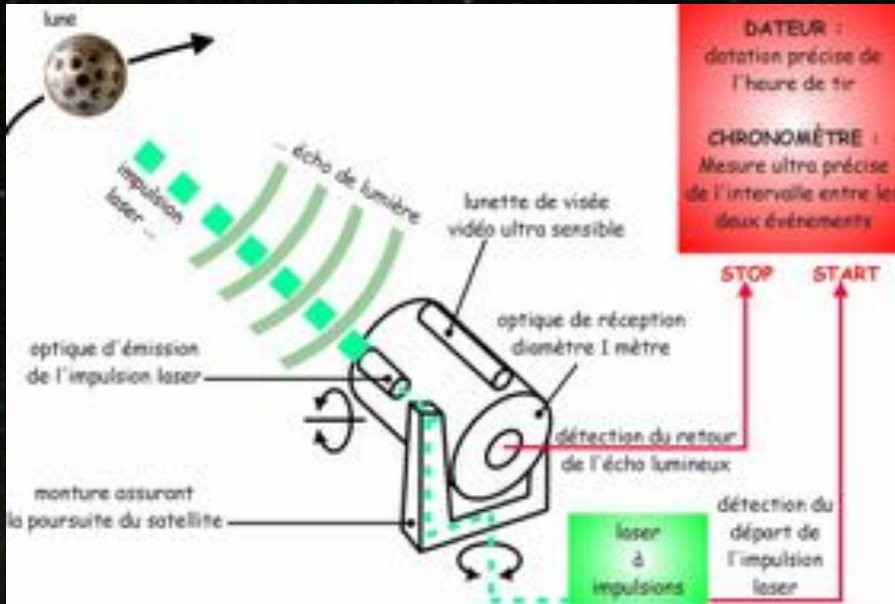
Station MéO

téléométrie laser

Laboratoire Géoazur

Mesurer et calculer les positions des sondes spatiales et des planètes pour comprendre leur dynamique

Tir laser-Lune depuis la station MéO sur le plateau de Calern, France.



Méthodes actives

Radar

– Radiotélescope émetteur/récepteur ex : Arecibo

– Rendement faible

– précision de l'ordre du km

– 1^{ere} détection non ambiguë de Venus (JPL) le 10 mars 1961
=> fixe l'Unité Astronomique

- 1 U A = 149 597 870 km



– Cartographie de Mars, cartographie des astéroïdes, cartographie de planètes et satellites avec des sondes

Méthodes passives

indicateurs de distance.

- Méthodes faisant appel à des distances **photométriques** :
détermination de la distance : par la comparaison de
l'éclat **apparent** - observé - et de la luminosité **intrinsèque**
de l'objet - induite par une information indépendante.
- LA SUITE : Une prochaine fois
 - Céphéides
 - Etoiles de type Mira
 - Lois de Tully Fisher, faber-Jackson
 - Supernovae de type Ia
 - Loi de Hubble, décalage spectral

Quelques distances

– Distance Terre Lune = 384 400 km

Distance Terre soleil : Unité astronomique

149 597 870 700 mètres

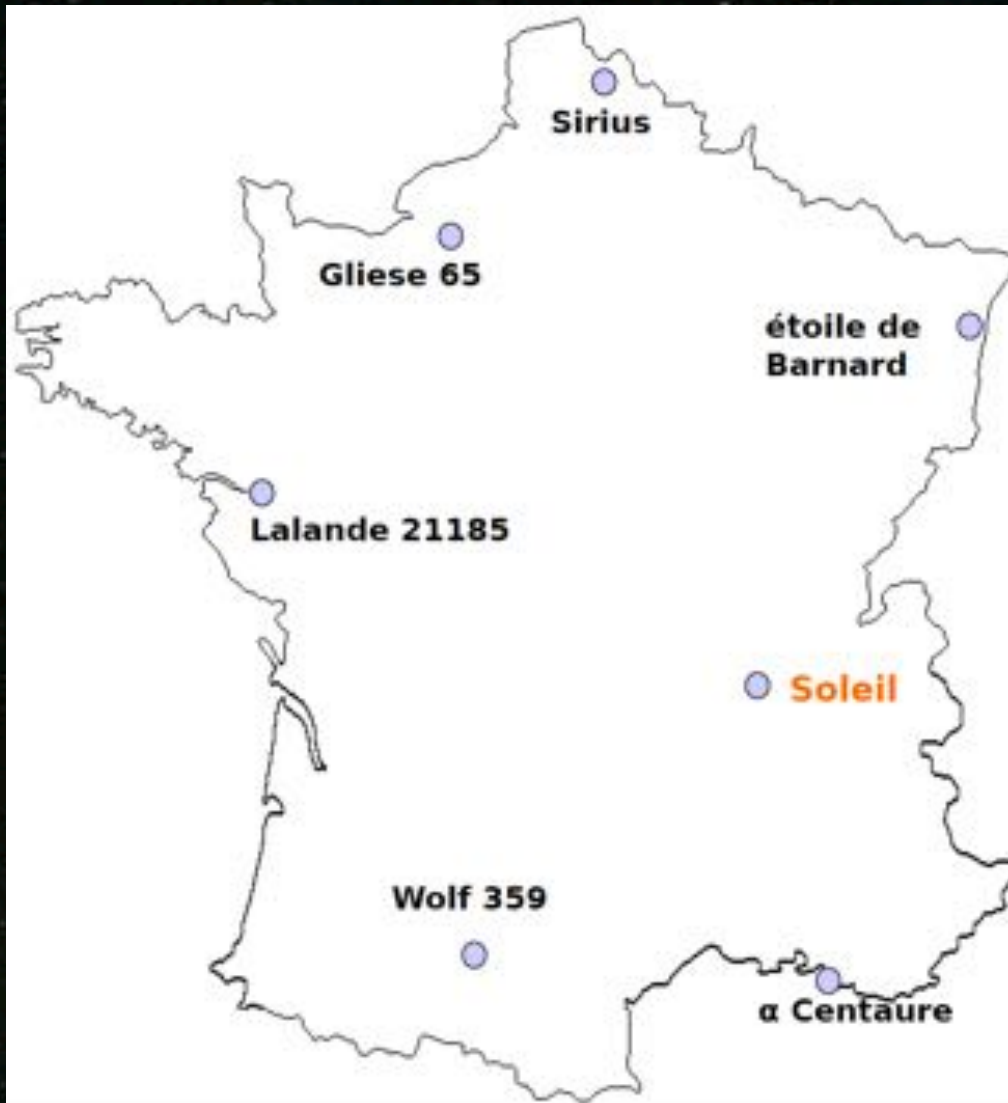
Distance moyenne Planète - Soleil

- Terre : 8 minutes-lumière
- Mars à 12 minutes-lumière,
- Jupiter à 43 minutes-lumière,
- Saturne à 79 minutes-lumière
- Neptune à plus de 4 heures-lumière
- Confins du système solaire (nuages d'Oort) : environ 1 AL

Distance dans la galaxie

- Proxima du Centaure : 4,24 AL
- Sirius : 8,6AL
- Arcturus : 36,7 AL
- M13 : 25000 AL
- Centre de la galaxie : 26 000 al

Les étoiles les plus proches



À cette échelle:

- Le Soleil serait plus petit qu'une bille
- La Terre serait à un mètre
- Le Système solaire serait un terrain de foot
- L'étoile la plus proche serait à Marseille et Sirius à Lille



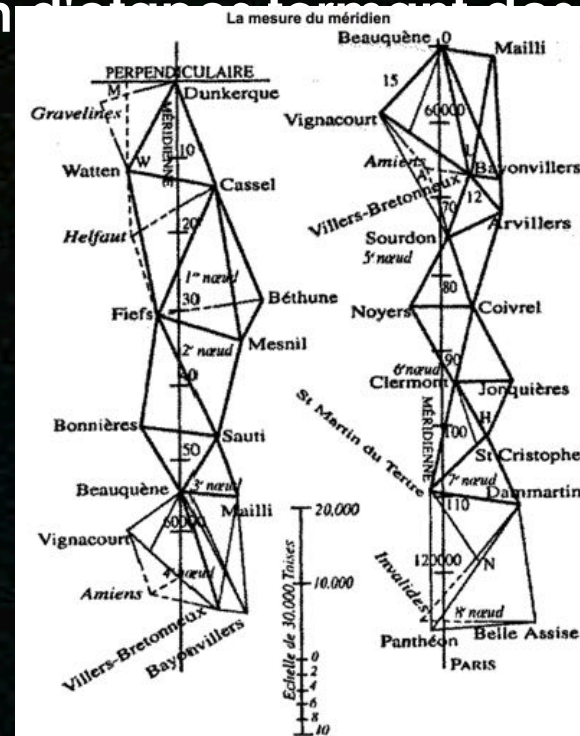
Merci de votre attention

La mesure de la terre

Par triangulation

- Par triangulation, les astronomes Delambre et Méchain ont **mesuré la Terre**, et défini le mètre, à la fin du XVIIIe siècle.
- Ils ont parcouru un arc de méridien, de Dunkerque à Barcelone, par une **succession de triangles juxtaposés**.

La mesure du mètre



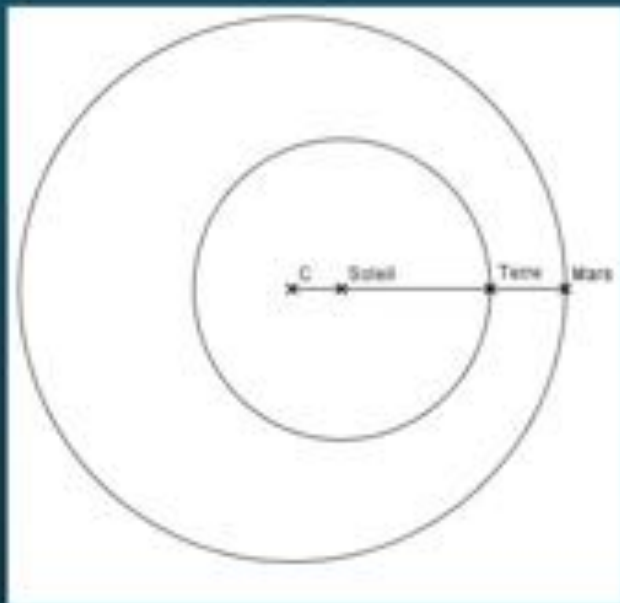
Distance Terre Soleil

Calcul de la distance Terre-Soleil

L'excentricité de l'orbite terrestre est négligeable dans une première approximation, mais pas celle de Mars.

Le centre de l'orbite de Mars est C.

Les positions du Soleil, de la Terre et de Mars sont S, T et M, respectivement.



On a : $CS = e a_M$, $CM = a_M$, et : $ST = a_T$.

$$a_M = CM = CS + ST + TM = e a_M + a_T + d$$

$$a_M(1 - e) = a_T + d$$

On applique la troisième loi de Kepler :

$$\frac{a_T^3}{P_T^2} = \frac{a_M^3}{P_M^2}$$

Et finalement :

$$a_T = \frac{d}{(1 - e) \left(\frac{P_M}{P_T} \right)^{2/3} - 1}$$

Avec $P_M = 1,88$ ans, $P_T = 1$ ans et $d = 55$ Mkm, on trouve $a_T = 142$ Mkm, qui est une bonne valeur de l'unité astronomique

