

L'astrométrie, d'Abbadia à Gaia

J.-E. Arlot,

Astronome à l'observatoire de Paris/IMCCE





Dragon

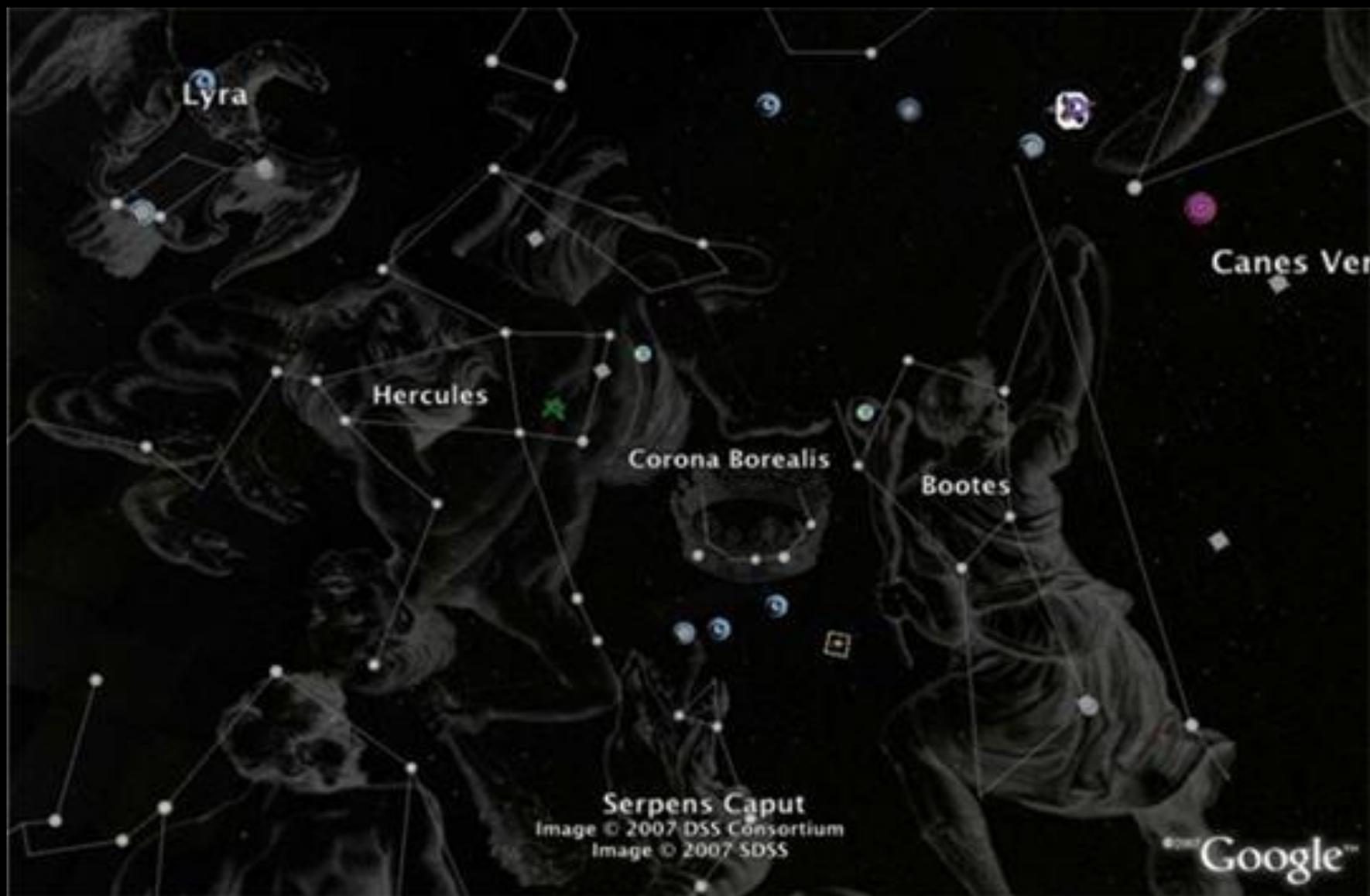
Grande Ours

Petite Ours

Polaris

Céphée

Cassiopée



Lyra

Hercules

Corona Borealis

Bootes

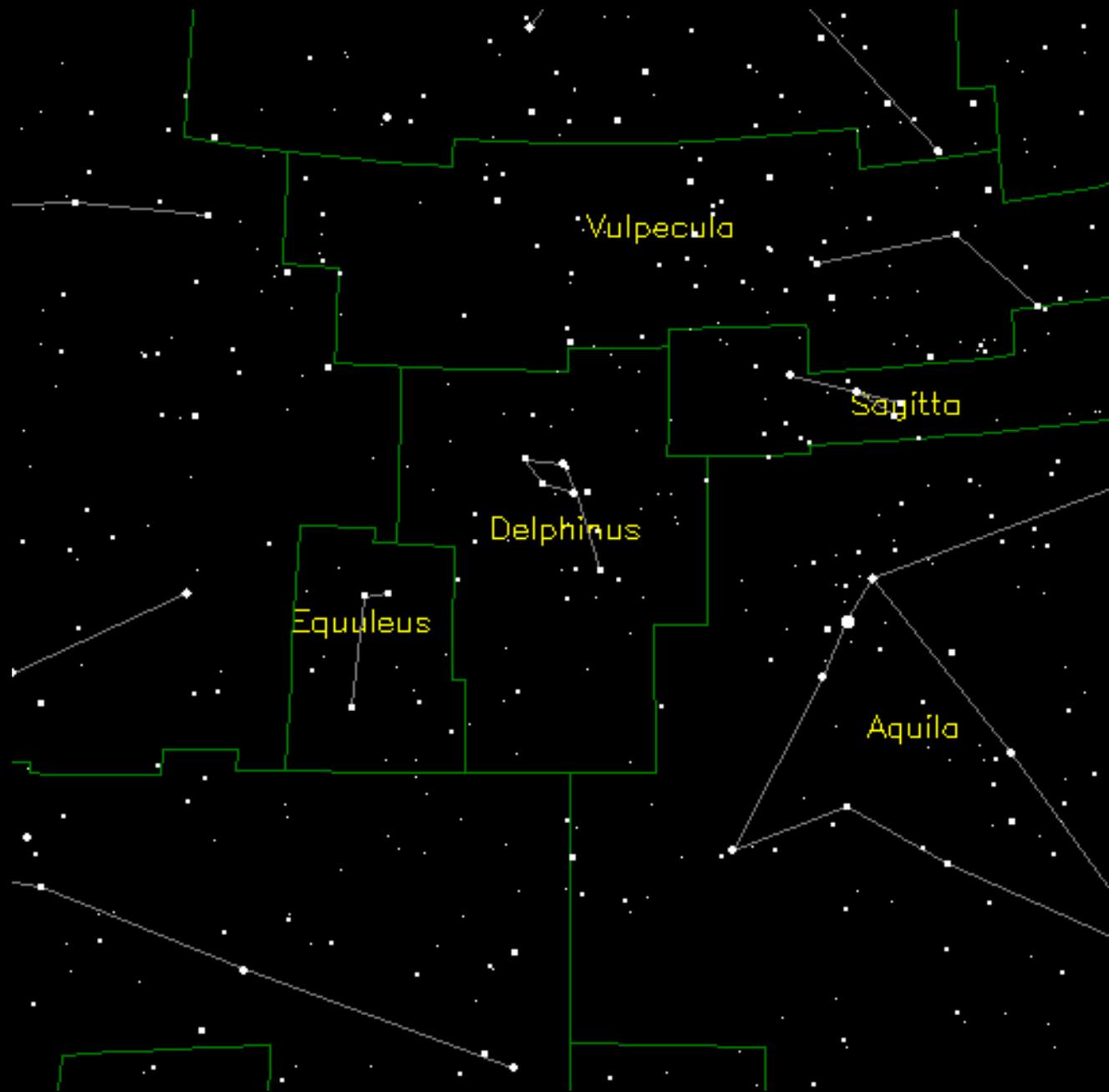
Canes Ven

Serpens Caput

Image © 2007 DSS Consortium

Image © 2007 SDSS

2007 Google™



Vulpecula

Sagitta

Delphinus

Equuleus

Aquila

Pourquoi mesurer des positions?

- Parce que ce qu'on croit fixe, est souvent mobile si la précision de mesure augmente!
- Pour comprendre comment se déplacent les objets mobiles.
- Pour déterminer les distances aux astres du ciel
- Pour établir un modèle d'univers, son évolution et les distances entre les astres observés.

La précision de mesure: un combat permanent essentiel qui ne se terminera jamais...

Qu'est-ce que l'astrométrie?

A quoi ça sert?

- C'est la mesure de positions angulaires entre les étoiles vues par l'observateur terrestre
- La géométrie et la géodésie mesurent la Terre; l'astrométrie mesure le ciel
- Elle permet:
 - de se repérer sur Terre et dans le ciel (systemes de référence)
 - de cartographier la Terre et de mesurer les longitudes
 - de comprendre le mouvement des astres dans le système solaire et dans l'univers
 - de tester nos modèles et nos représentations de l'univers en suivant et en interprétant les mouvements des astres
 - de mesurer les distances dans l'univers

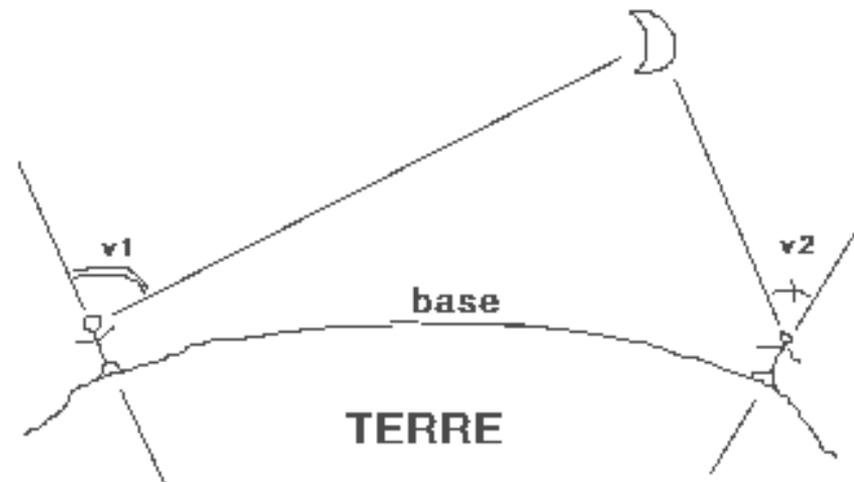
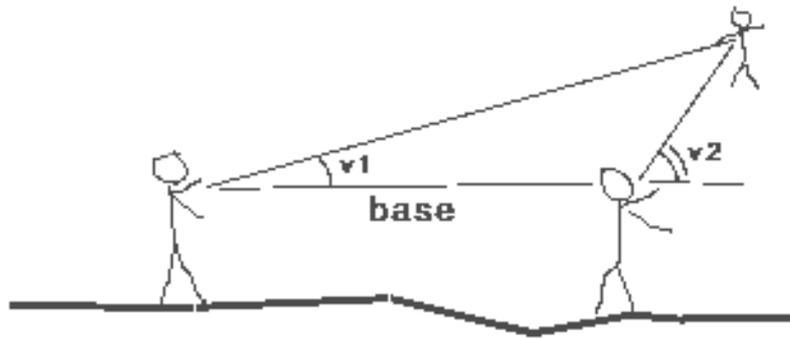






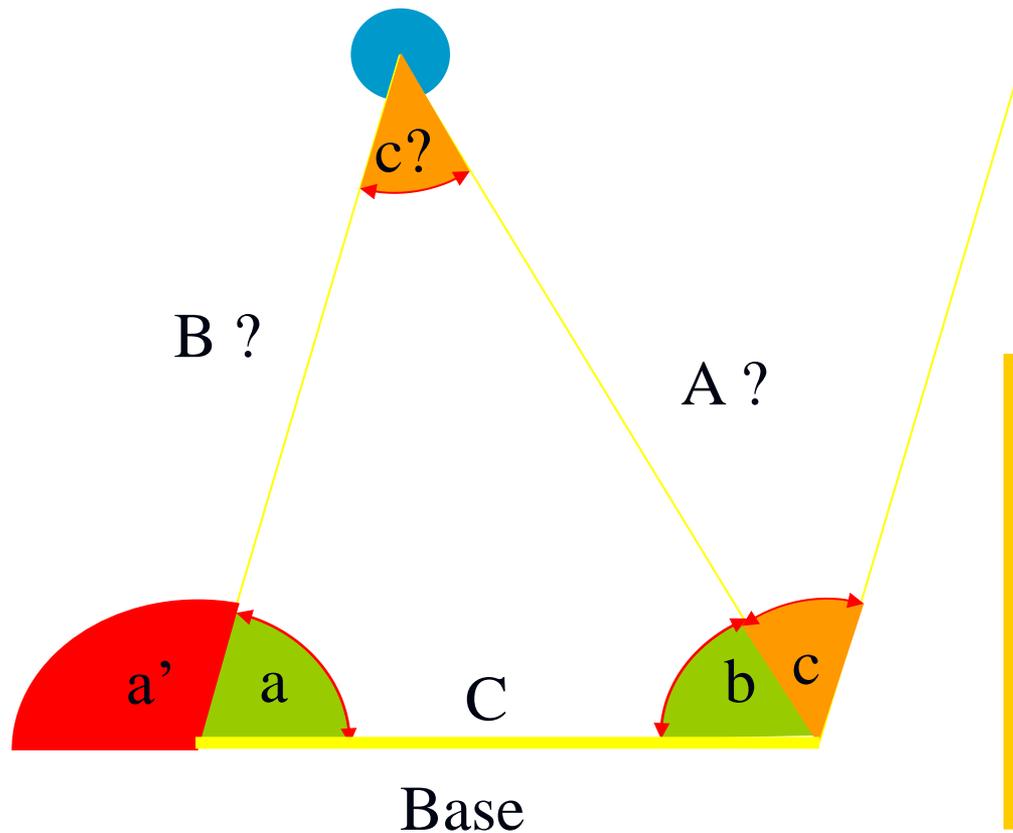
La mesure des distances grâce à la triangulation

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



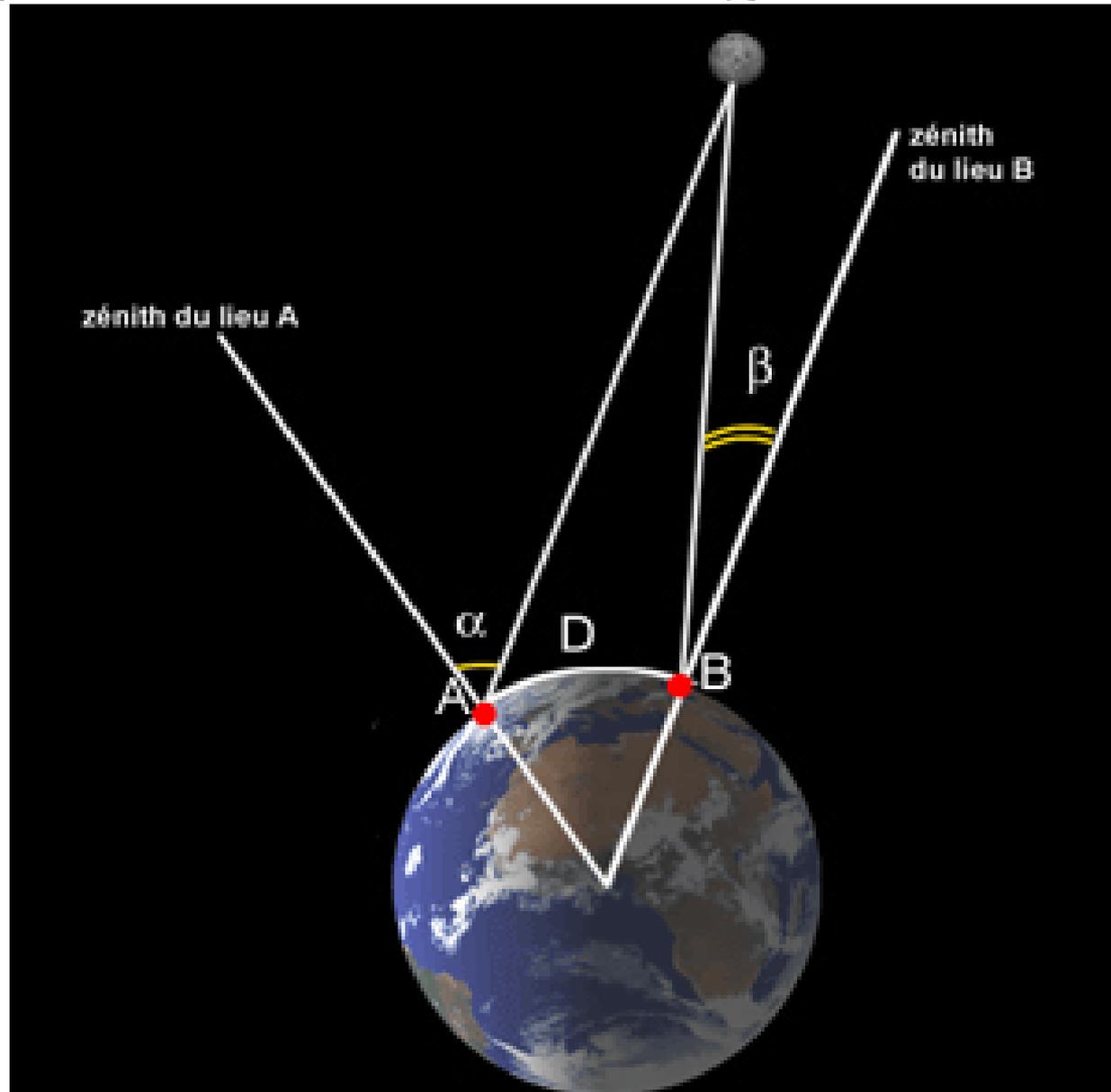
Un calcul connu depuis l'antiquité

La triangulation

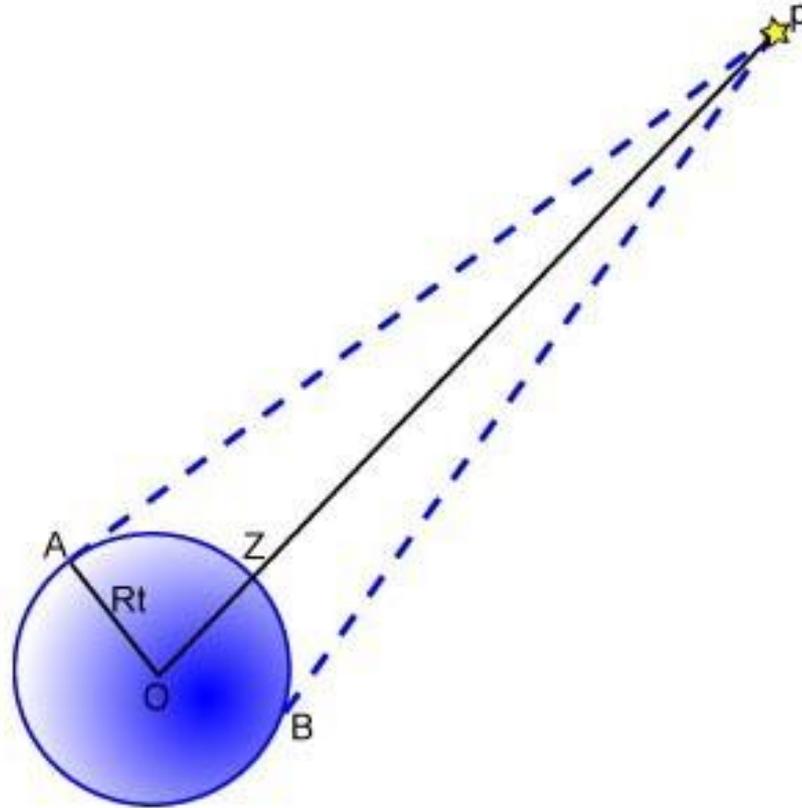


$$c = 180^\circ - (a + b)$$
$$c = a' - b$$
$$\frac{\sin c}{C} = \frac{\sin b}{B} = \frac{\sin a}{A}$$

L'application aux corps célestes:

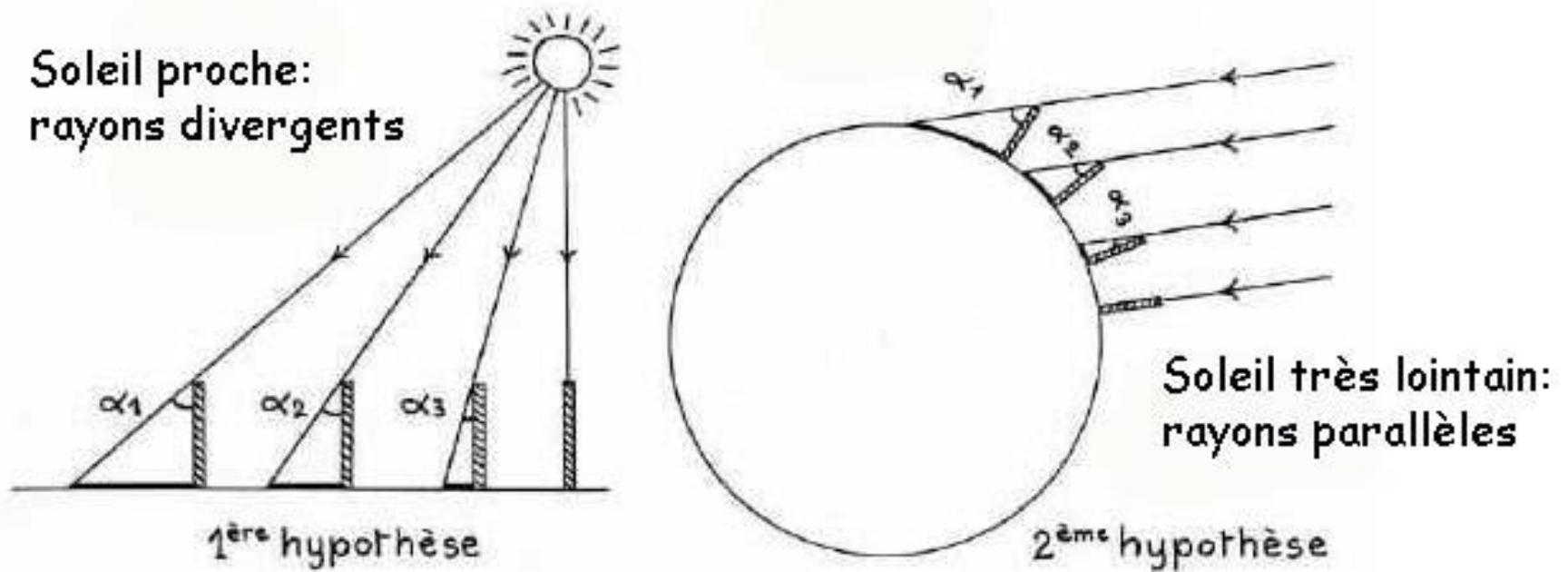


La parallaxe horizontale



- Les astronomes ne mesurent que des angles

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

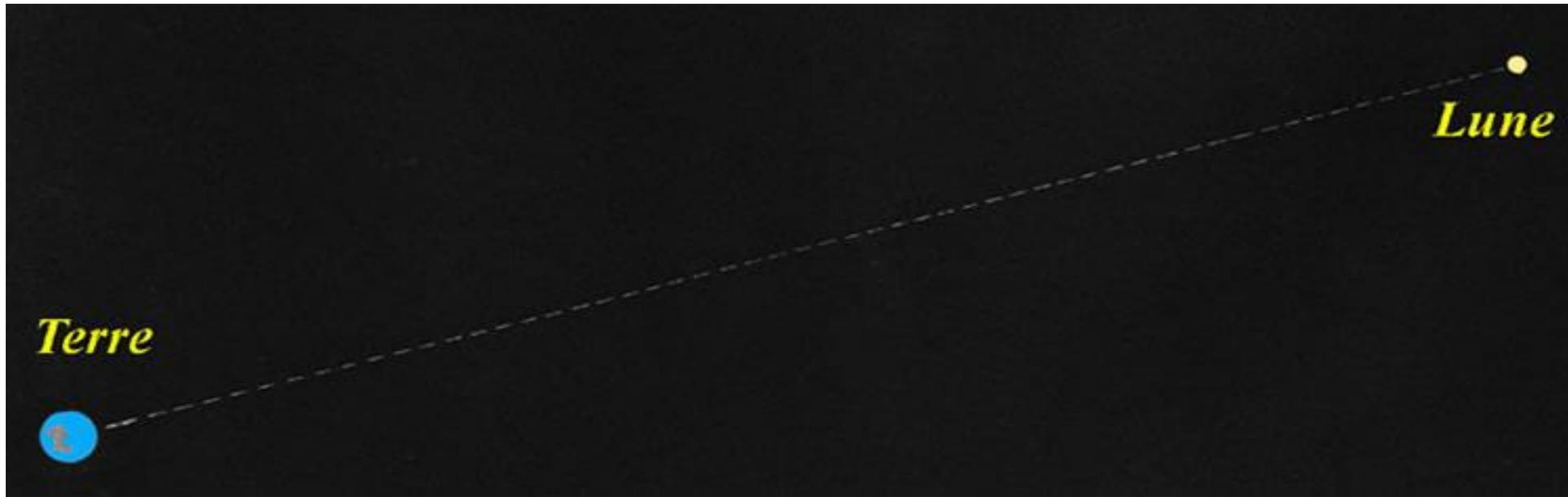


Détermination de la distance Terre-Soleil: une parallaxe mesurable?

Appliquer la triangulation à la distance Terre-Lune?



Appliquer la triangulation à 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...

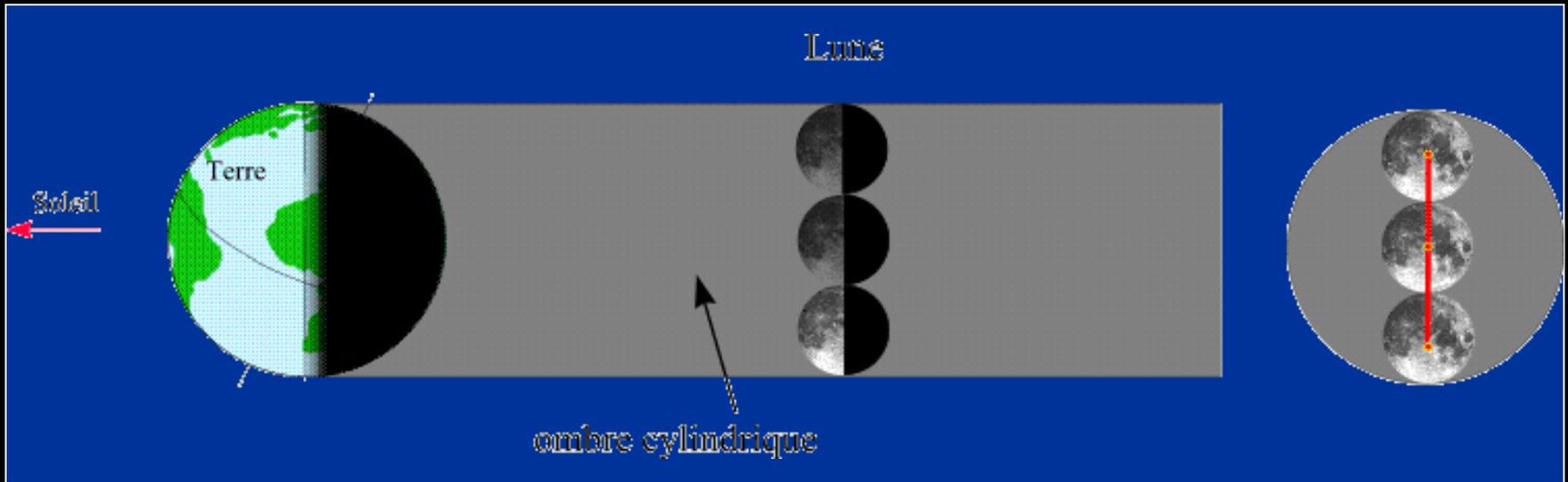
Peut-on appliquer la triangulation aux objets célestes?
Ne sont-ils pas trop loin?

Utilisons une autre technique pour mesurer la distance Terre-Lune



Une éclipse de Lune nous donne la distance Terre-Lune

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



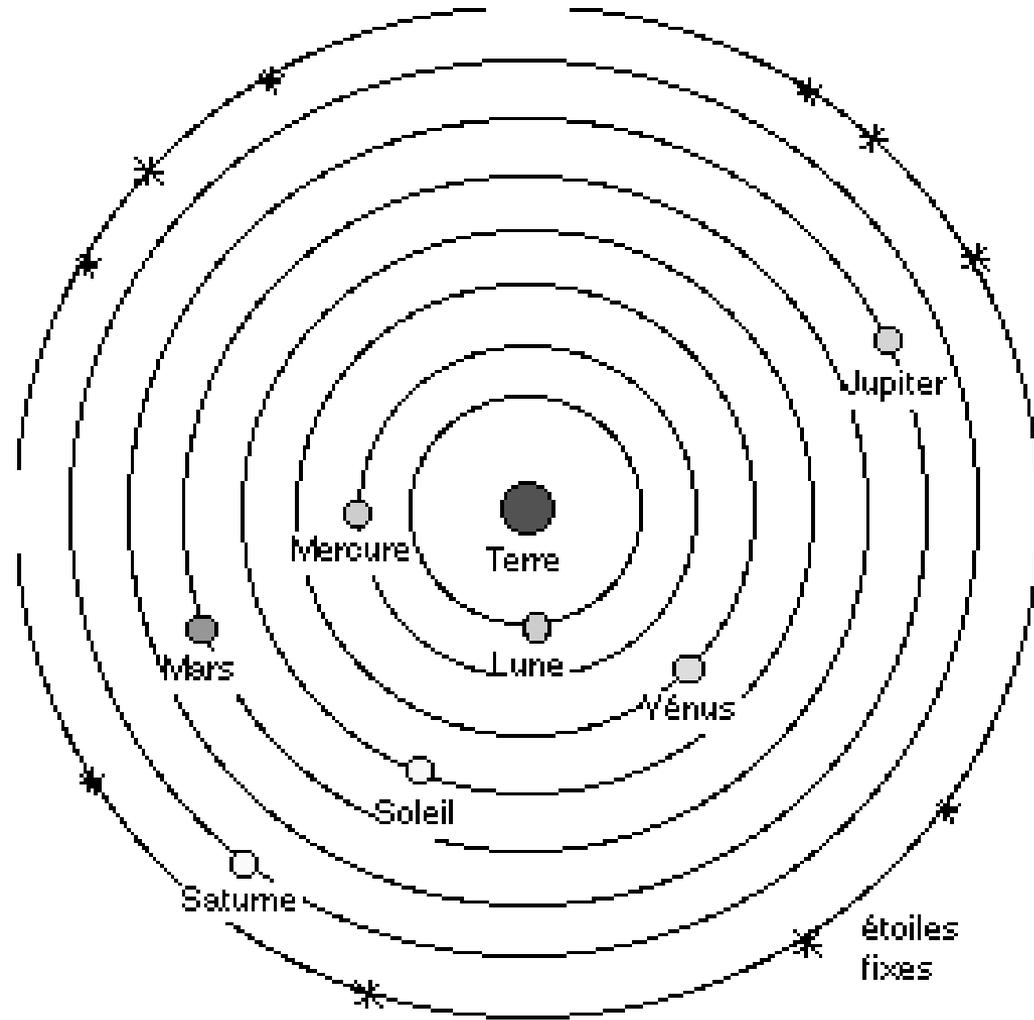
- L'ombre est supposée cylindrique.
- La Lune se déplace d'une distance égale à son diamètre en une heure.
- Les éclipses totales de Lune les plus longues durent environ 2 heures.

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.

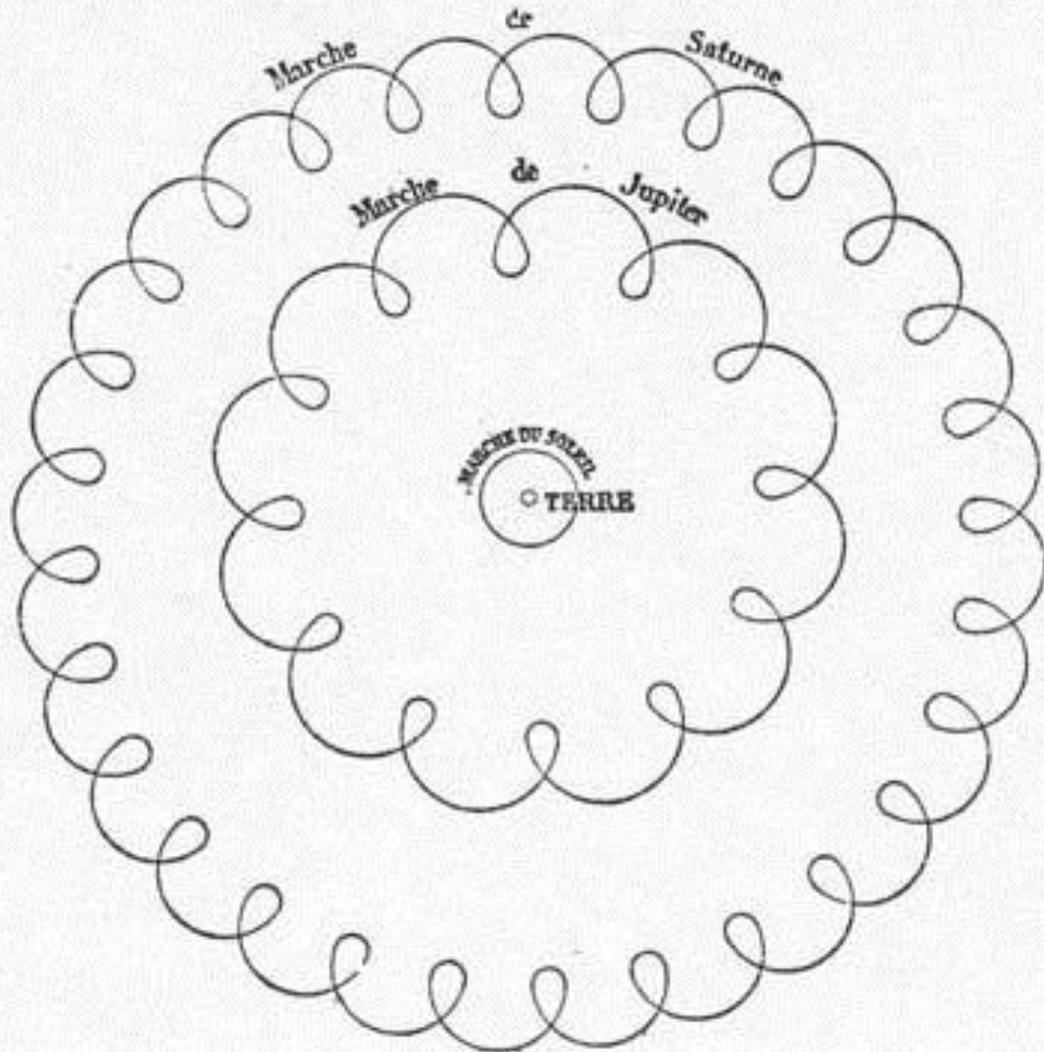
La distance au Soleil et aux planètes

- 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...

Le modèle d'univers d'Aristote



Le modèle de Ptolémée



ÉPICYCLES DE PTOLÉMÉE.



Ptolémée (100-170)

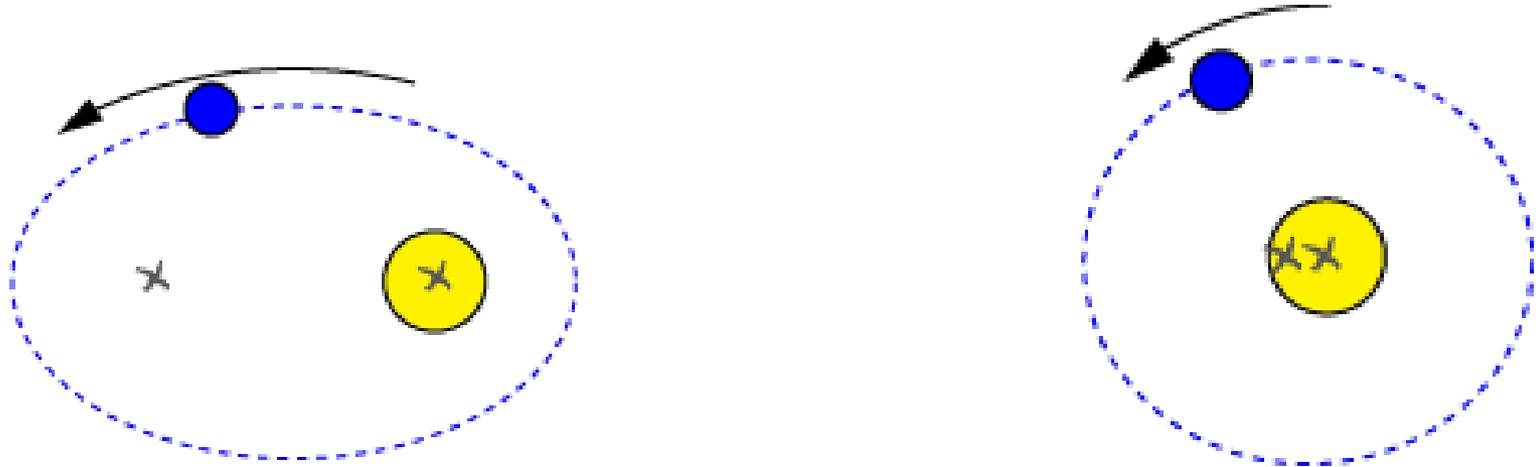


Copernic (1473-1543)

Le modèle de Copernic



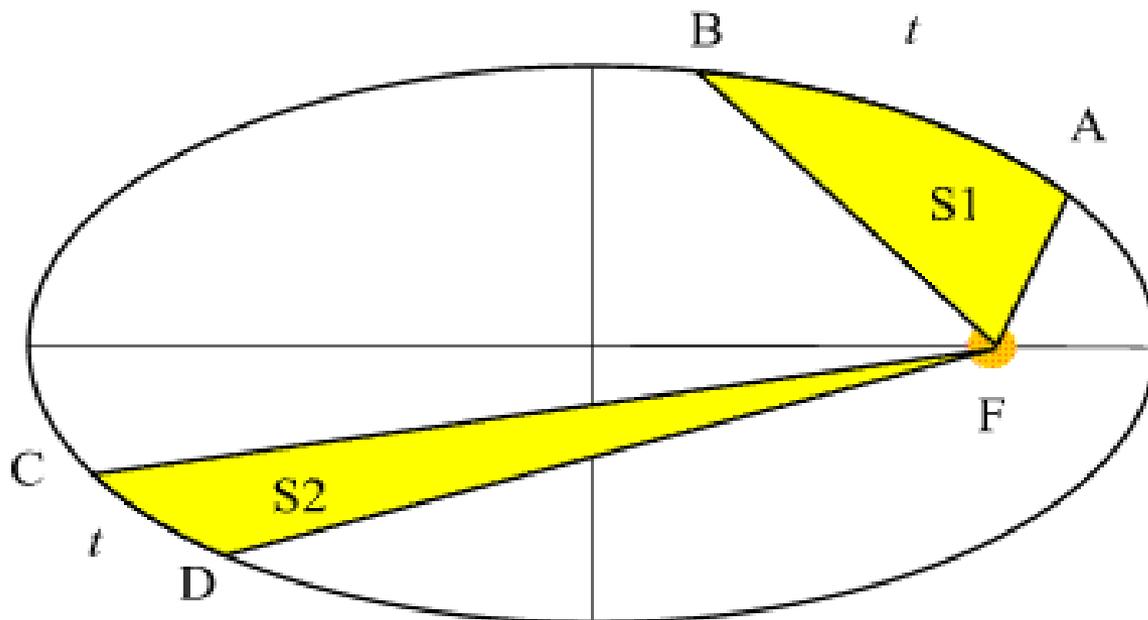
La première loi de Képler



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

La loi des aires

Deuxième loi de Kepler $S_1 = S_2$



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

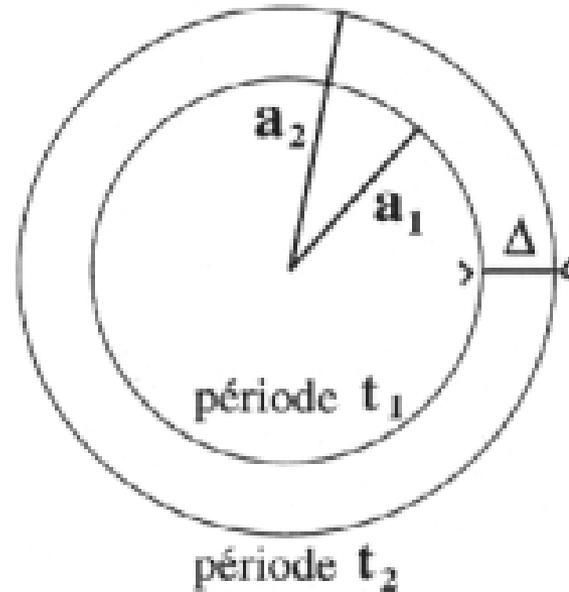
Les aires décrites par le rayon vecteur planète-Soleil sont proportionnelles aux temps employés à les décrire (Astronomia Nova, 1609);

La 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



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).

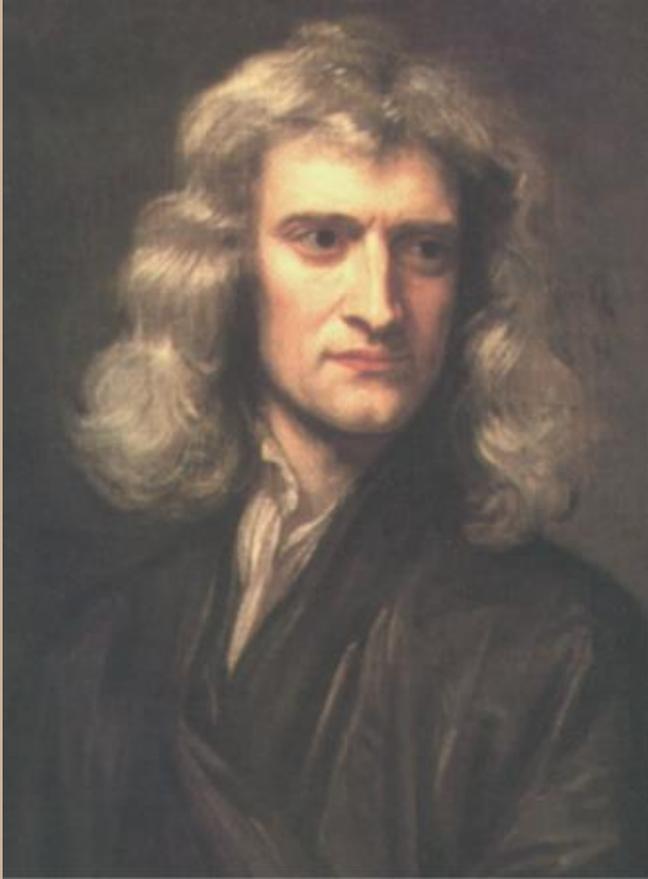
La troisième loi de Kepler dit que si on connaît une distance dans le système solaire alors on peut les connaître toutes.

Mesurer le ciel

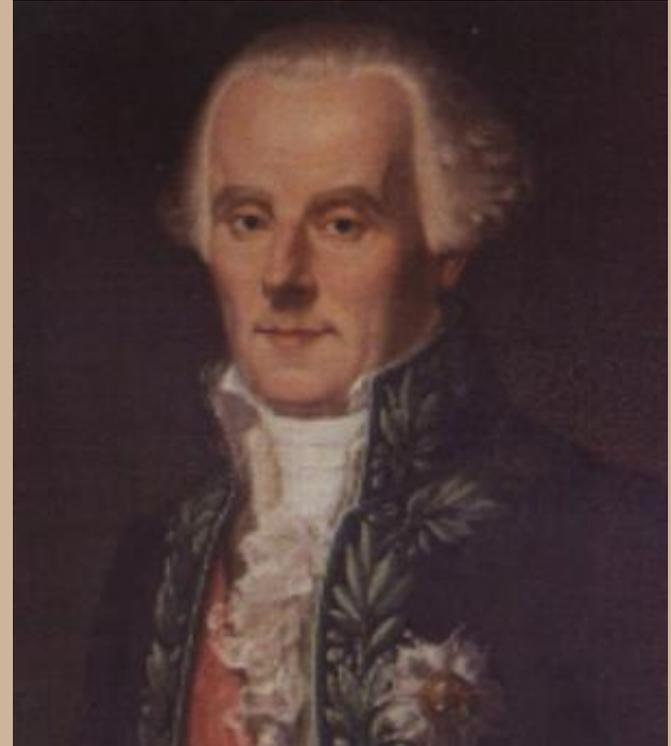
Tycho Brahé: ses
mesures vont aider
Kepler à écrire ses
« lois »



Les pères de la mécanique céleste: ils vont démontrer et prolonger les lois empiriques de Kepler



Newton (1643-1727)

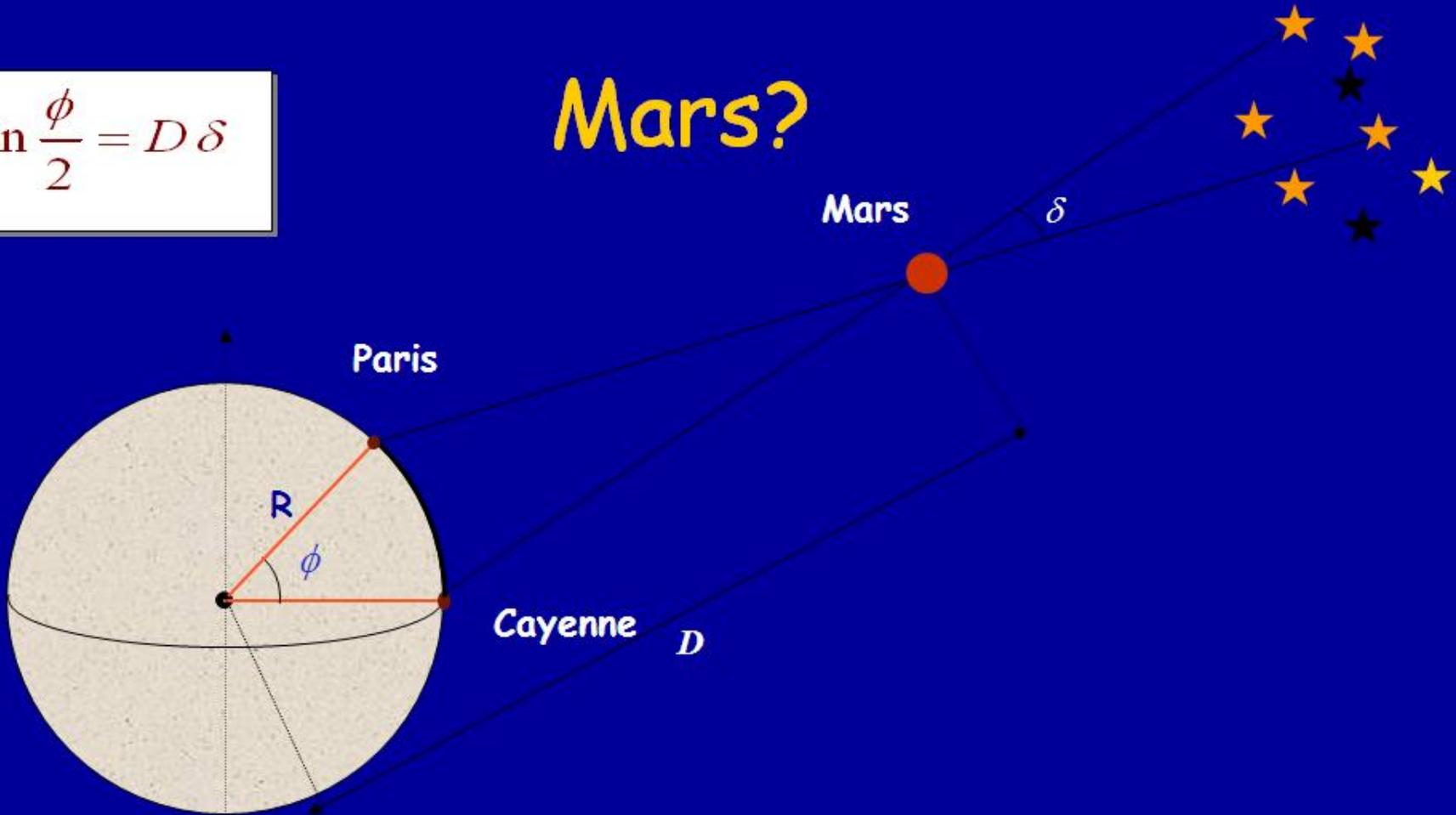


Laplace (1749-1827)

Avec les lois de Kepler, il suffit de mesurer la distance
d'une seule planète proche pour connaître toutes les autres

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

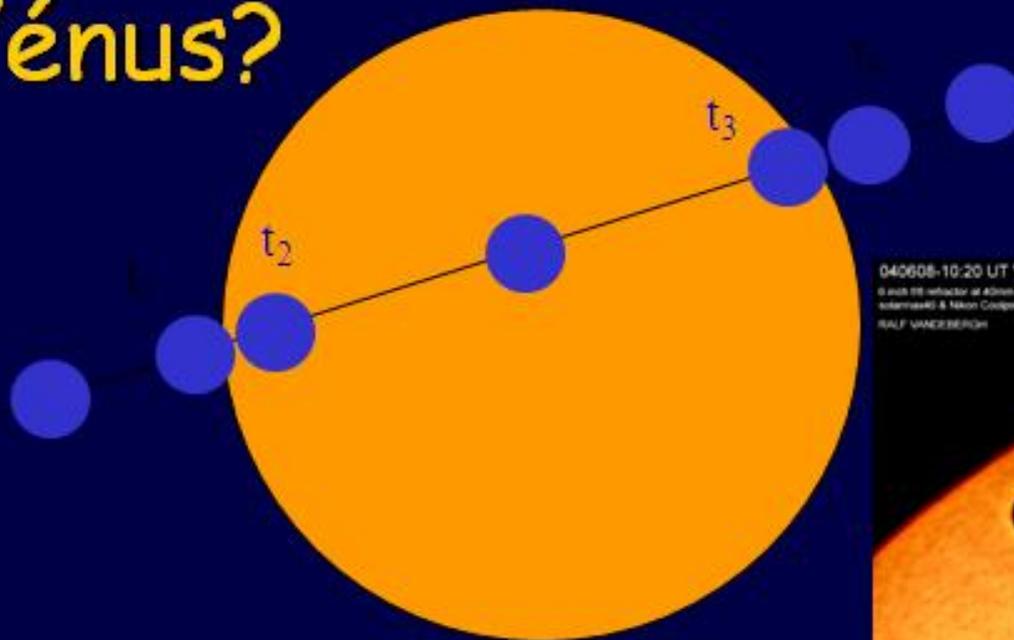
Mars?



Vénus se trouve entre la Terre et le Soleil

Un phénomène rare: 1639, 1761, 1769, 1874, 1882, 2004, 2012
→ Vénus peut passer devant le Soleil!

Vénus?



t_1 : 1^e contact

t_2 : 2^e contact

t_3 : 3^e contact

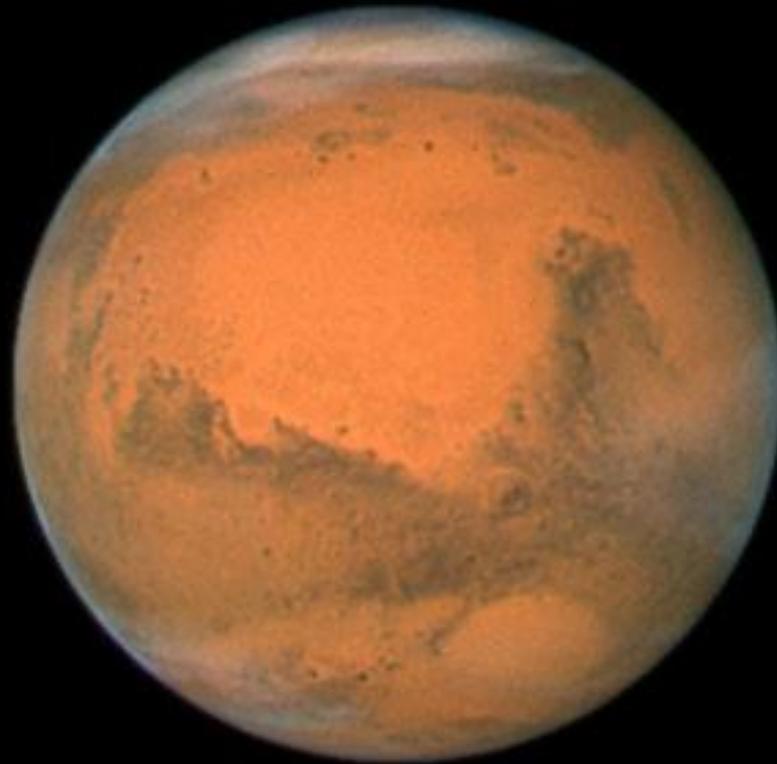
t_4 : 4^e contact

040608-10:20 UT Venus transit Ha
6 inch f8 reflector at 40mm F20
astromask & Nikon Coolpix4500
RALF VANDERBORN



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

Aujourd'hui 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



La distance Terre-Soleil est de 149 597 870 km 691 m

- Nous avons mesuré le système solaire. Mais comment aller au-delà?
- D'abord comprendre ce qu'il y a dans l'univers au-delà du système solaire.

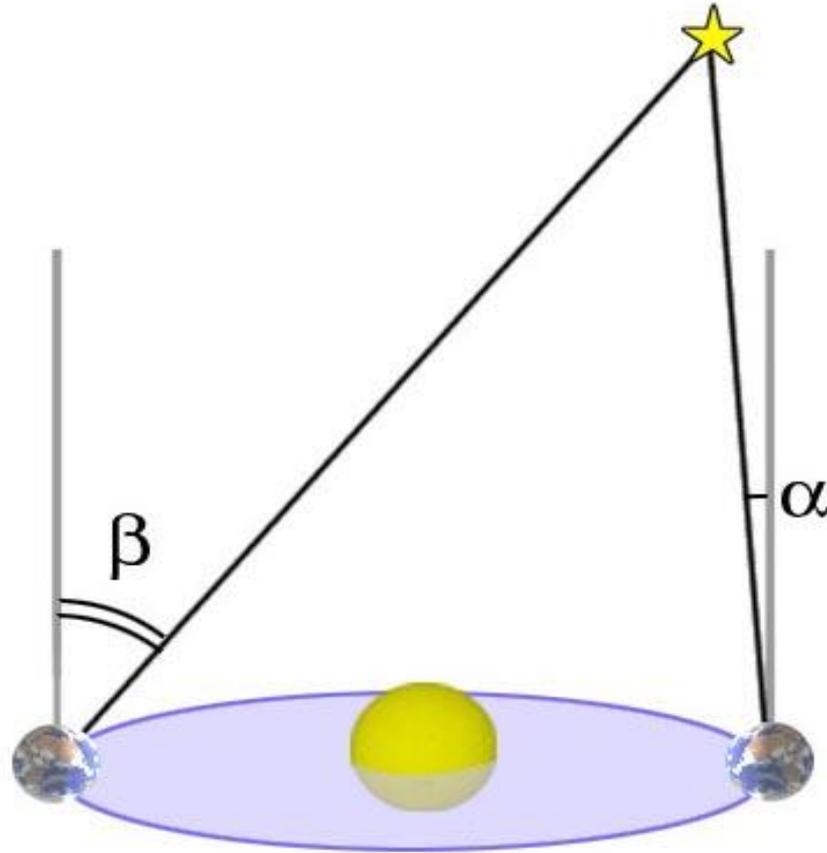
Au-delà du système solaire, les distances deviennent très grandes

	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

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

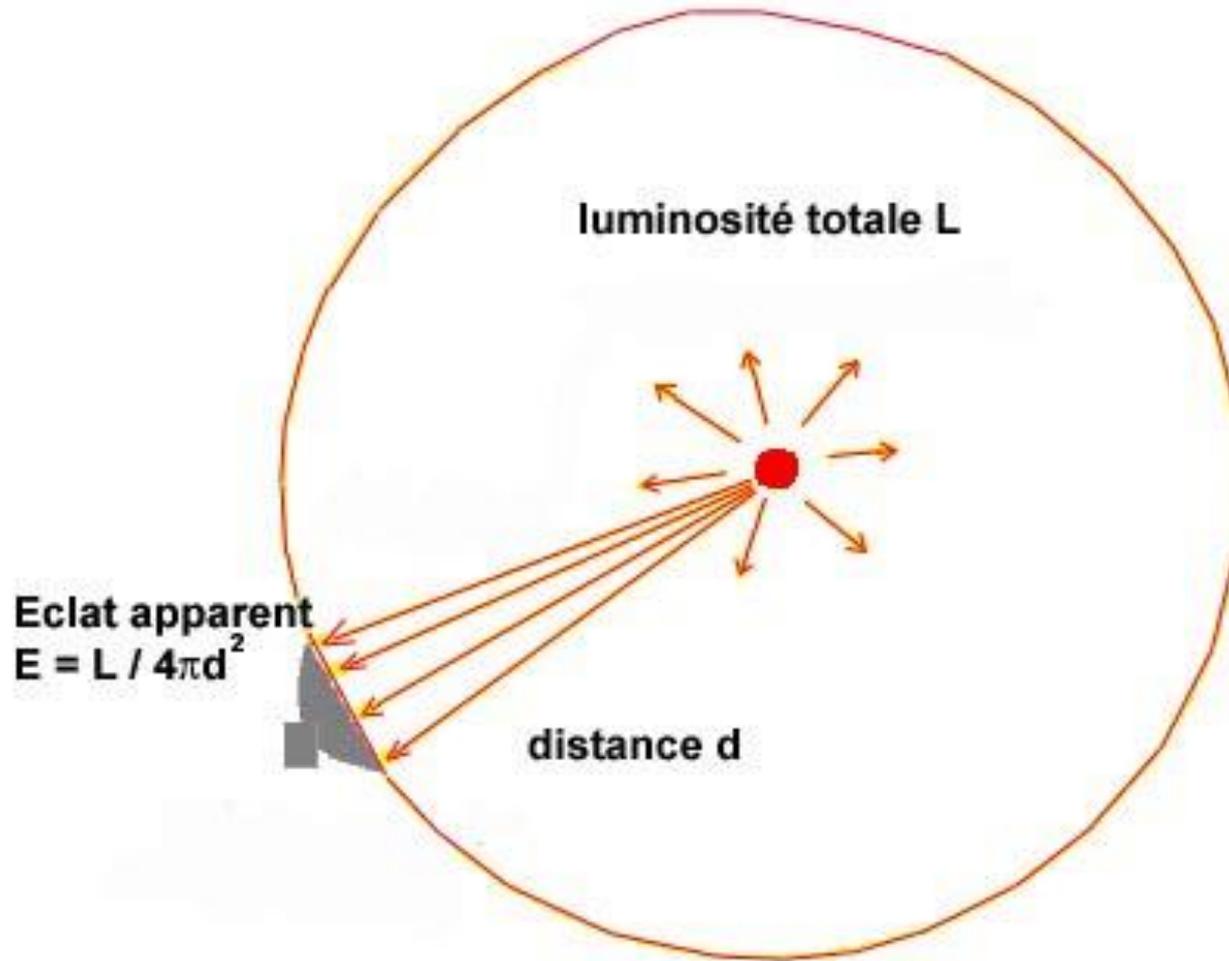
distance des étoiles?

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



Cette méthode ne s'applique qu'aux étoiles proches de nous

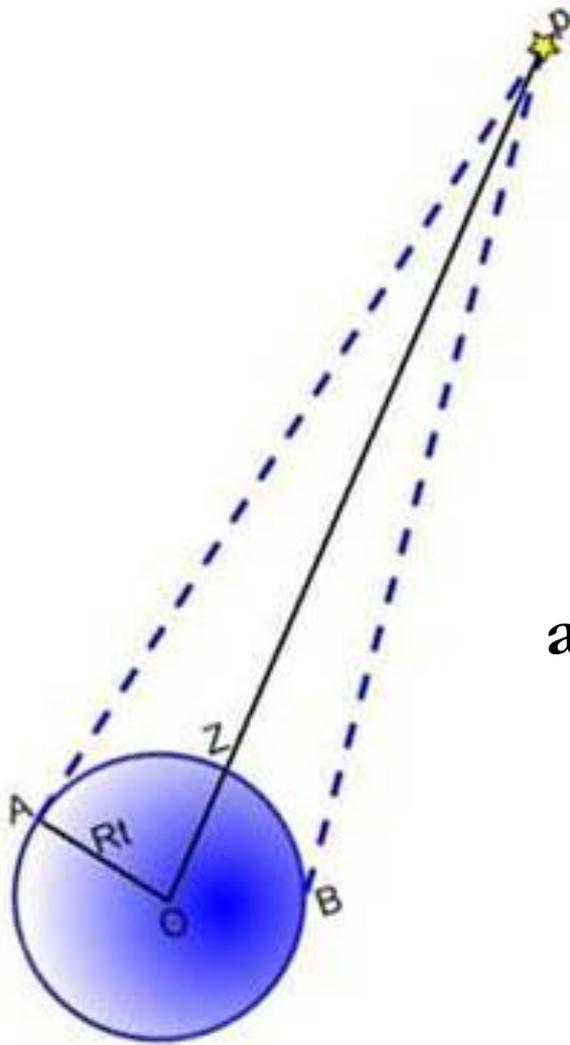
La luminosité des étoiles va suppléer la triangulation pour les étoiles éloignées



Plus une étoile est loin, moins elle est brillante (→ parallaxe photométrique)



L'astrométrie: comment ça marche?



La parallaxe diurne

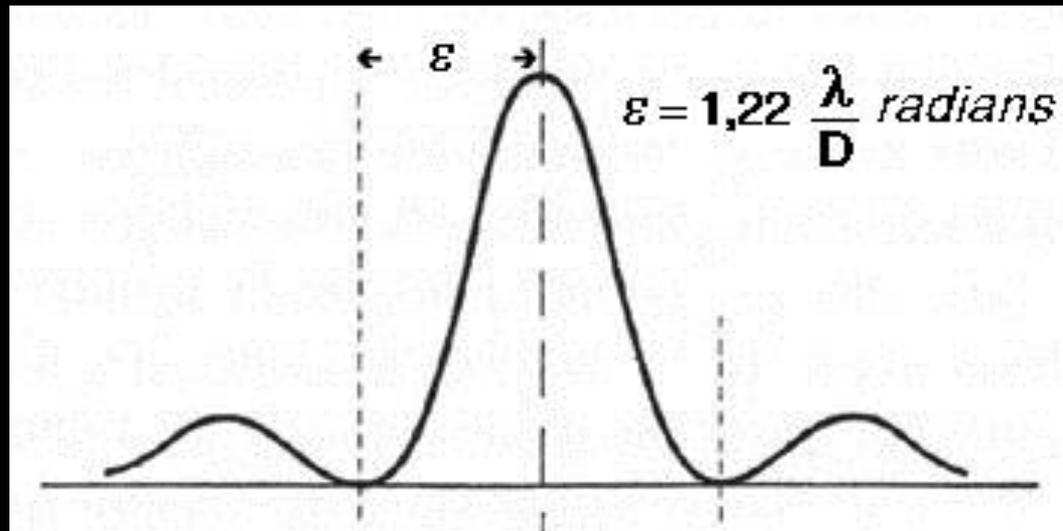
L'astrométrie, c'est mesurer des angles pour obtenir des parallaxes, c'est mesurer des positions angulaires sur la sphère céleste

Parallaxe de la Lune = 1 degré = 3600 "

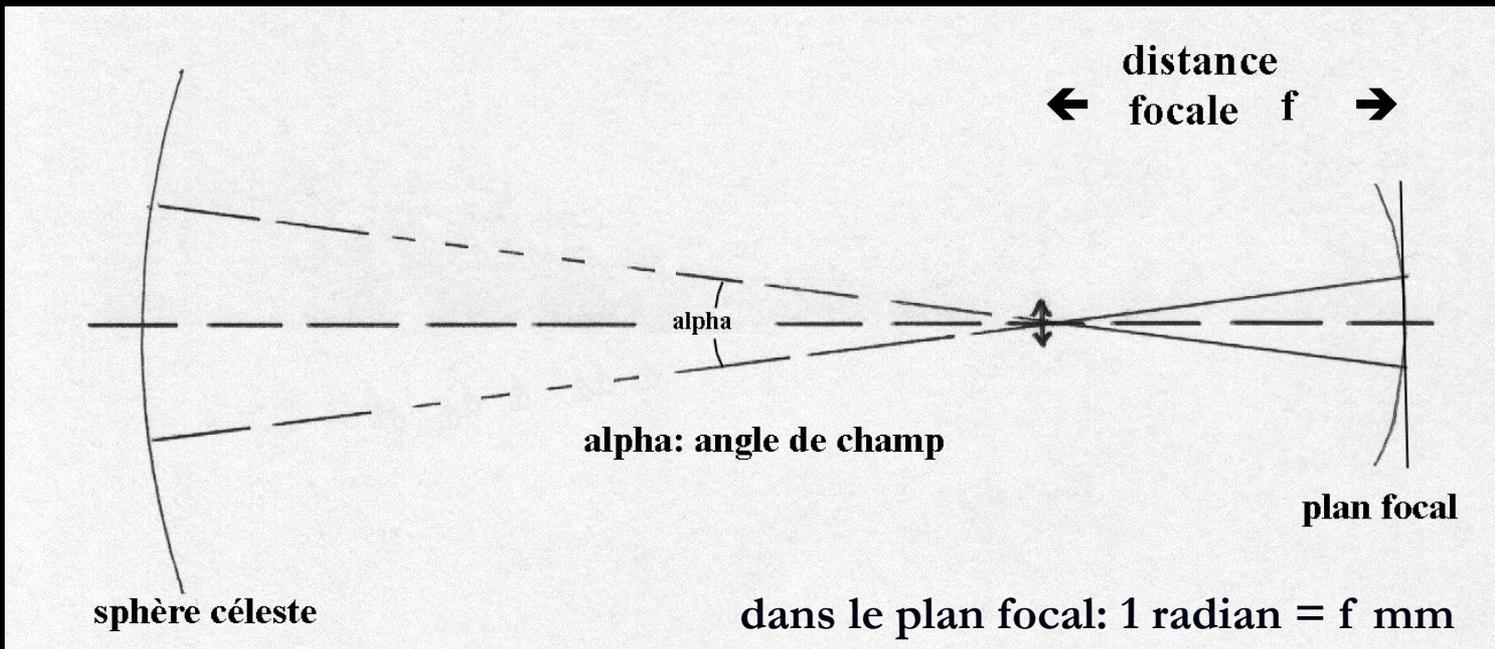
Parallaxe du Soleil = 8 "

Parallaxe de Jupiter = 1,5 "

(0,5° = 1800 ")



Un point → une tache de diffraction au foyer



Résolution:

La résolution concerne la faculté de distinguer des détails sur une image astronomique.

Un point → une tache dont le diamètre dépend de la taille du télescope

Il est impossible de distinguer deux points dont la distance est inférieure à la taille de la tache: c'est la résolution du télescope utilisé .

Exemples:

Télescope de 30 cm de diamètre: 0,46 seconde de degré

Télescope de 1m de diamètre: 0,14 seconde de degré

Télescope de 10 mètres de diamètre: 0,02 seconde de degré

Précision:

La précision concerne la mesure d'une position angulaire par rapport à une référence (des étoiles ou un repère lié aux étoiles ou au mouvement du Soleil et de la Terre). Elle dépend de l'importance des distorsions des images au foyer du télescope et des possibilités de correction.

Exemples:

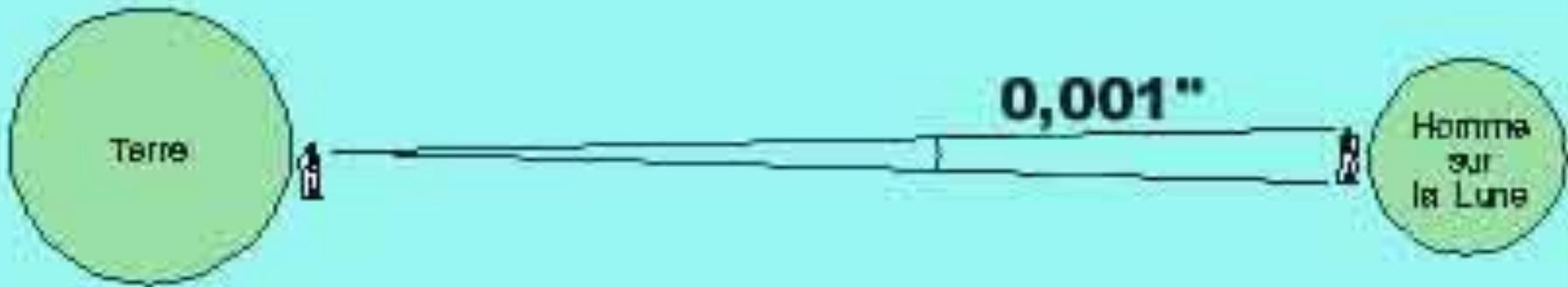
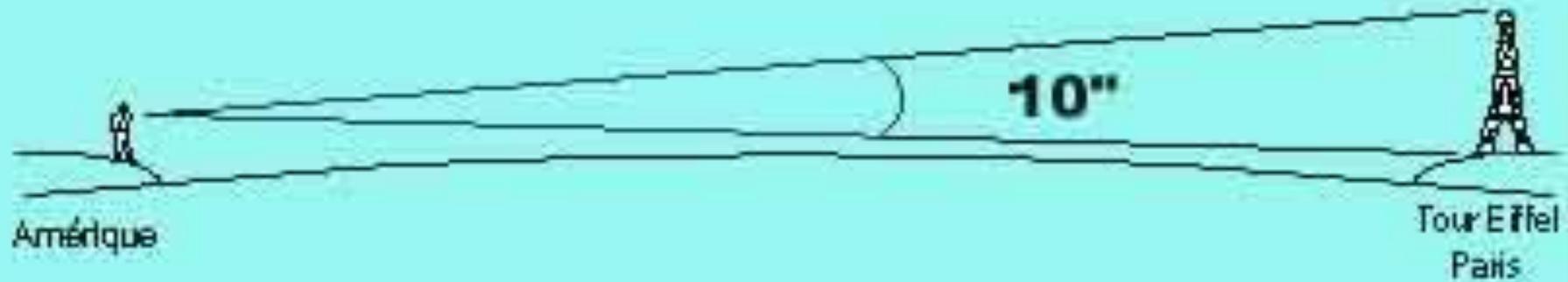
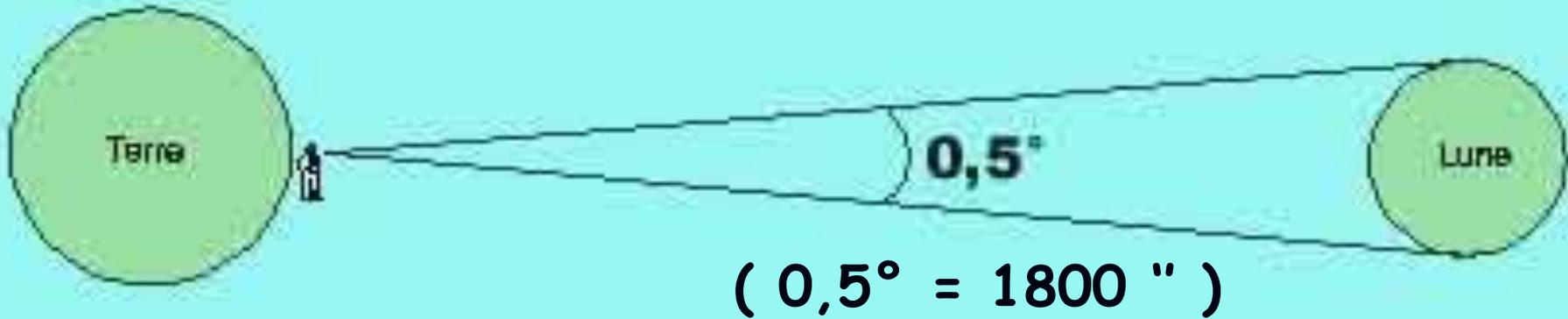
Télescope de Schmidt: 0 ".100

Télescope longue focale: 0".010

Hipparcos: 0".001

Gaia: 0 ".000001

La mesure des angles, précision, résolution



Angle apparent + taille \rightarrow distance

Historique de la précision de mesure

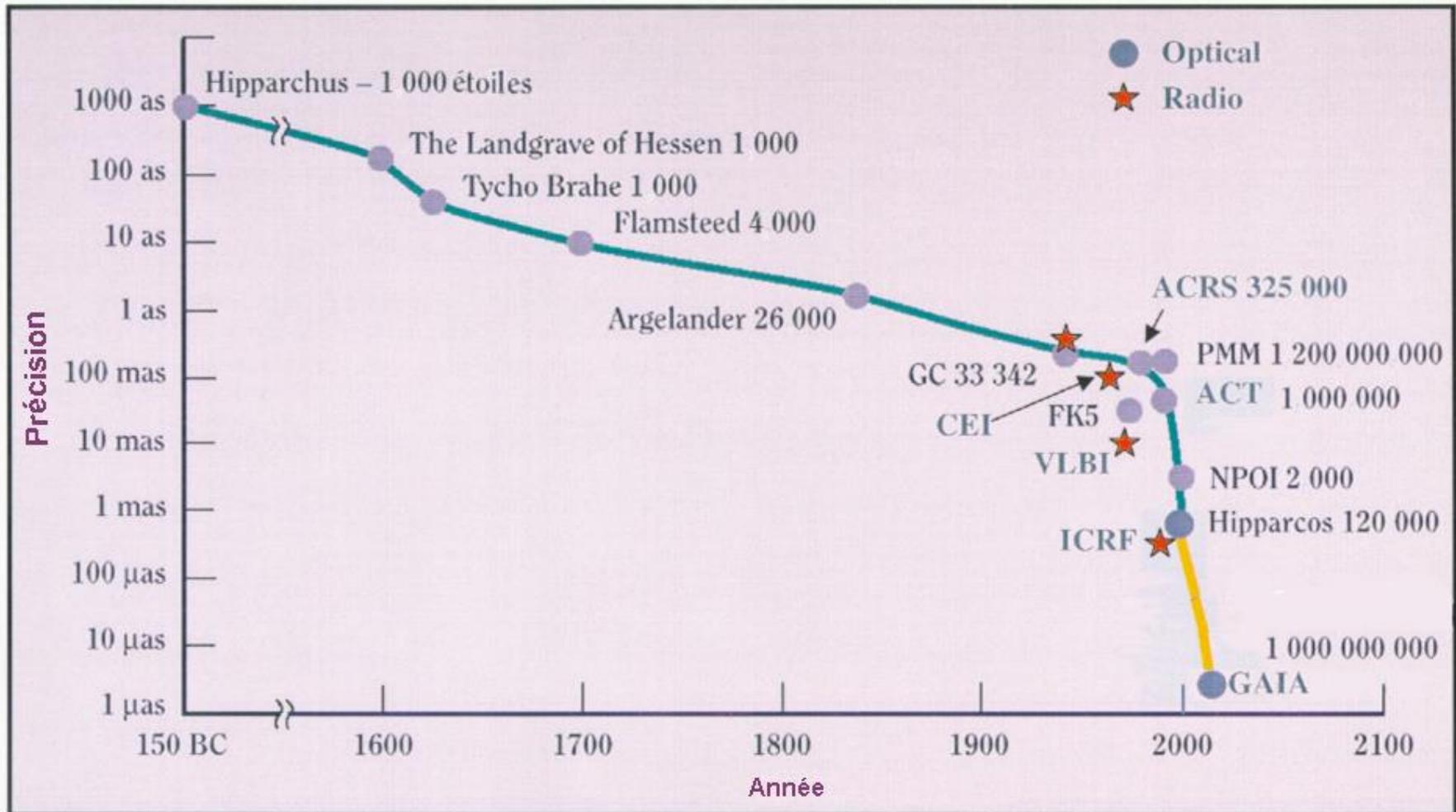
À l'œil nu:

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

Avec un télescope:

- 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

La précision des catalogues d'étoiles



Précision et exactitude des observations

- Qu'est-ce qu'une mesure?

Évaluer une quantité avec un étalon

- Précision de la mesure (erreur interne)

Soin avec lequel on effectue la mesure; les erreurs sont aléatoires dépendant de la technique utilisée

- Exactitude de la mesure (erreur externe)

Proximité de la « réalité » que l'on déterminera à partir de mesures indépendantes afin d'éliminer les biais des mesures

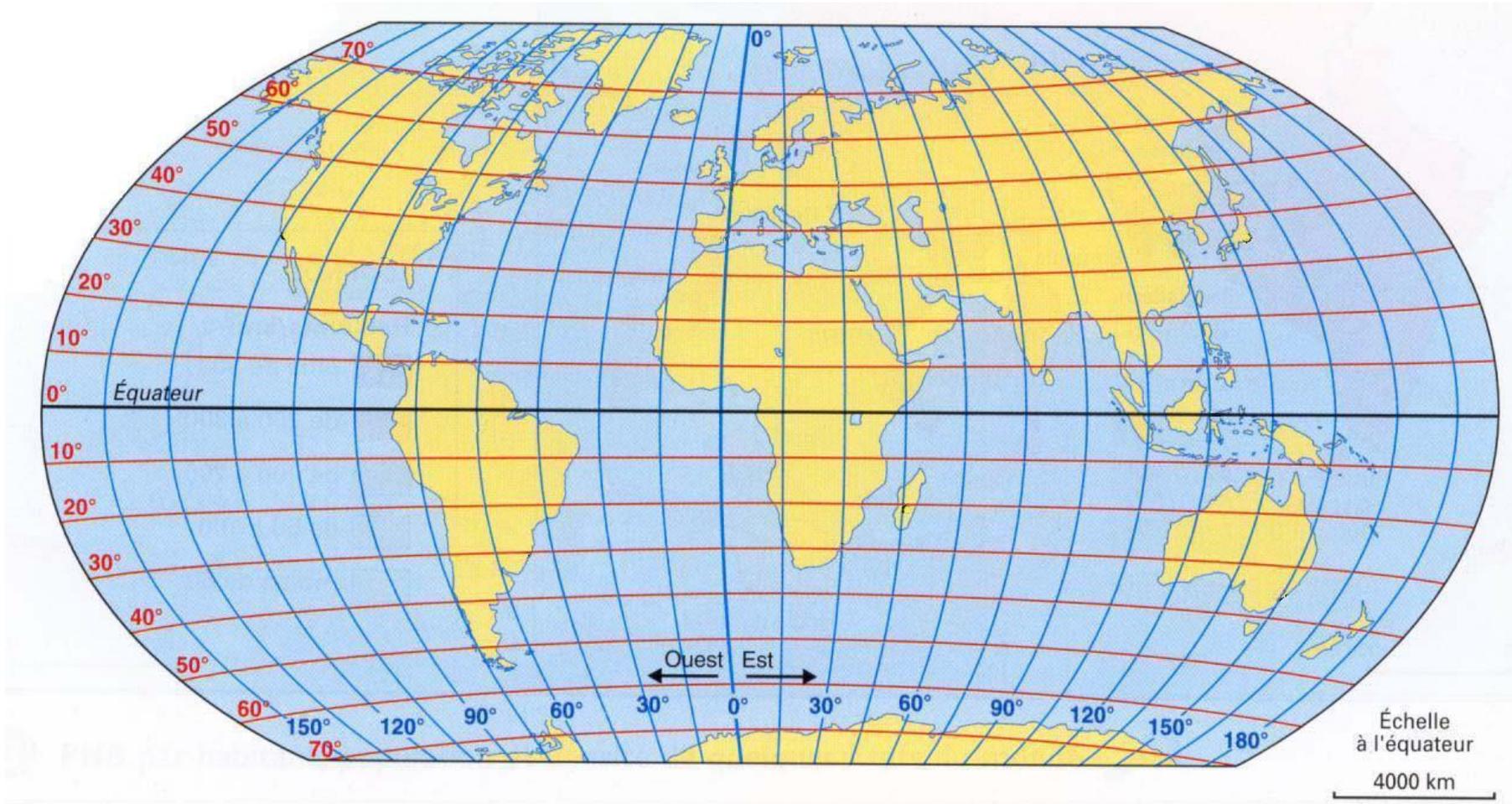
Trois techniques d'astrométrie: une mesure angulaire, une datation ou une mesure directe de distance

- **Comment mesurer la position d'un objet:**
 1. Mesurer un angle sur le ciel par rapport à une référence (dans le ciel ou au sol)
 2. Observer un phénomène donnant une configuration géométrique particulière à un instant bien défini par rapport à un corps connu (Lune, planète, ...) ou à une référence
 3. Mesurer la distance à l'objet par radar ou par radioscience
- **La méridienne associe les points 1 et 2**

Deux méthodes de mesure angulaire: positionnement absolu ou relatif

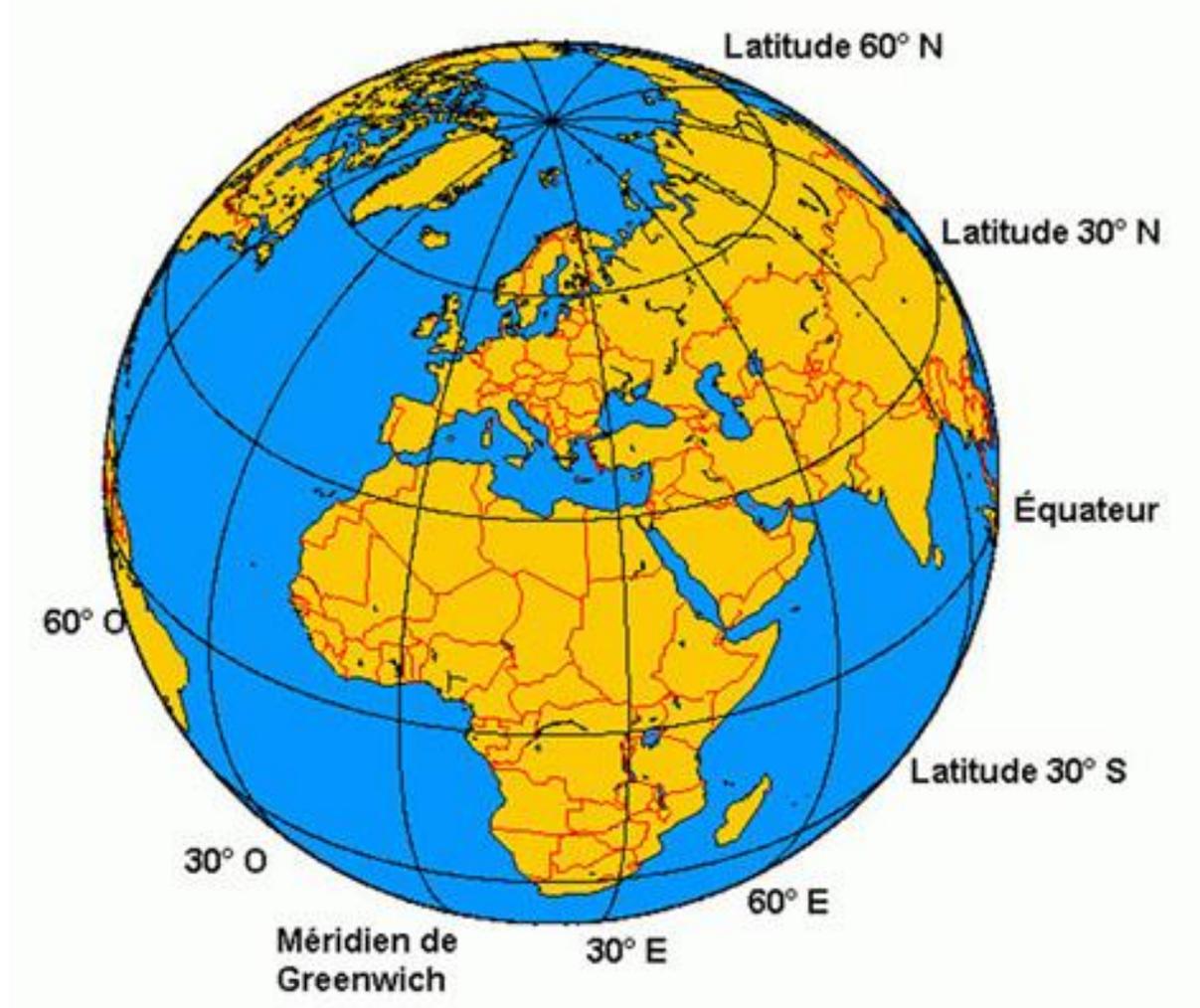
- Comment mesurer la position d'un objet:
 - Par rapport au référentiel de l'observateur
 - Par rattachement à des astre proches connus
- Dans les deux cas, il faut se ramener à un référentiel commun espace-temps pour tous les observateurs

Comment mesurer des positions: rappel: les coordonnées géographiques



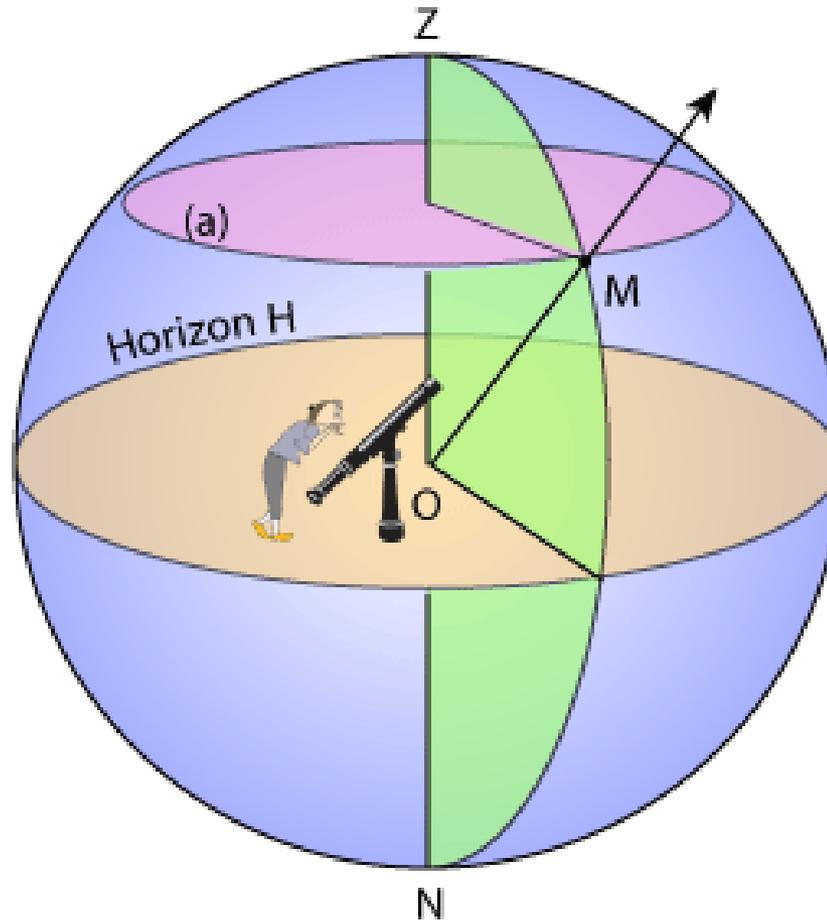
un système permettant de se localiser sur Terre

Comment mesurer des positions: rappel: les coordonnées géographiques



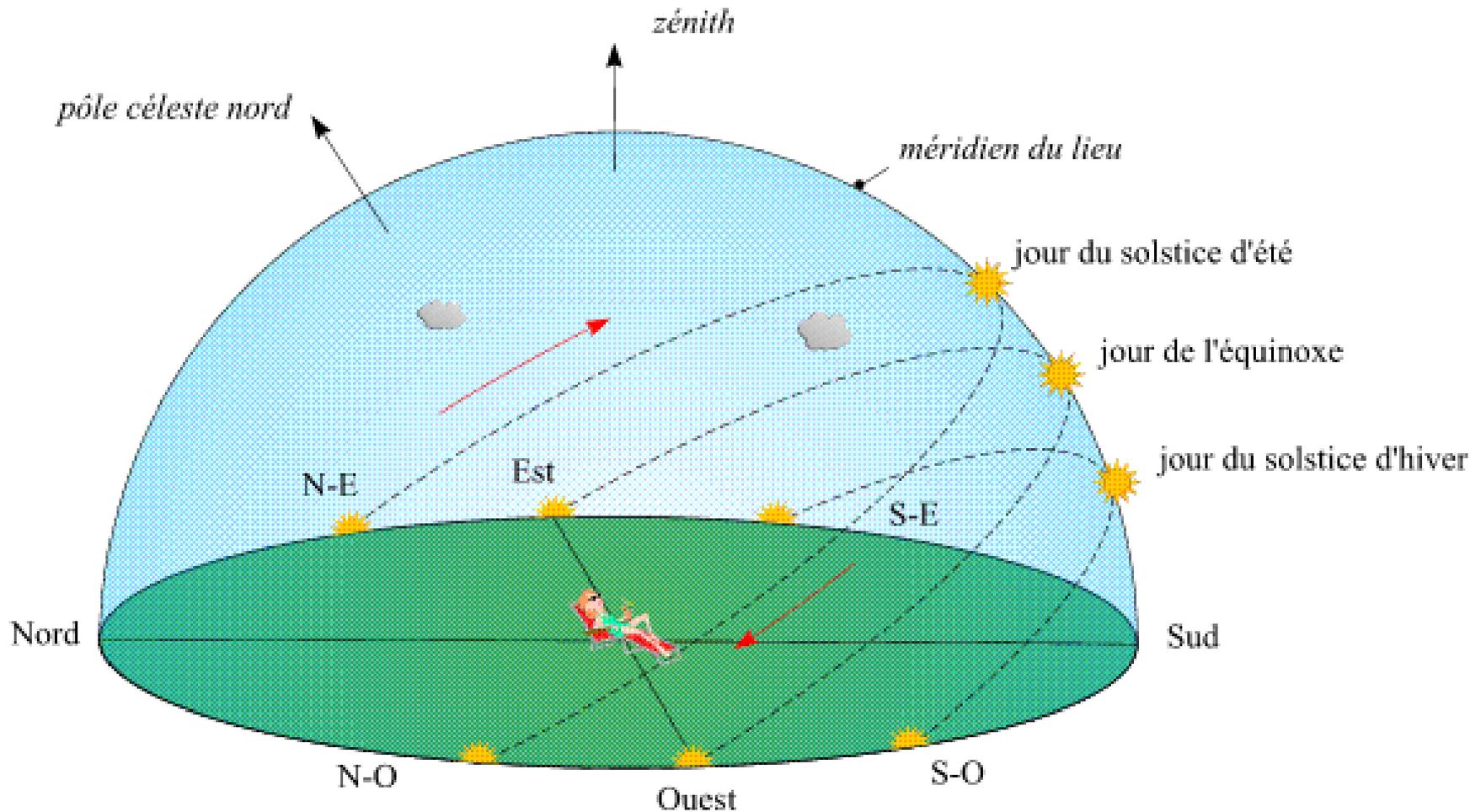
un système permettant de se localiser sur Terre

Un système pour se repérer



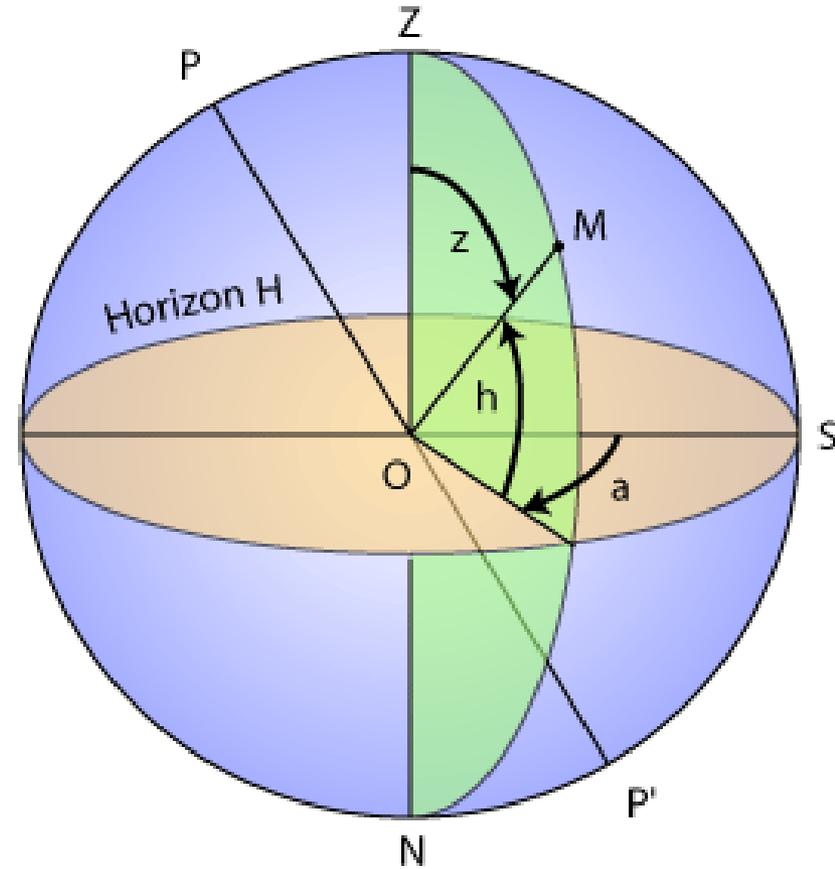
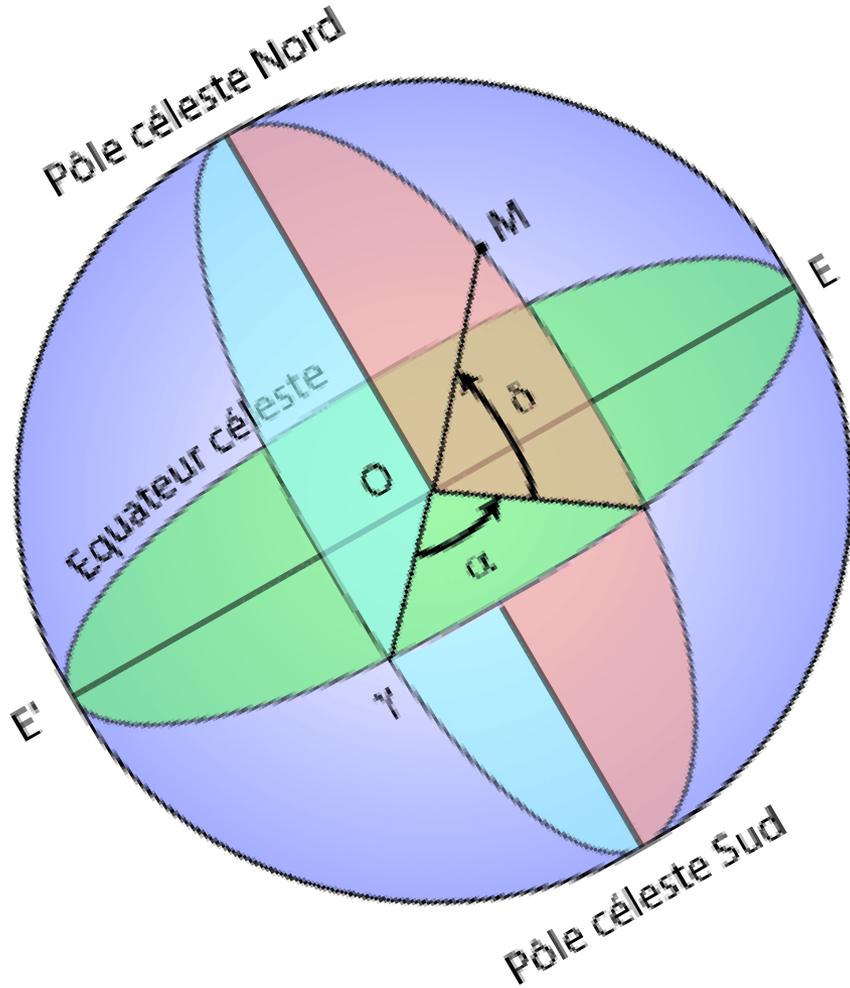
Un système qui dépend de chaque lieu d'observation

Le mouvement apparent du Soleil et des étoiles



dessine un nouveau référentiel local

Un système commun pour tous

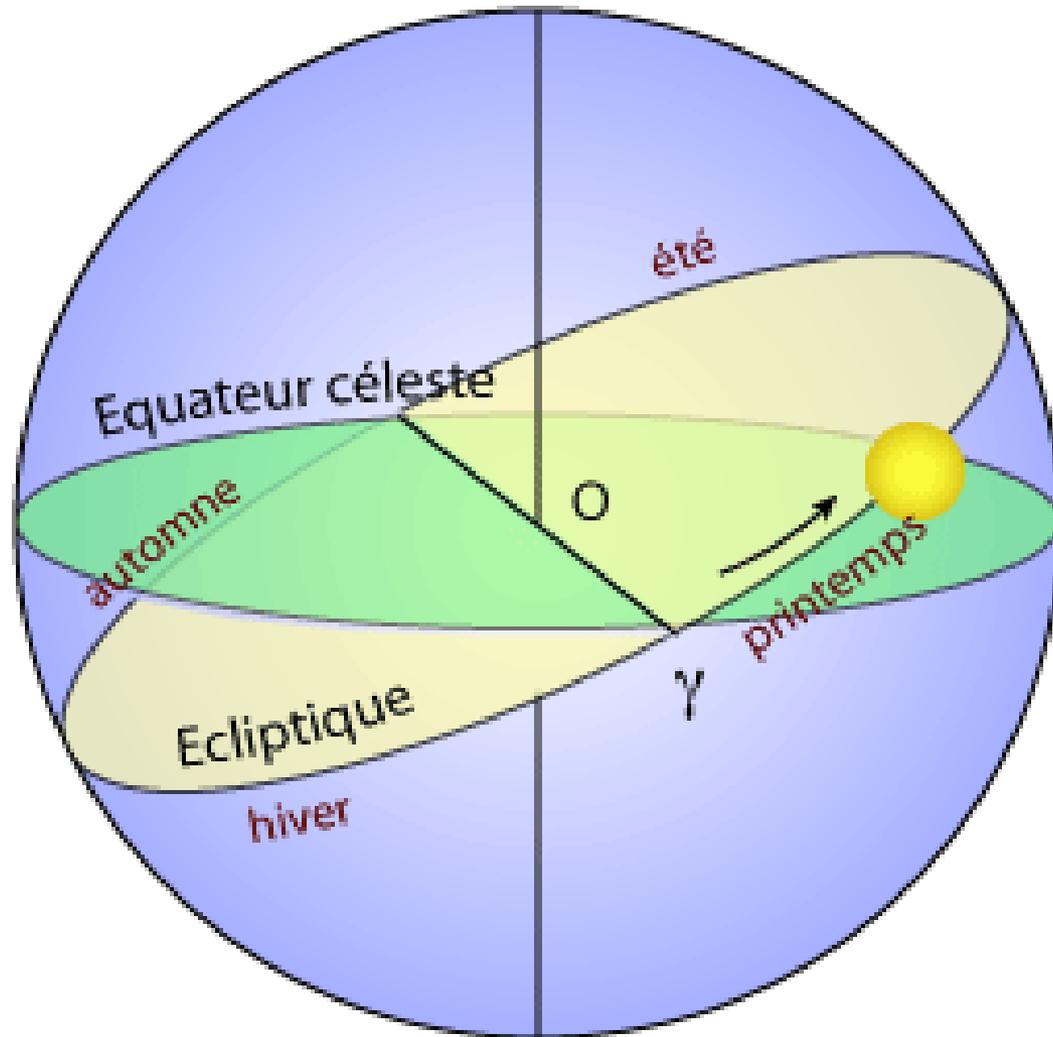


Référentiel: équatorial

local

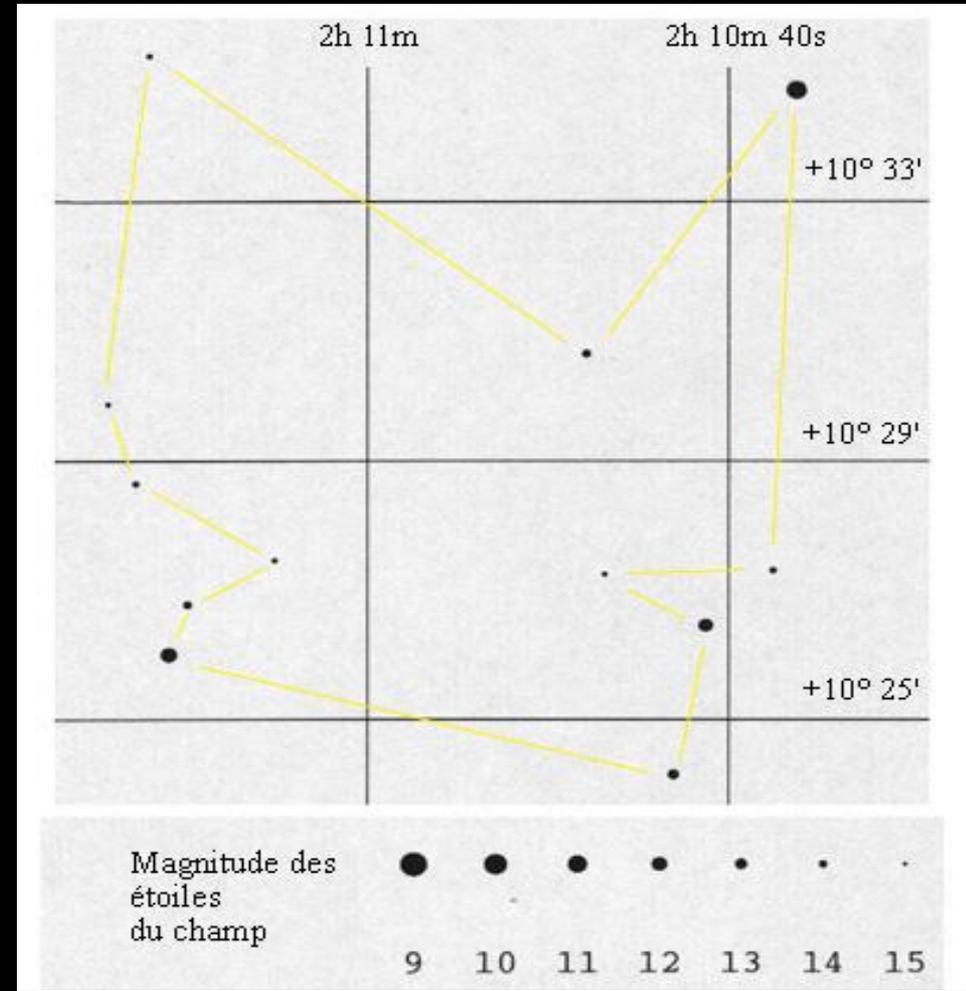
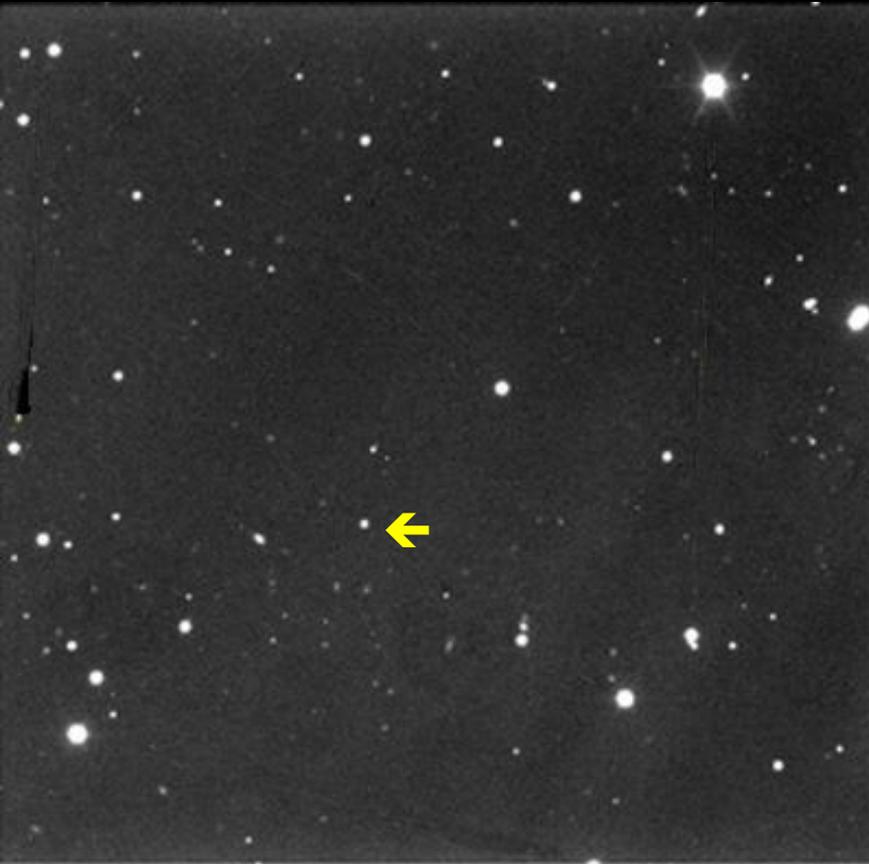
Trouver une origine (des longitudes) dans un ciel où tout bouge!

Pôle céleste Nord

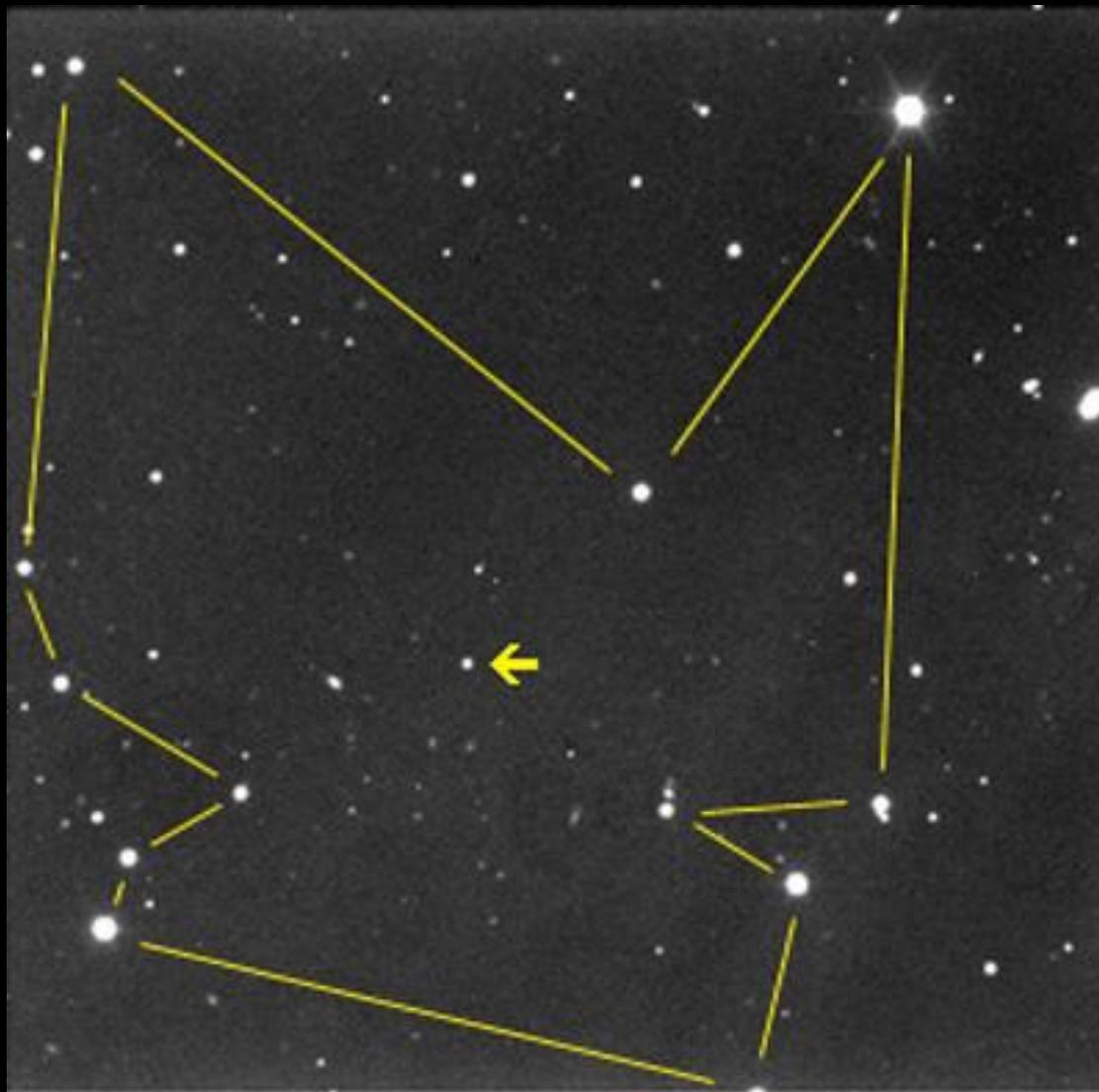


Pôle céleste Sud

Utiliser les étoiles pour obtenir les positions d'un astre: l'imagerie et le rattachement



Comment mesurer la position du corps repéré ci-dessus?
Grâce à un catalogue d'étoiles dont on connaît la position.



Repérage des étoiles cataloguées et rattachement du corps inconnu aux étoiles connues

Le rattachement

■ La projection gnomonique

(X et Y: coordonnées « tangentielles »)

$$X = \frac{\cos \delta \cdot \sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \cdot \sin \delta_0 + \cos \delta \cdot \cos \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)}$$

$$Y = \frac{\sin \delta \cdot \cos \delta_0 - \cos \delta \cdot \sin \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \cdot \sin \delta_0 + \cos \delta \cdot \cos \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)}$$

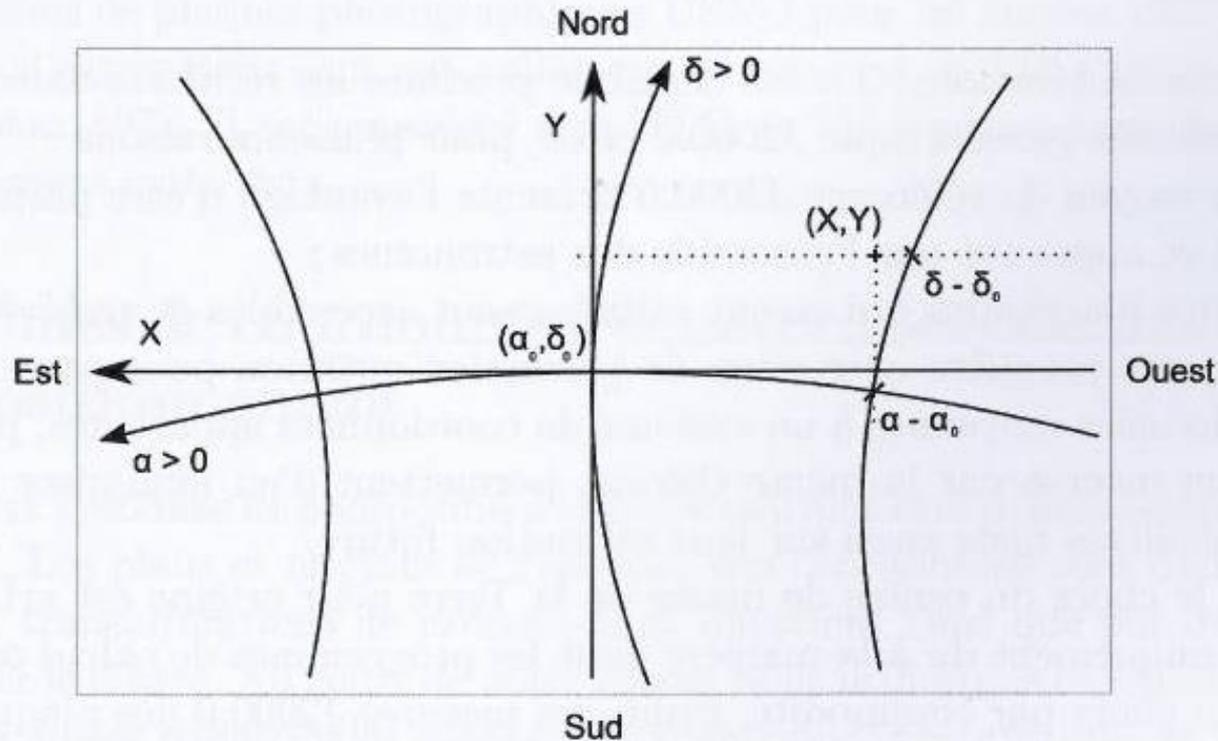
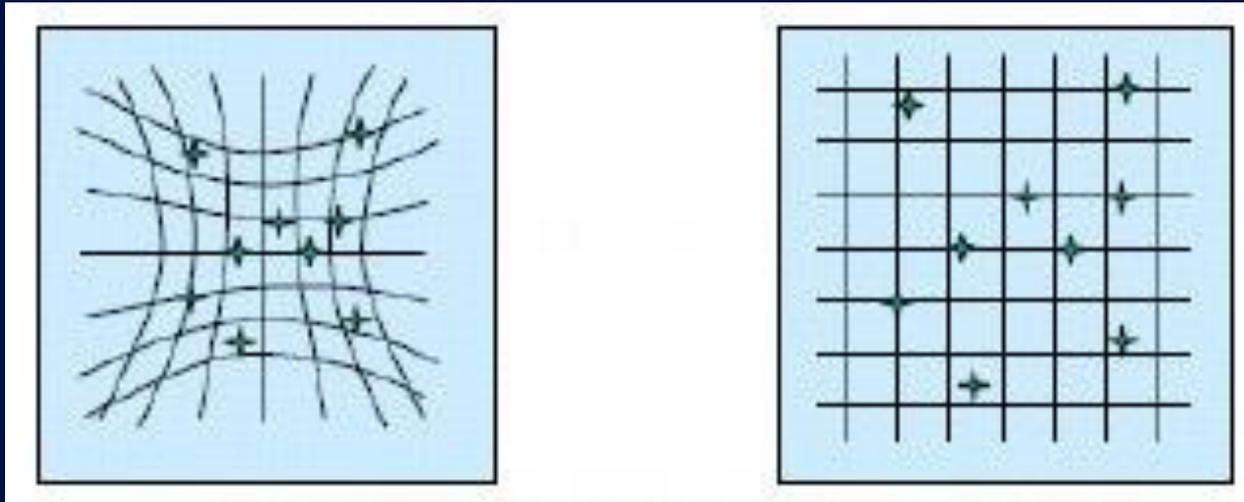


Figure 2.1 – Représentation tangentielle (plane) d'un champ sphérique.

La distorsion du champ



- À gauche, l'image enregistrée
- À droite, le ciel

Le rattachement

Passage des coordonnées x et y mesurées aux coordonnées X et Y « tangentielles » permettant de remonter aux α et δ

X, Y : coordonnées tangentielles théoriques dépendant de α et δ
 x, y : coordonnées mesurées sur l'image

L'échelle du champ:

$$X = a x$$

$$Y = a y \text{ (ou } b y \text{ si l'échelle en } y \text{ est différente de l'échelle en } x)$$

L'orientation du champ (angle θ):

$$X = \cos \theta x + \sin \theta y$$

$$Y = -\sin \theta x + \cos \theta y$$

Les distorsions du champ sont toutes dans:

$$X = ax + by + c + dx^2 + ey^2 + fxy + \zeta_{(x,y)}$$

$$Y = a'x + b'y + c' + d'x^2 + e'y^2 + f'xy + \zeta'_{(x,y)}$$

L'astrométrie par rattachement

- Permet de mesurer α et δ (*) d'un astre
- Dans le repère des étoiles utilisées pour le rattachement

(*): α = ascension droite (ou « longitude » céleste)

(*): δ = déclinaison (ou « latitude » céleste)

Les buts de l'astrométrie

- Catalogues d'étoiles et systèmes de référence
- Parallaxe, distance des étoiles
- Mouvement propre des étoiles
- Dynamique galactique, groupe local
- Cosmologie, rotation des galaxies
- Étoiles doubles, paramètres orbitaux
- **Mécanique céleste des corps du système solaire →**

Les buts de l'astrométrie des corps du système solaire

- Navigation des sondes spatiales (éphémérides)
- Dynamique, stabilité, évolution, échelle du système solaire
- Surveillance des astéroïdes géocroiseurs (éphémérides)
- Observations du sol et de l'espace (éphémérides)
- Physique des surfaces et de l'intérieur des corps du système solaire (systèmes dissipatifs)
- Gravitation et relativité générale (tests)
- Vitesses radiales et planètes extra solaires
- Systèmes de référence dynamiques

Les outils de l'astrométrie: les catalogues d'étoiles

Date	Nom	Nb d'étoiles	Mag limite	Précision mas	Précision mvts propres	Origine
1997	Hipparcos	120 000	12.4	< 0.78	< 0.88 mas/an	obs. spatiales
2000	Tycho 2	2 500 000	16	< 60	< 2.5 mas/an	de Tycho et 143 sources
1998	USNO A2	526 280 881				
2001	GSC II	19 000 000		360		Plaques Schmidt
2003	USNO B1	1 milliard	21	200		Plaques Schmidt
2004	UCAC 2	48 000 000	7.5 → 16	20 → 70	1 → 7 mas/an	scans
2004	Bright stars	430 000	< 7.5			Hipparcos + Tycho2
2005	Nomad	1 milliard				compilation des meilleures données
2006	Bordeaux	2 970 674	15.4	50 → 70	1.5→6 mas/an	+11° > d > +18°
2003	2MASS	470 000 000	16	60 → 100		Infrarouge K
2016	GAIA	1 milliard	20	< 0.01 mas		obs. spatiales

Les catalogues d'étoiles

- Ils concrétisent les systèmes de référence célestes:
 - Système cinématique reposant sur la moyenne des mouvements des étoiles supposés aléatoires
 - Système dynamique reposant sur le mouvement des astres du système solaire mobiles
 - Système extra galactique reposant sur la position d'objets lointains supposés fixes: les quasars

L'astrométrie par rattachement

- Utiliser les positions des étoiles de catalogue pour rattacher l'objet observé
- Mais comment a-t-on obtenu les positions des étoiles de catalogue sans rattachement?
 - avec des lunettes méridiennes!

Conclusion

- L'astrométrie est une quête sans fin, la précision n'ayant pas de limite, faisant apparaître de nouvelles interrogations
- L'astrométrie du système solaire nécessite un suivi continu non assuré actuellement par les instruments spatiaux, rendant utiles les réseaux de petits télescopes au sol
- Les observations du passé doivent être conservées afin de modéliser les mouvements des étoiles
- L'astrométrie a eu besoin d'instruments fiables comme les lunettes méridiennes.