

L'astrométrie: mesurer l'univers

J.-E. Arlot

Astronome à l'observatoire de Paris/IMCCE



Qu'est-ce que l'astrométrie

- C'est la mesure du ciel pour:
 - Se repérer
 - Comprendre l'univers
 - Différencier ce qui est mobile de ce qui est fixe
 - Savoir si ce qui est fixe l'est vraiment
 - Comprendre les mouvements de ce qui est mobile
 - Mesurer les distances aux corps célestes
- La mesure, c'est la précision de mesure
- La mesure, c'est une précision et une exactitude

Plan du cours

- Comment l'astrométrie décrit l'univers
 - De l'univers statique géocentrique au big-bang
- Les techniques de l'astrométrie
 - D'Abbadia à Gaia





Qu'est-ce que c'est?



Dragon

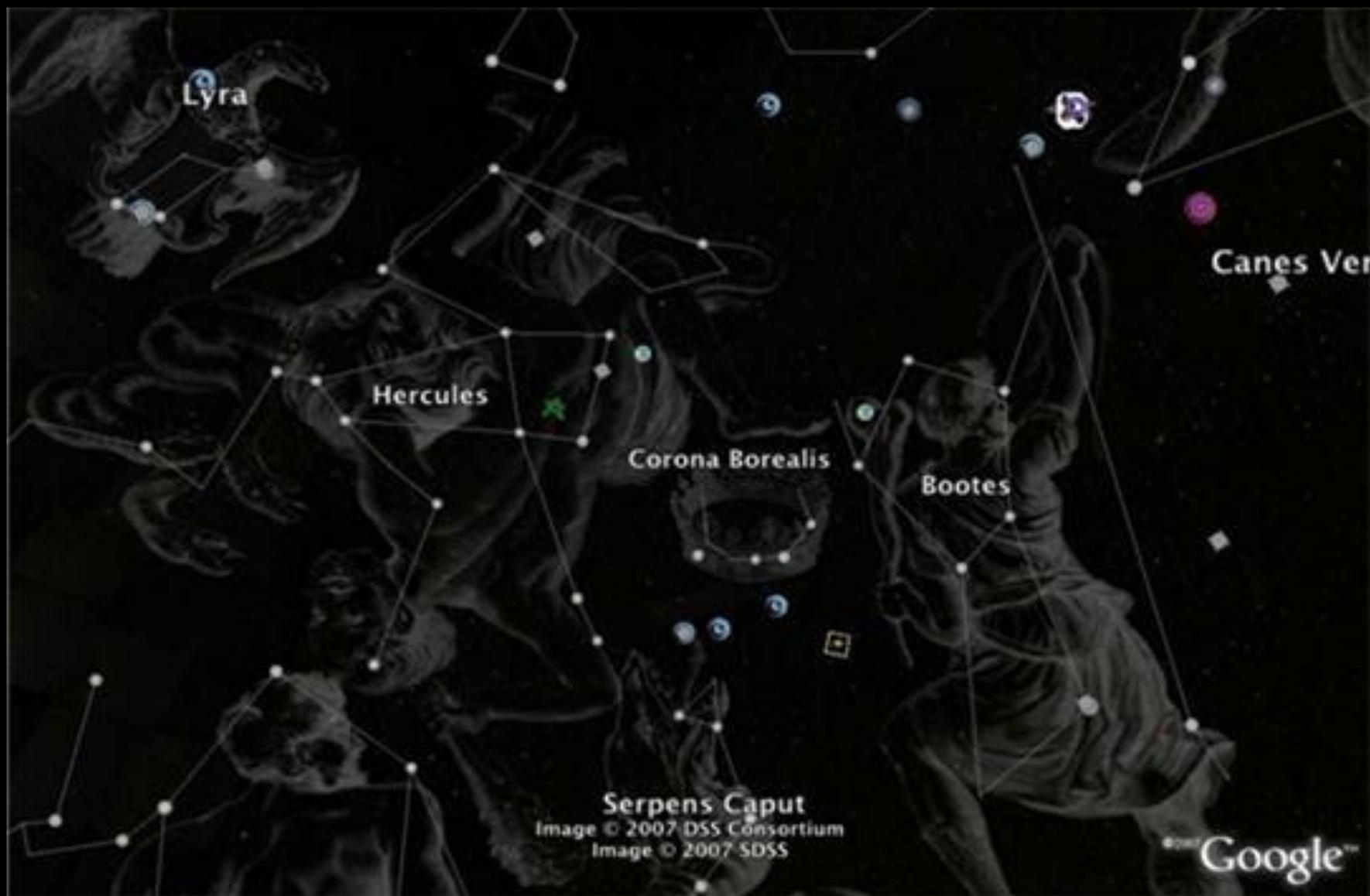
Grande Ours

Petite Ours

Polaris

Céphée

Cassiopée



Lyra

Hercules

Corona Borealis

Bootes

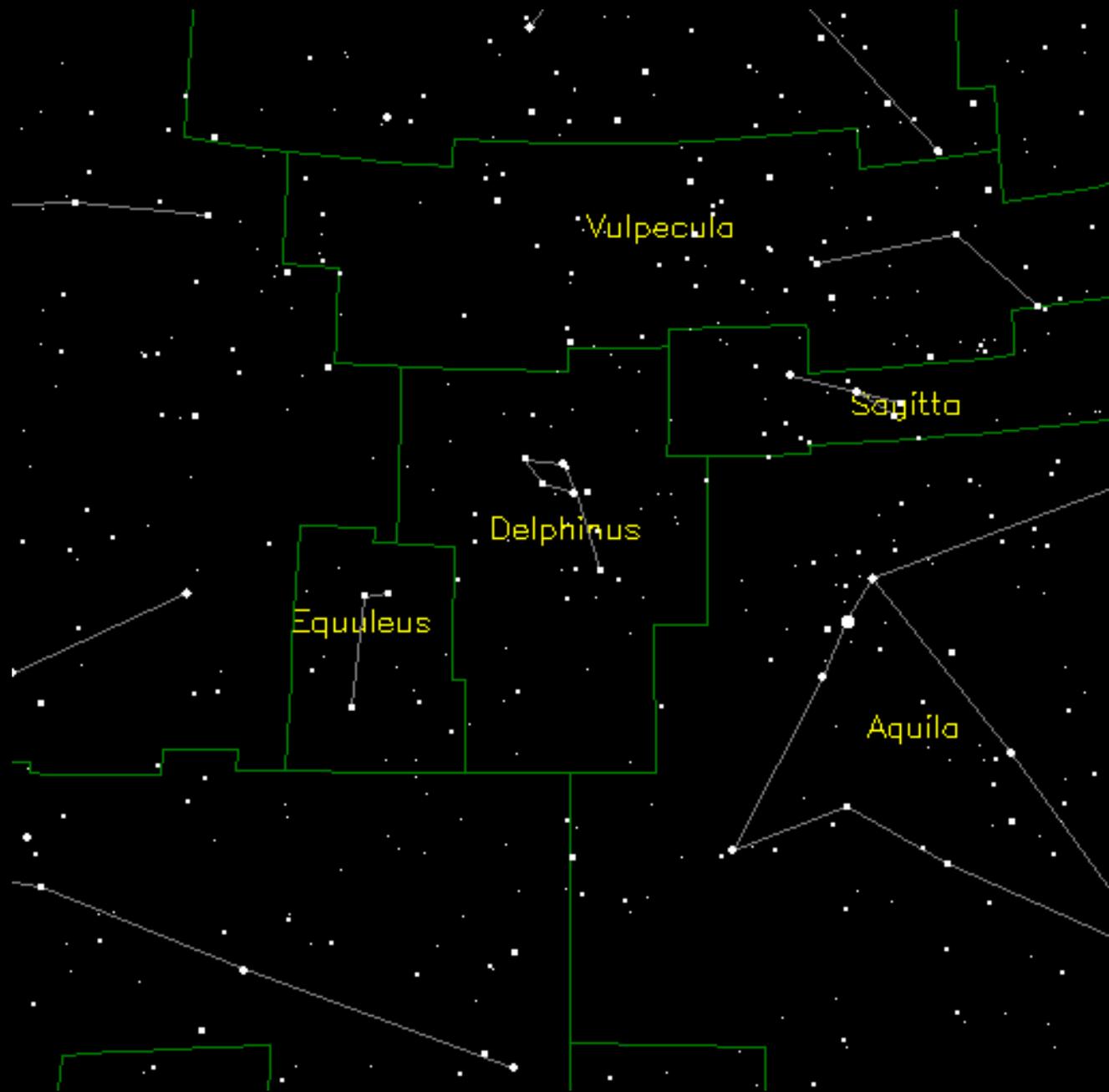
Canes Ven

Serpens Caput

Image © 2007 DSS Consortium

Image © 2007 SDSS

2007 Google™



Vulpecula

Sagitta

Delphinus

Equuleus

Aquila

Les constellations



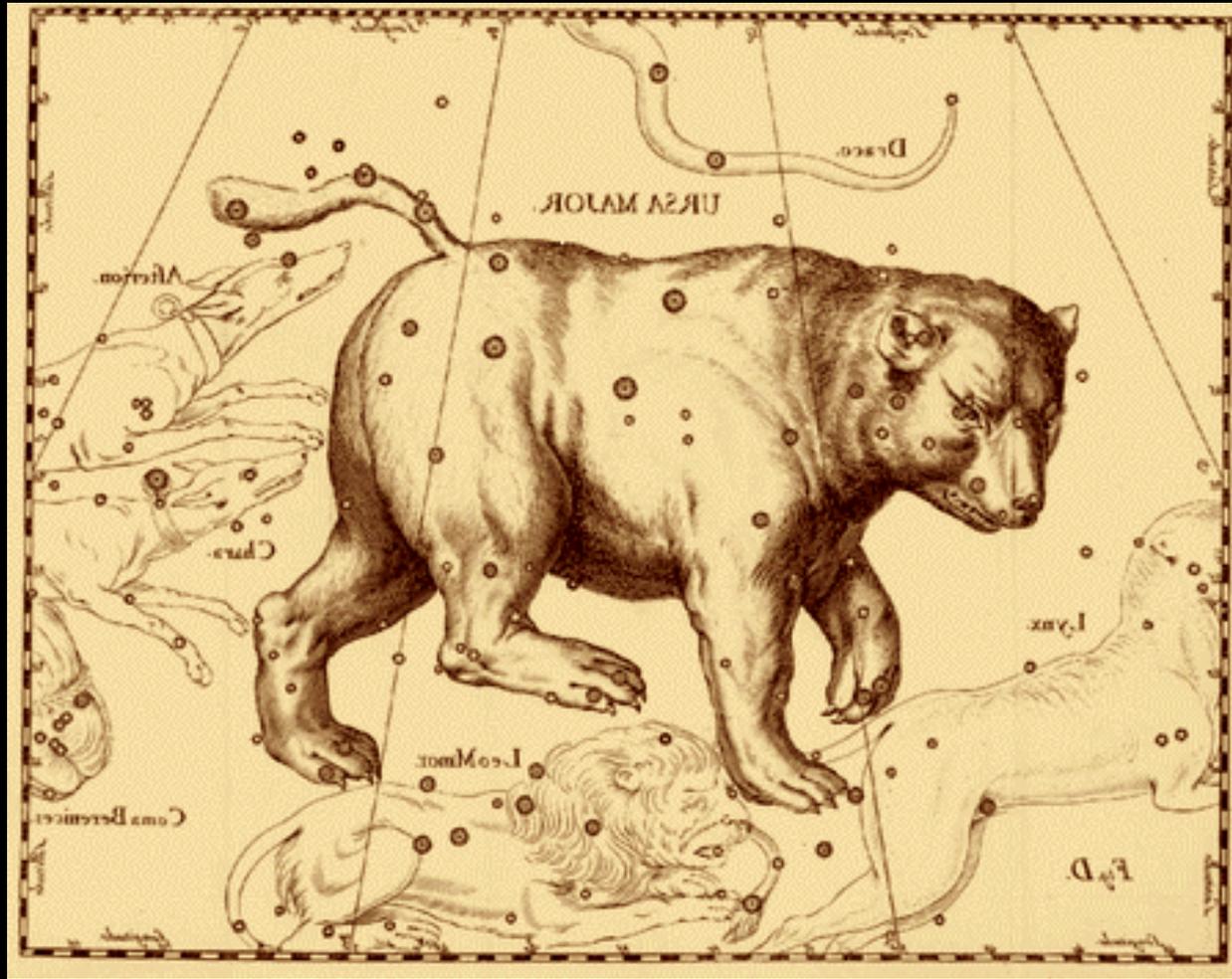
Ursa Major

La Grande Ourse

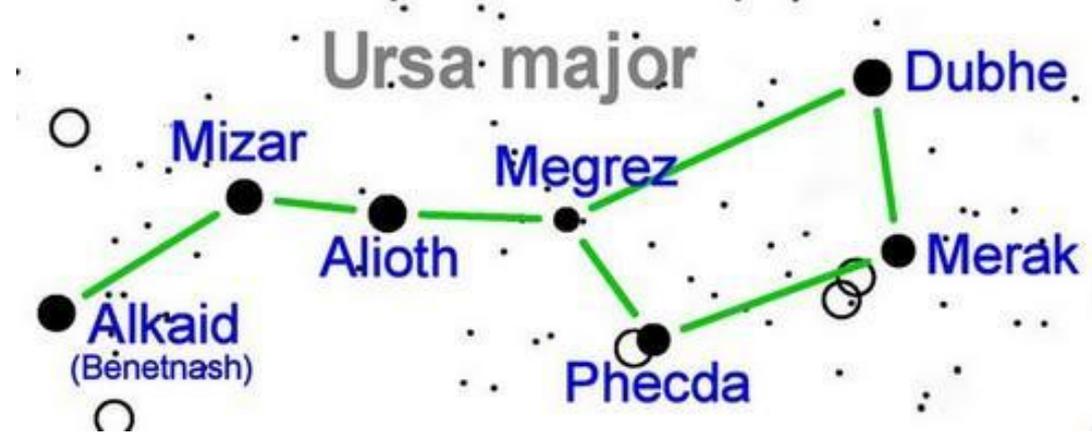
Les sept étoiles principales sont interprétées différemment par les différentes civilisations:

- pour la mythologie grecque, cette constellation représenterait Callisto, une nymphe aimée de Zeus. L'épouse de Zeus découvre leur relation et changea Callisto en Grande Ourse et son fils Arcas en Petite Ourse condamnées à tourner perpétuellement autour du pôle Nord,
- pour les romains, ce sont sept bœufs qui labourent (septem triones → septentrion)
- pour les arabes, c'est le cercueil d'un père tiré par ses trois filles
- en Inde, ce sont sept sages
- en Perse, ce sont sept trônes
- pour certains indiens d'Amérique du Nord, c'est une ourse poursuivie par trois chasseurs
- La partie supérieure de l'ourse est souvent dite « grande casserole »

La constellation de la « Grande Ourse »



Les noms des étoiles



- 289 étoiles ont des noms dont 232 sont des noms arabes: pourquoi?
- Les Grecs avaient nommé les constellations mais n'avaient nommé que peu d'étoiles (Arcturus, Sirius, Canopus,...)
- Les arabes ont eu besoin de noms pour leurs astrolabes (navigation), noms retranscrits en Occident au Moyen-Age puis à la Renaissance.
- Exemple: dans la *Grande Ourse* dont *Méarak* est le "Bas-ventre", *Phecda* la "Cuisse" et *Mégrez* la "Racine de la queue".

À quoi servent les étoiles et constellations?

- À se repérer sur Terre
- À faire le point en mer
- À mesurer et cartographier les territoires

- C'est stratégique pour les pouvoirs en place
- Mais on ne saura vraiment les utiliser qu'à partir du XVIIIème siècle!
- *pourquoi est-ce si difficile?*

À quoi servent étoiles et constellations?

- Parce qu'il faut connaître la correspondance entre les étoiles et la surface de la Terre alors que tout tourne!
- Il faut:
 - connaître la position de la Terre autour de son axe
 - connaître la position des planètes et des étoiles
 - savoir mesurer et conserver le temps avec une certaine précision

À quoi servent étoiles et constellations?

- En dix secondes de temps, la Terre a tourné d'environ 3 km selon la latitude
 - Il faut donc mesurer le temps absolu à trois secondes près pour avoir une précision d'un kilomètre en position
 - Aucune civilisation ancienne n'en a été capable; les cartes anciennes étaient très approximatives et les marins ne s'éloignaient pas des côtes
- On va demander aux astronomes de mesurer le temps et l'espace avec précision : c'est l'astrométrie

A quoi sert l'astrométrie?

- 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 et permet:
 - de se repérer sur Terre et dans le ciel (systèmes de référence)
 - de cartographier la Terre et le ciel 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
- C'est l'augmentation continue de précision qui augmente notre connaissance de l'univers

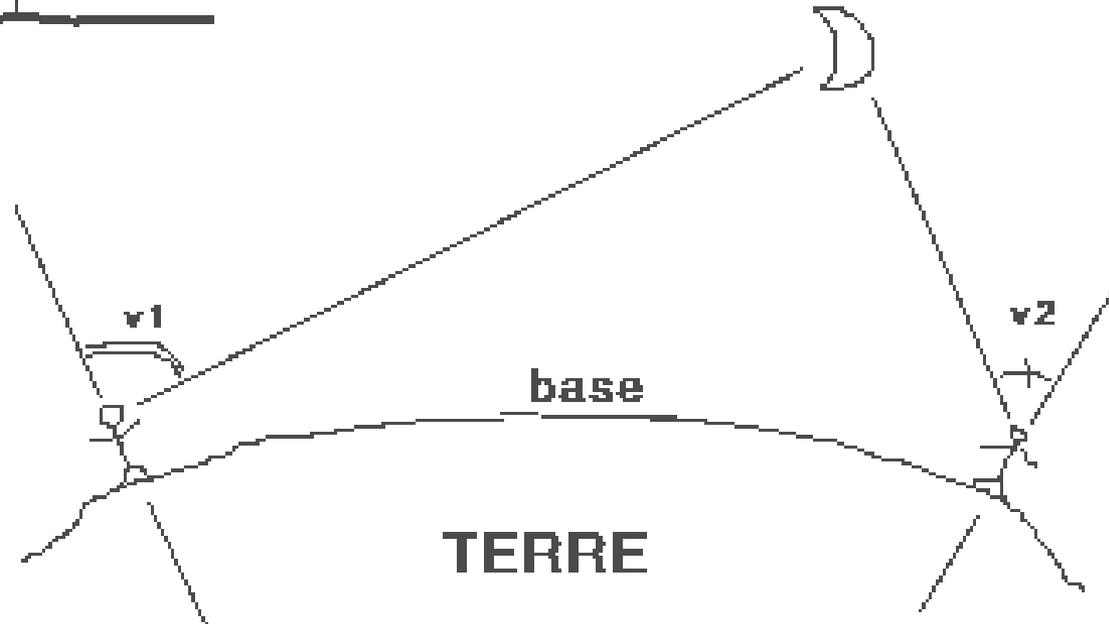
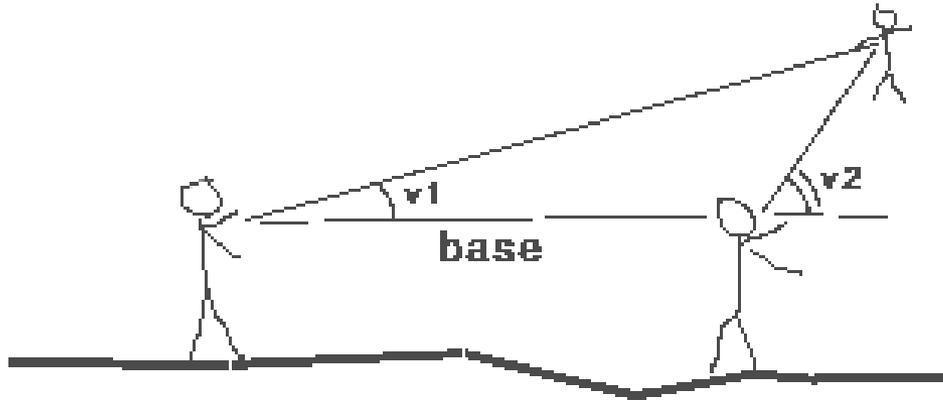




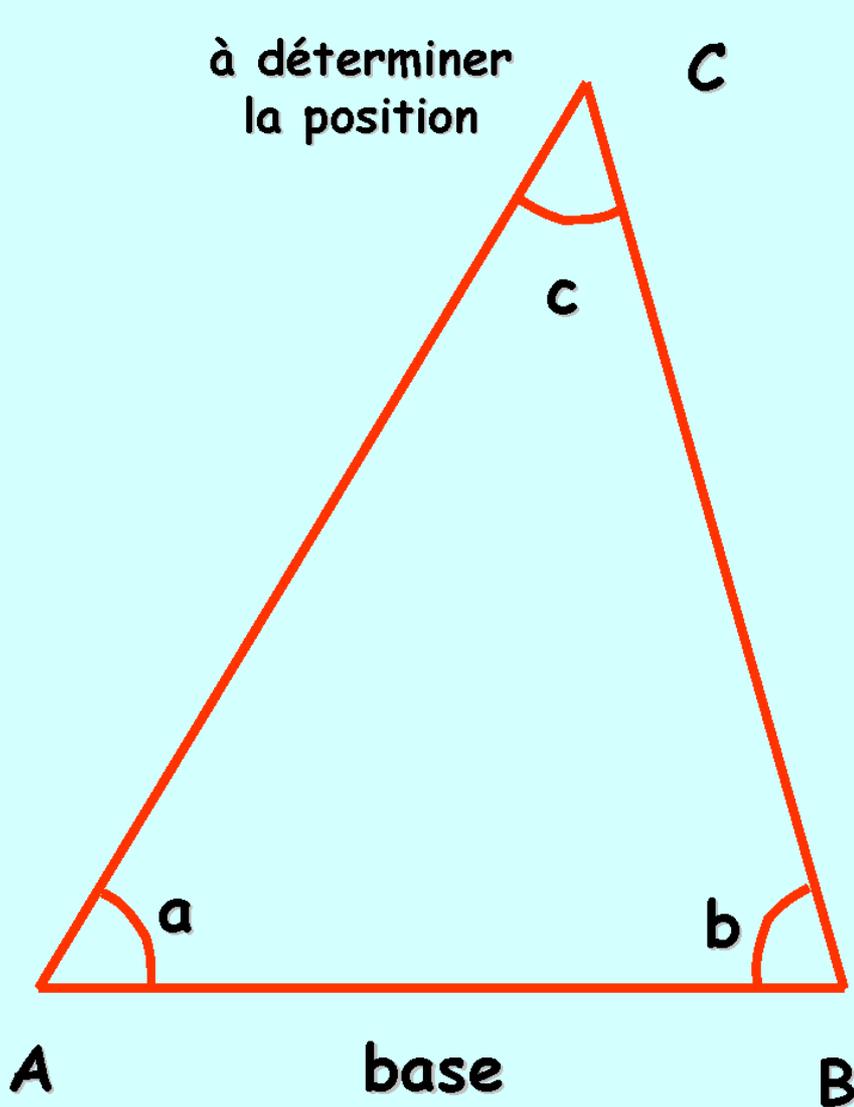


La mesure des distances grâce à la triangulation (une mesure d'angles)

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



Un calcul connu depuis l'antiquité



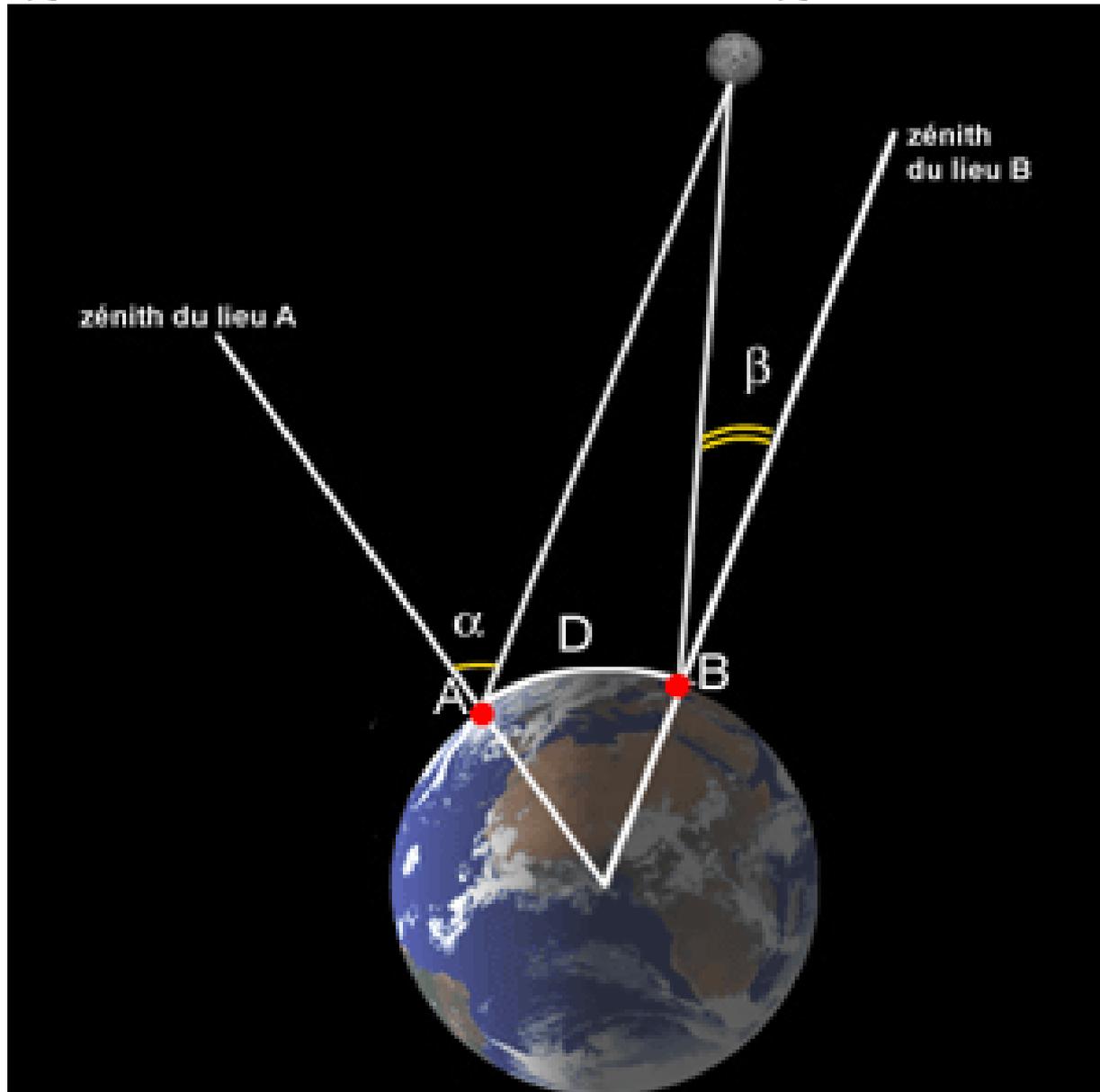
Angles a et b
connus

Distance entre
A et B connue

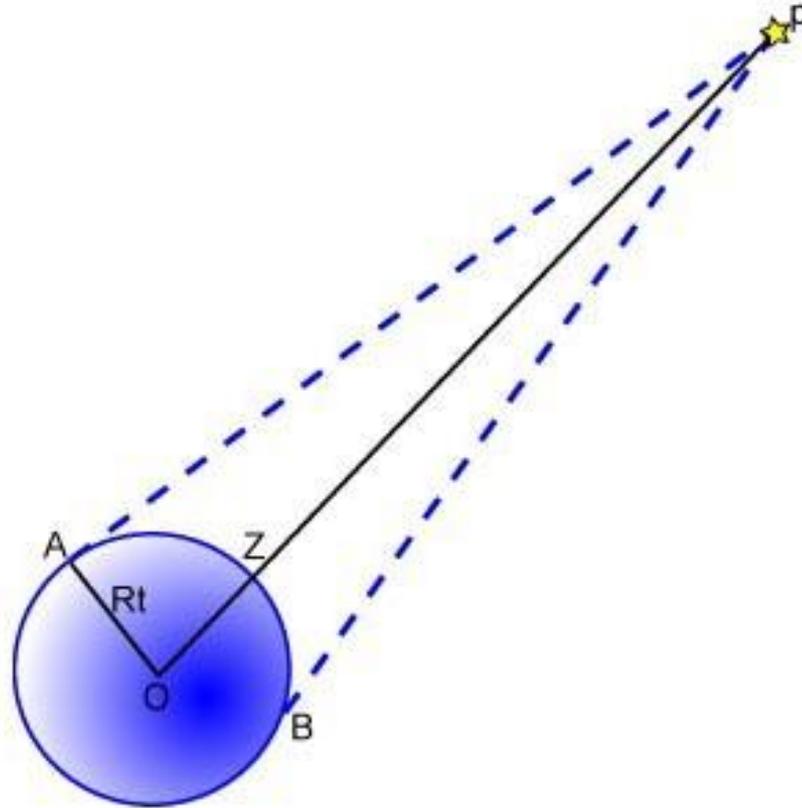
La Trigo :
détermine la
distance au
point C

$$\frac{\sin a}{BC} = \frac{\sin b}{AC} = \frac{\sin c}{AB}$$

L'application aux corps célestes:



La parallaxe horizontale

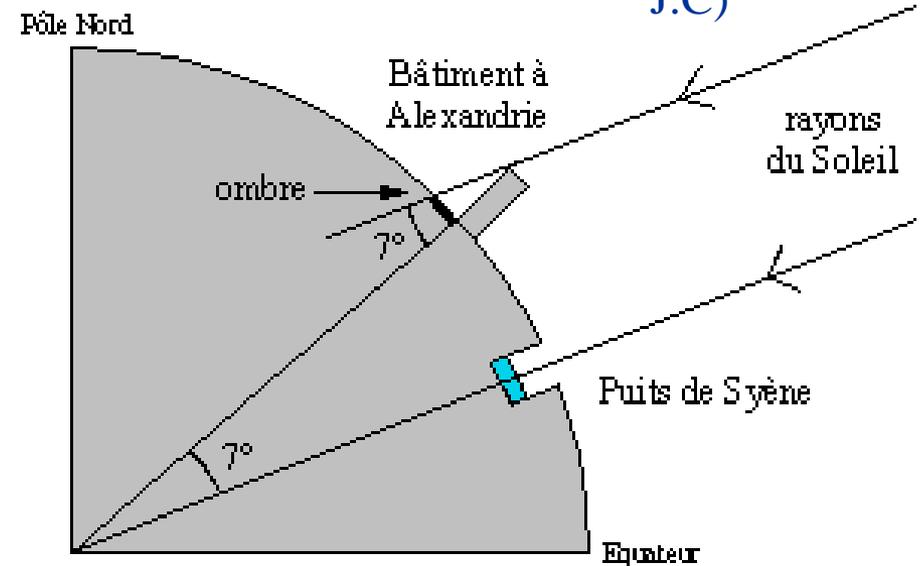


- Les astronomes ne mesurent que des angles:
distance = parallaxe
- parallaxe = changement de la direction de visée d'un astre avec le déplacement de l'observateur

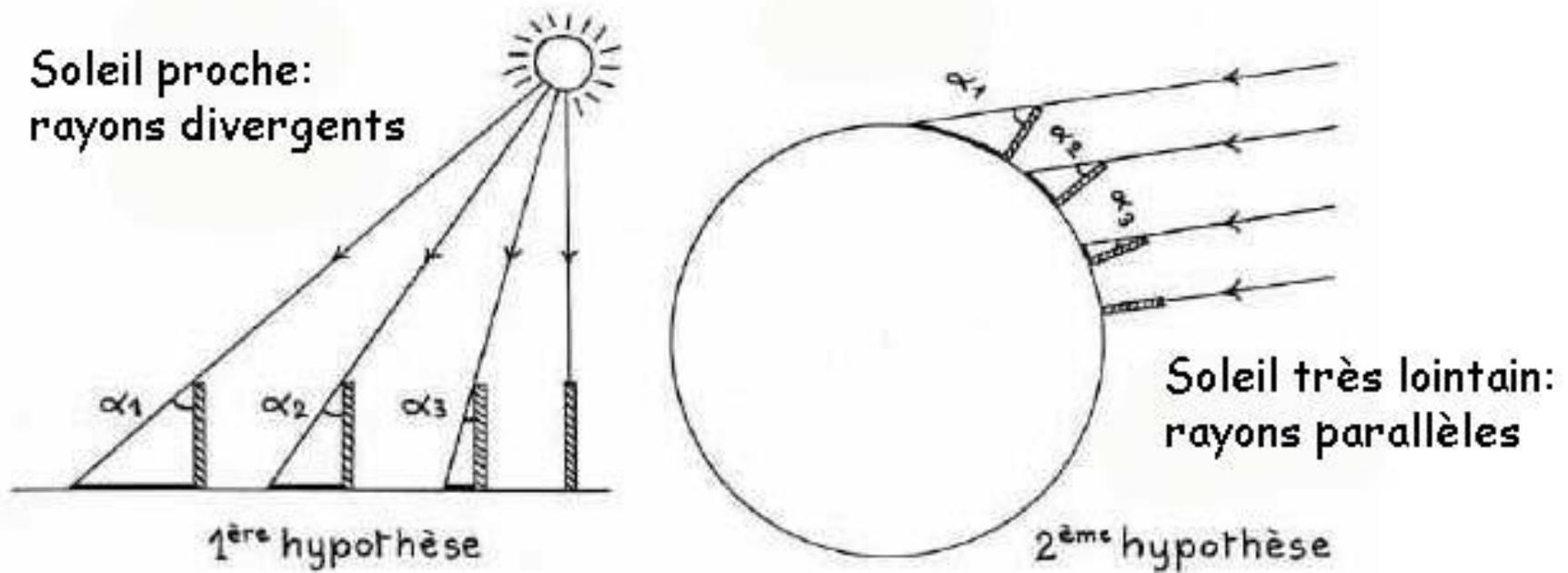
Une observation intéressante en Egypte



Eratosthène
(276 - 194 av.
J.C)



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



Détermination de la distance Terre-Soleil: une parallaxe mesurable pour un calcul de triangulation?

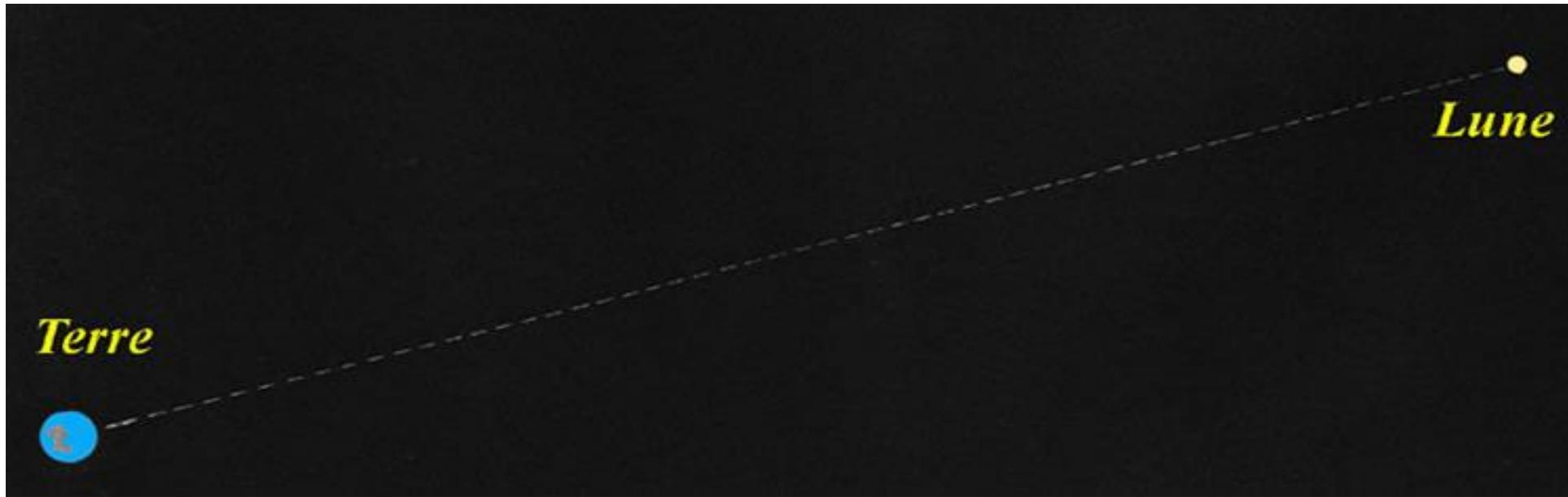
Soit la Terre est plate et le Soleil est à 6300km de la Terre

Soit le Soleil est très loin, la Terre est sphérique et son rayon est de 6300km

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?

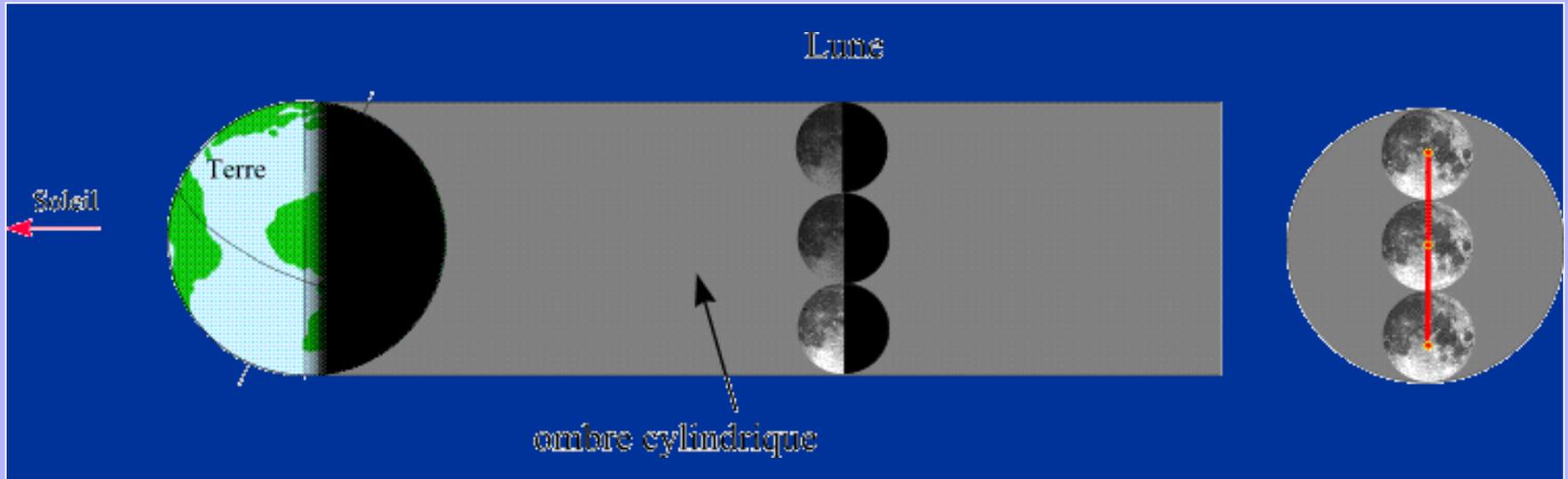
Ne sont-ils pas trop loin? La notion de précision de mesure apparaît et sera toujours présente. Elle est essentielle pour comprendre l'univers.

Utilisons une autre technique pour mesurer la distance Terre-Lune et compenser le manque de précision des instruments de l'époque



Une éclipse de Lune nous donne la distance Terre-Lune

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



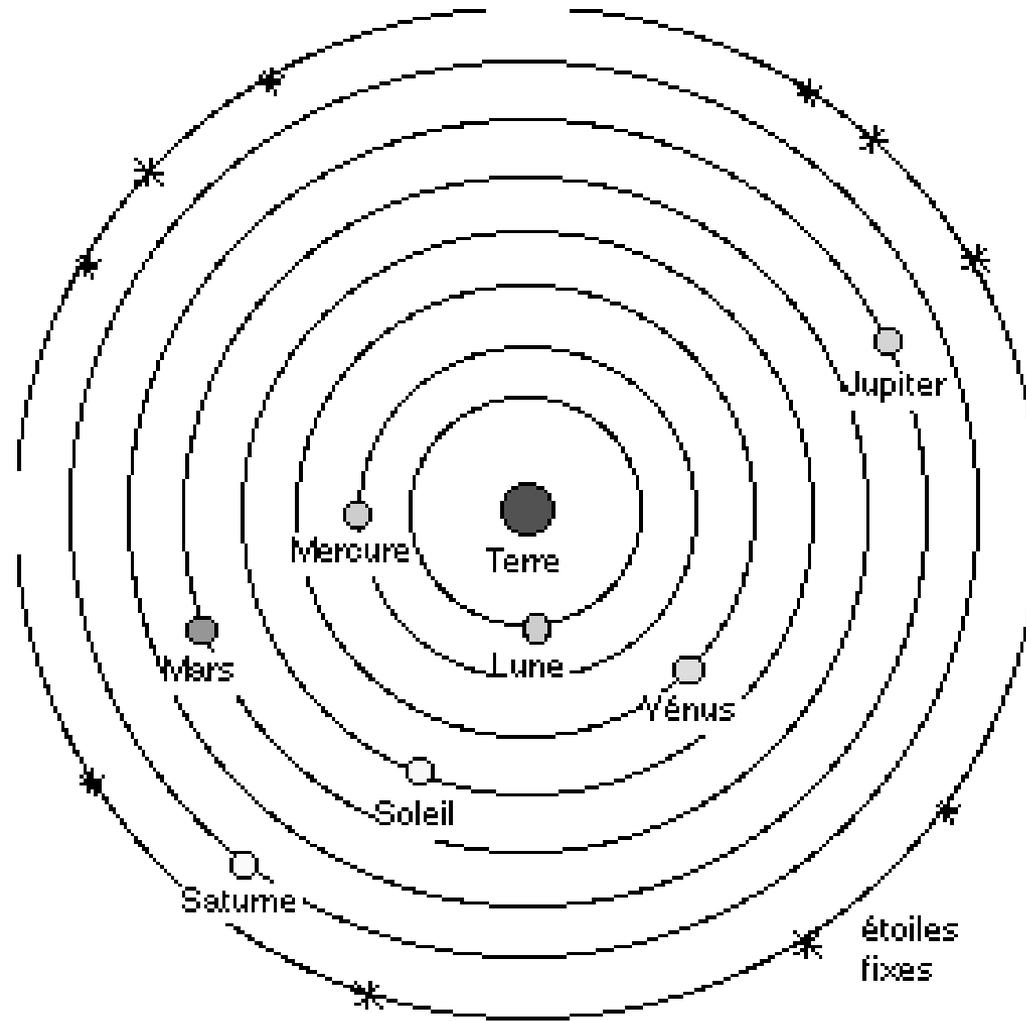
- L'ombre est supposée cylindrique.
- La Lune se déplace d'une distance égale à son diamètre en une heure.
- Les éclipses totales de Lune les plus longues durent environ 2 heures.

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.

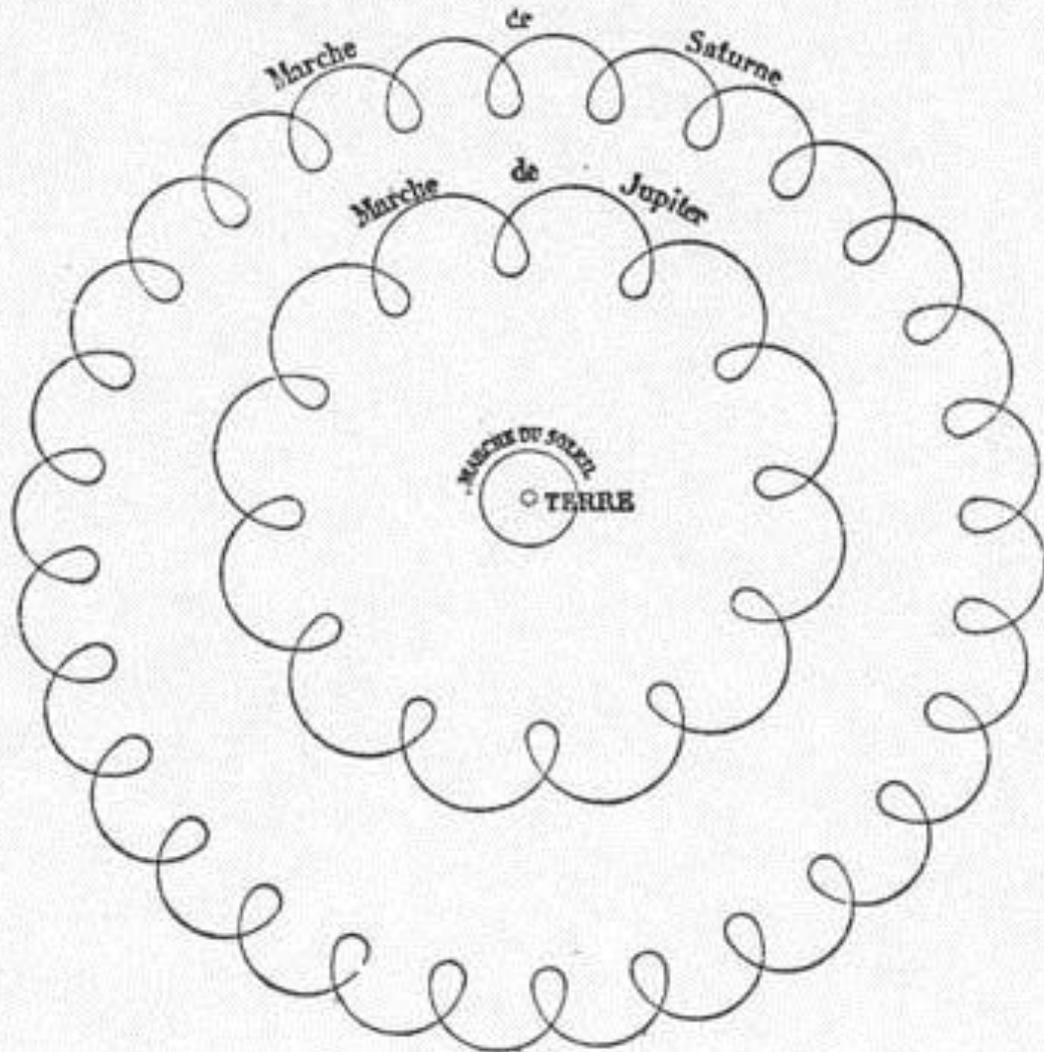
La distance au Soleil et aux planètes

- 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 et vérifier par l'observation les spéculations des théoriciens.

Le modèle d'univers d'Aristote



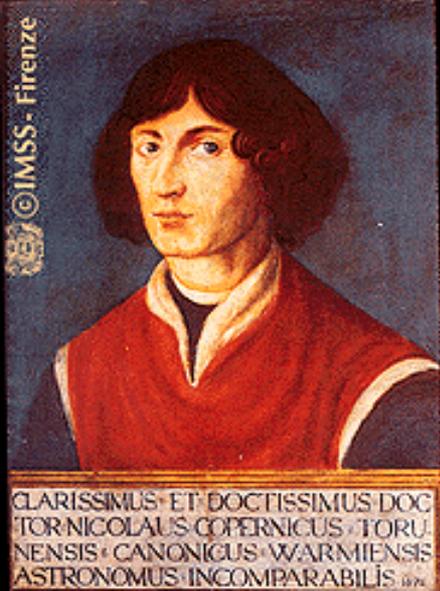
Le modèle de Ptolémée



ÉPICYCLES DE PTOLÉMÉE.



Ptolémée (100-170)



CLARISSIMUS ET DOCTISSIMUS DOCTOR NICOLAUS COPERNICUS TORUNENSIS CANONICUS WARMIENSIS ASTRONOMUS INCOMPARABILIS 1543

Copernic (1473-1543)

Le modèle de Copernic

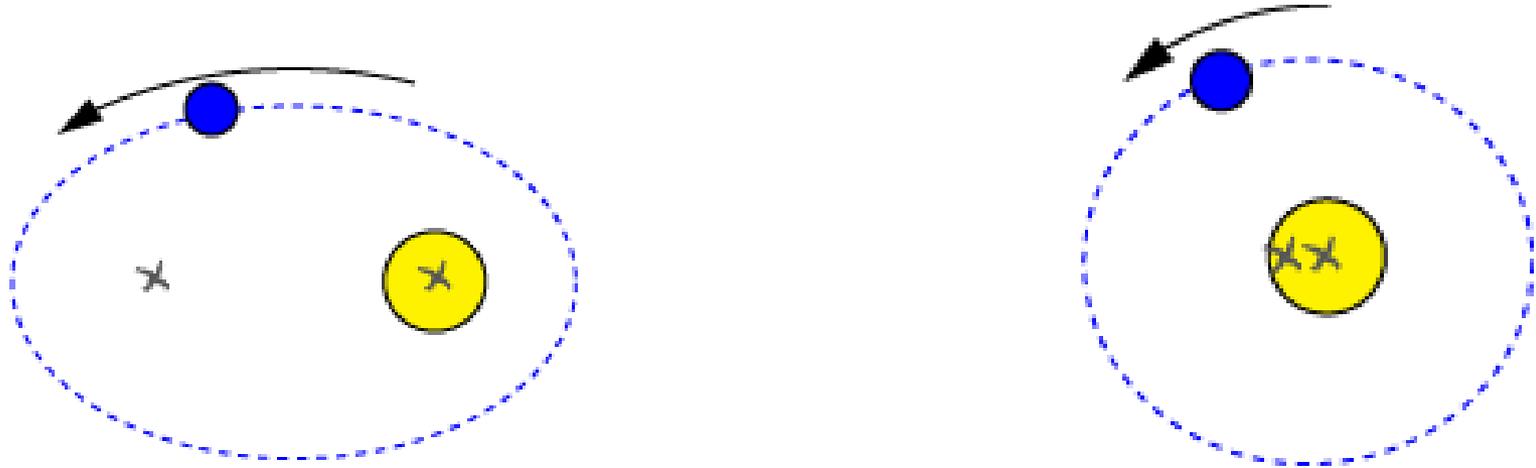


Le modèle de Kepler confirmé par la mesure précise du ciel

Tycho Brahé: ses mesures vont être
essentiellles et suffisamment
précises pour confirmer un modèle
« plus vrai » de système solaire.



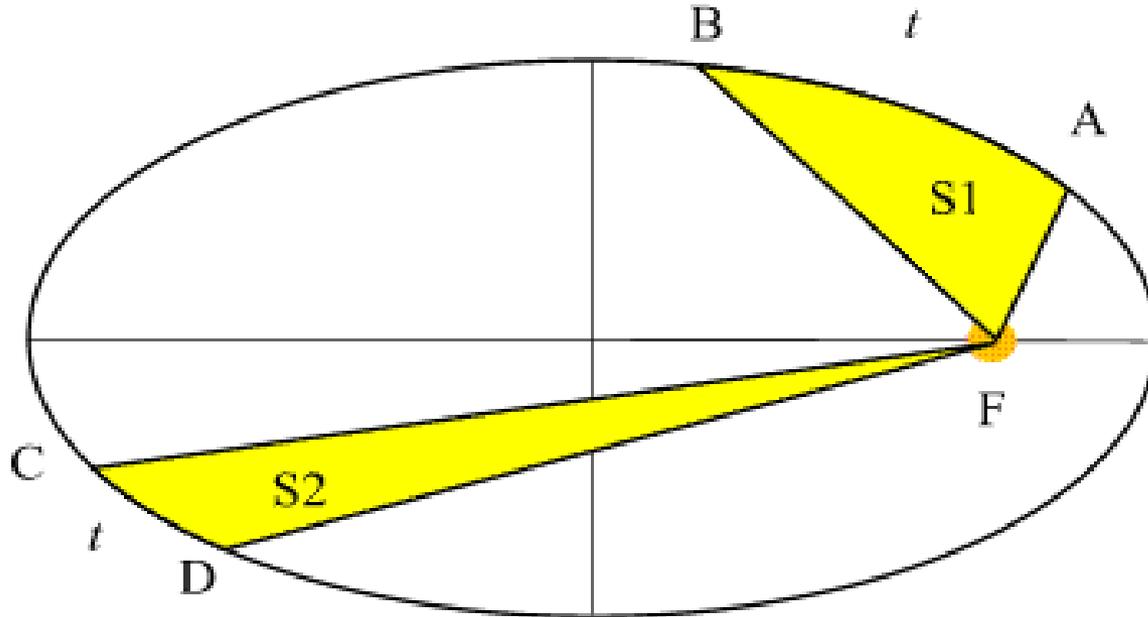
La première loi de Képler



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

La loi des aires

Deuxième loi de Kepler $S_1 = S_2$



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

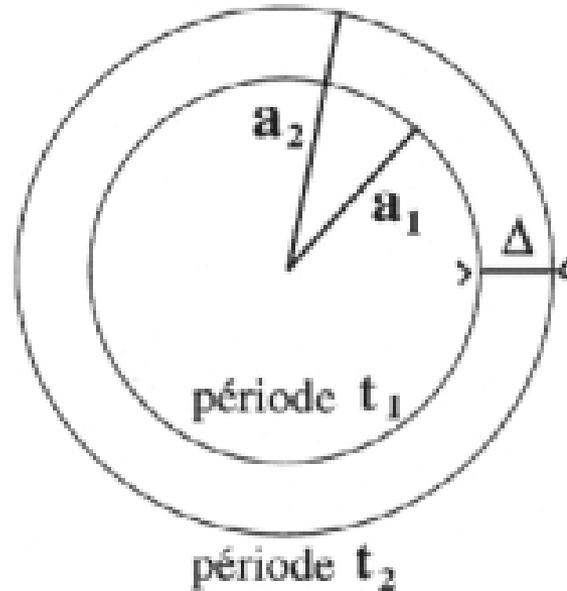
Les aires décrites par le rayon vecteur planète-Soleil sont proportionnelles aux temps employés à les décrire (Astronomia Nova, 1609);

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



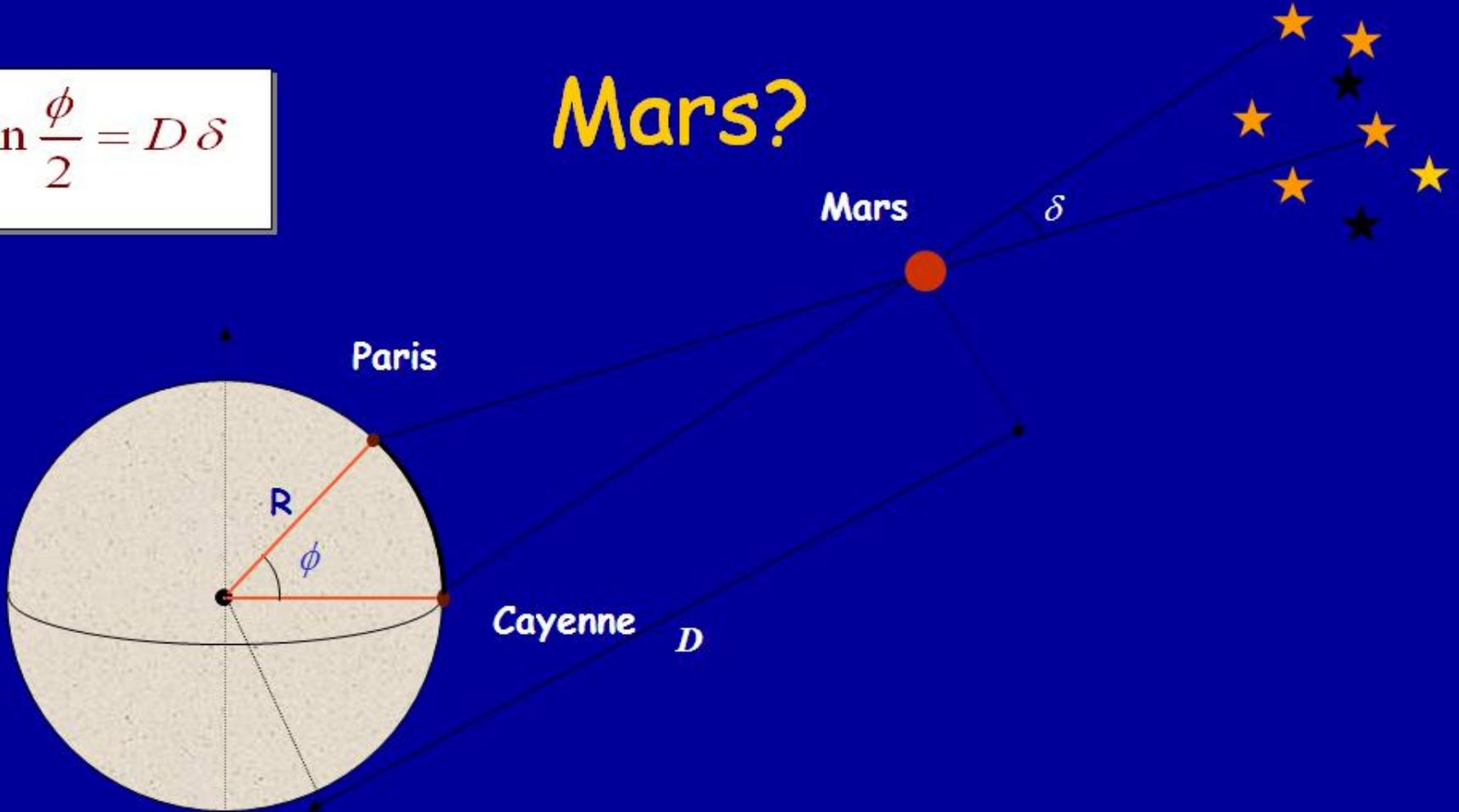
Les demi-grands axes a et les périodes de révolution T sont reliés par $a^3/T^2 = \text{constante}$ pour toutes les planètes (1618).

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

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

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

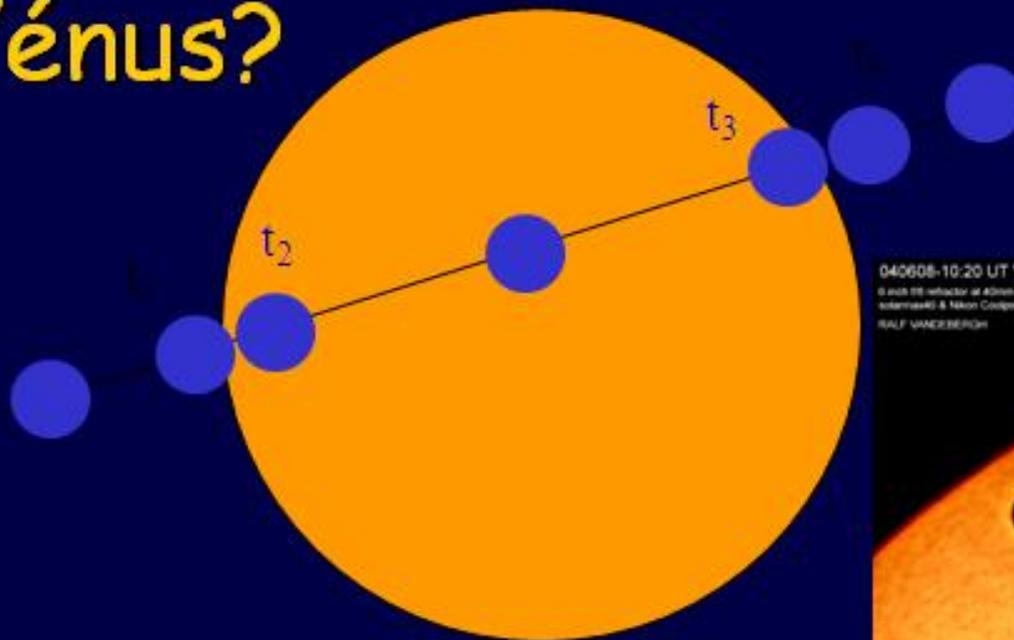
Mars?



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



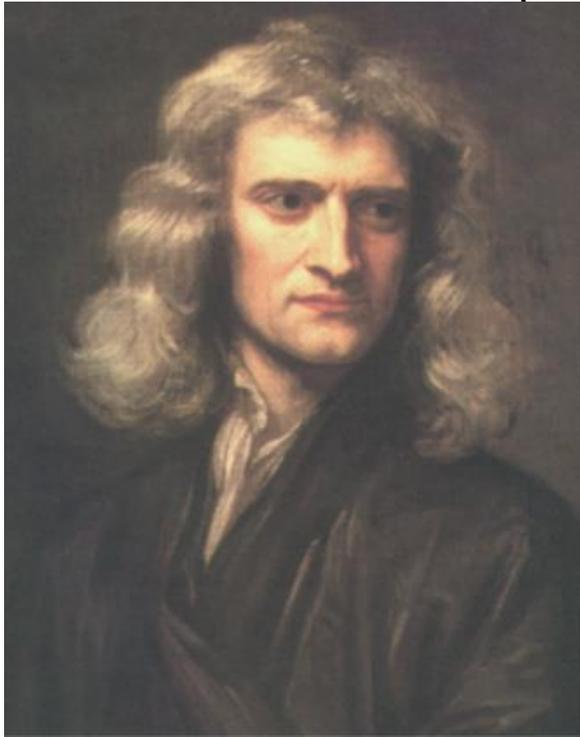
Observer c'est mesurer l'instant des contacts en Temps Universel

1639: Horrocks confirme les lois de Kepler



Le XVIIIème siècle: Newton et Laplace

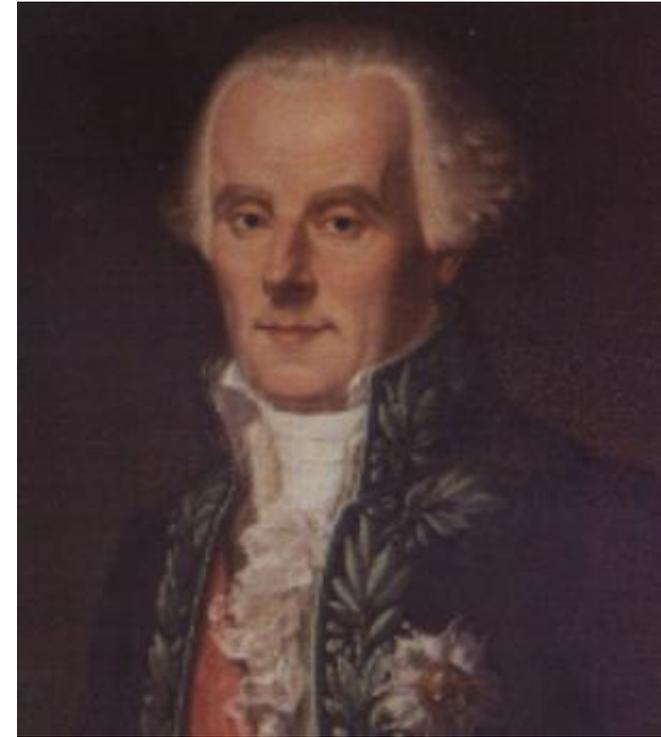
- Newton et Laplace démontrent ce que Galilée et Kepler ont pressenti
- La mécanique céleste va tout expliquer pendant plusieurs siècles
- Ce modèle d'univers permettra de prévoir les mouvements des astres, les marées, l'aplatissement de la Terre, ... et de mesurer l'univers proche



Newton (1642-1727)



Halley (1656-1742)



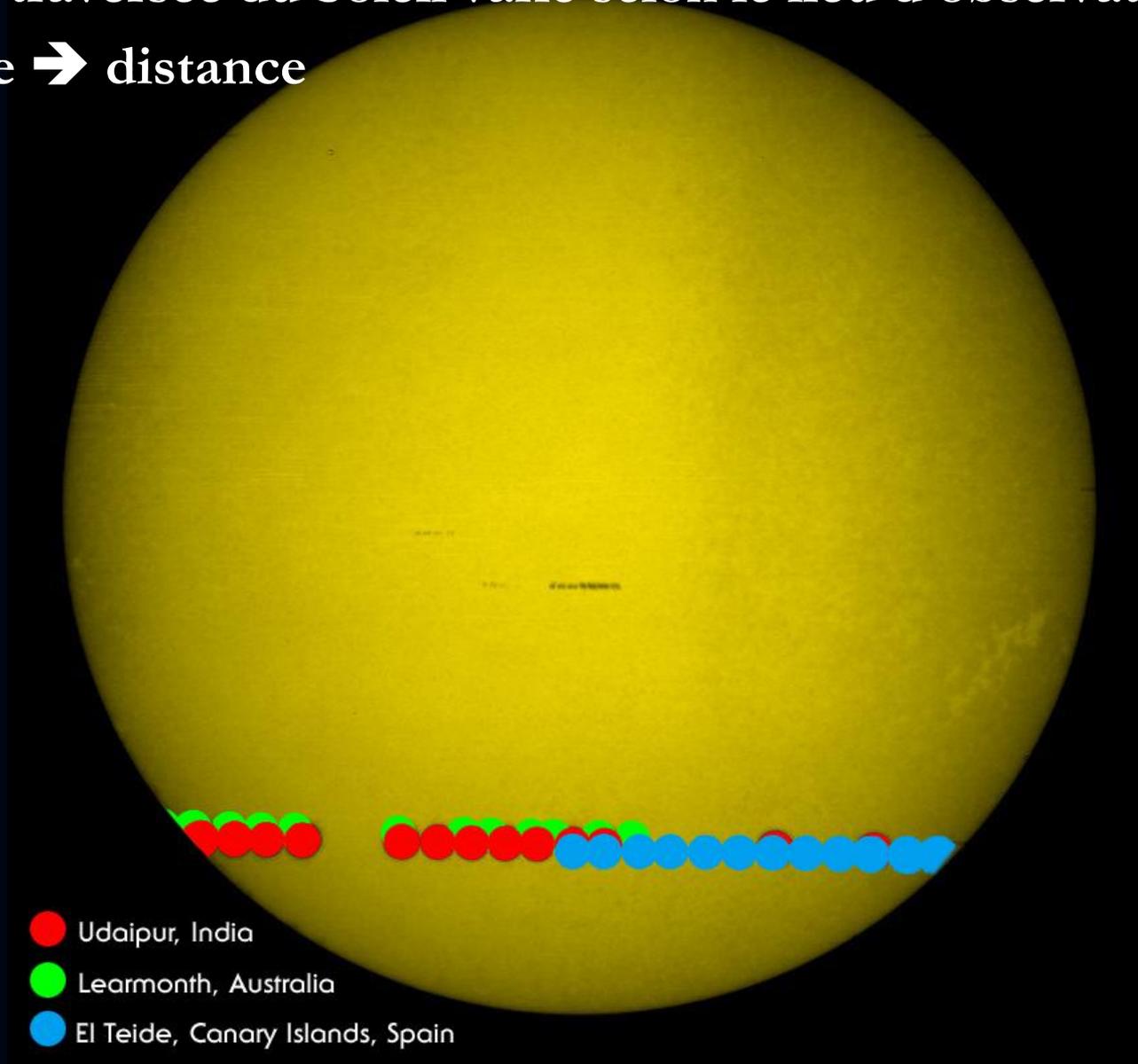
Laplace (1749-1827)

En 1716, Halley propose d'observer le passage de Vénus de 1761 pour mesurer la distance Terre-Soleil

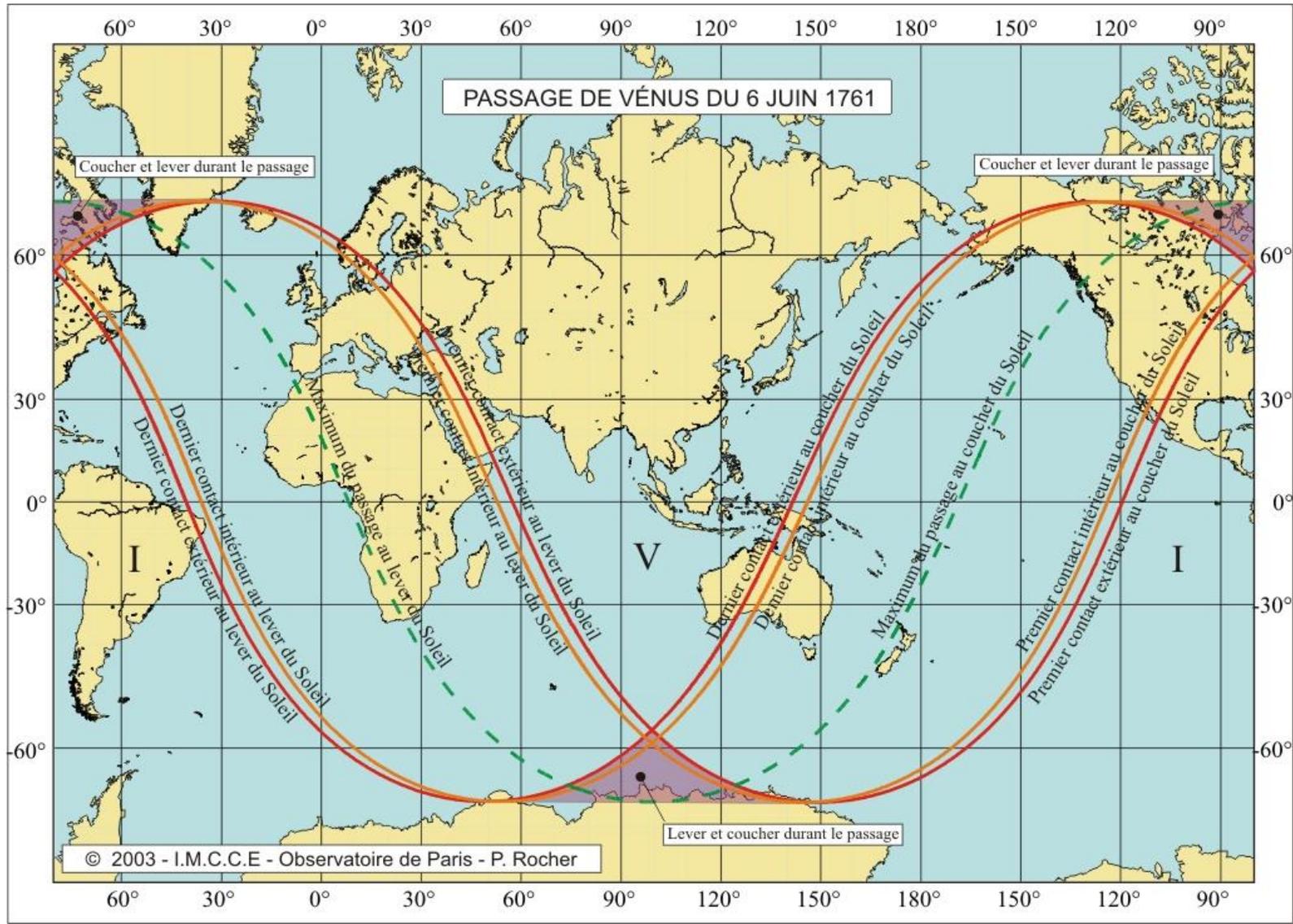
La parallaxe lors d'un passage de Vénus

La durée de traversée du Soleil varie selon le lieu d'observation

→ parallaxe → distance



XVIIIème siècle: la mobilisation générale pour mesurer la distance Terre-Soleil grâce aux observations des passages de Vénus devant le Soleil

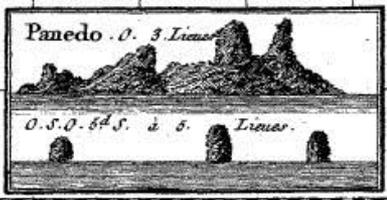
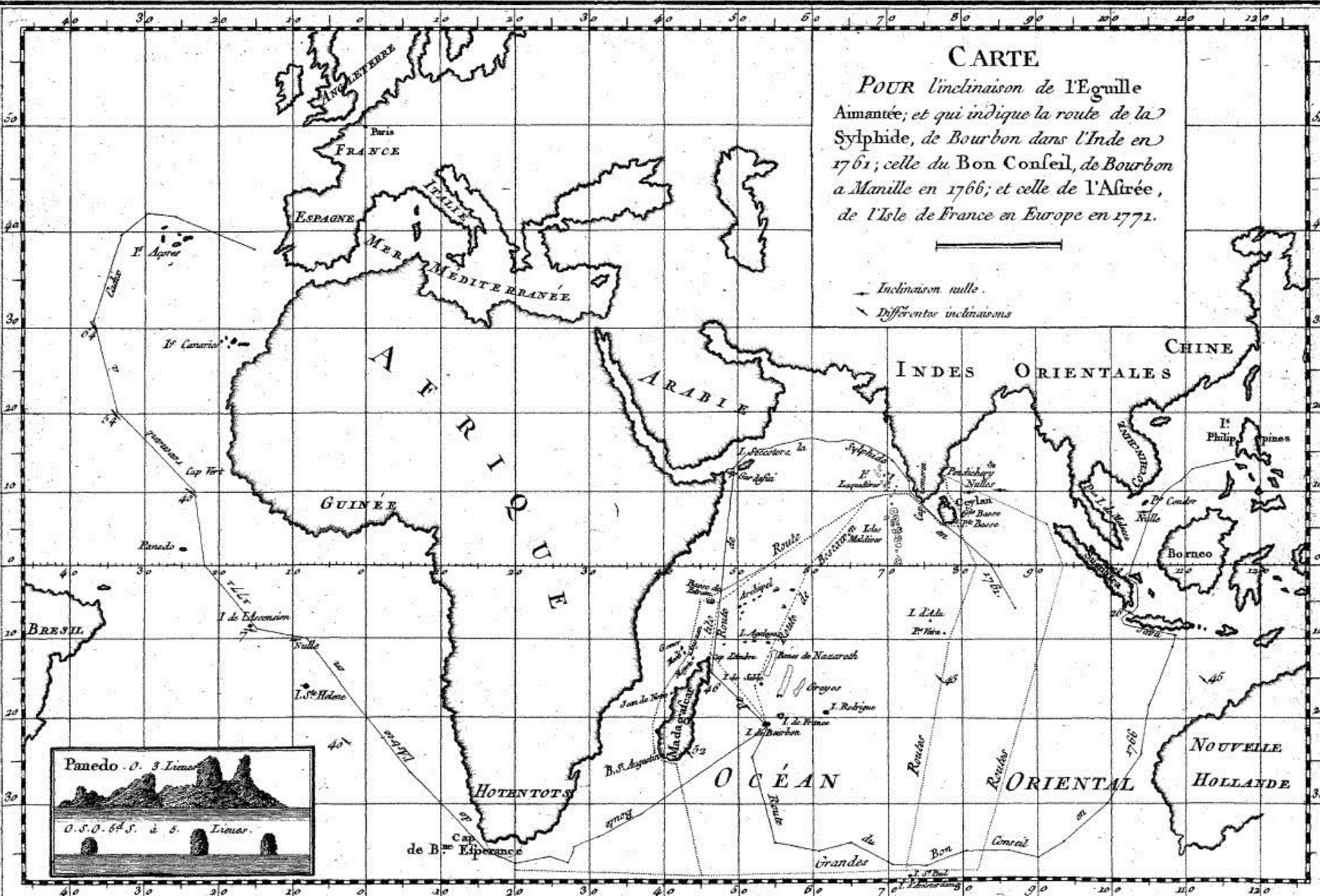


Des astronomes explorateurs pour observer les passages de Vénus

CARTE

POUR l'inclinaison de l'Eguille
Aimantée; et qui indique la route de la
Sylphide, de Bourbon dans l'Inde en
1761; celle du Bon Conseil, de Bourbon
à Manille en 1766; et celle de l'Astrée,
de l'Isle de France en Europe en 1771.

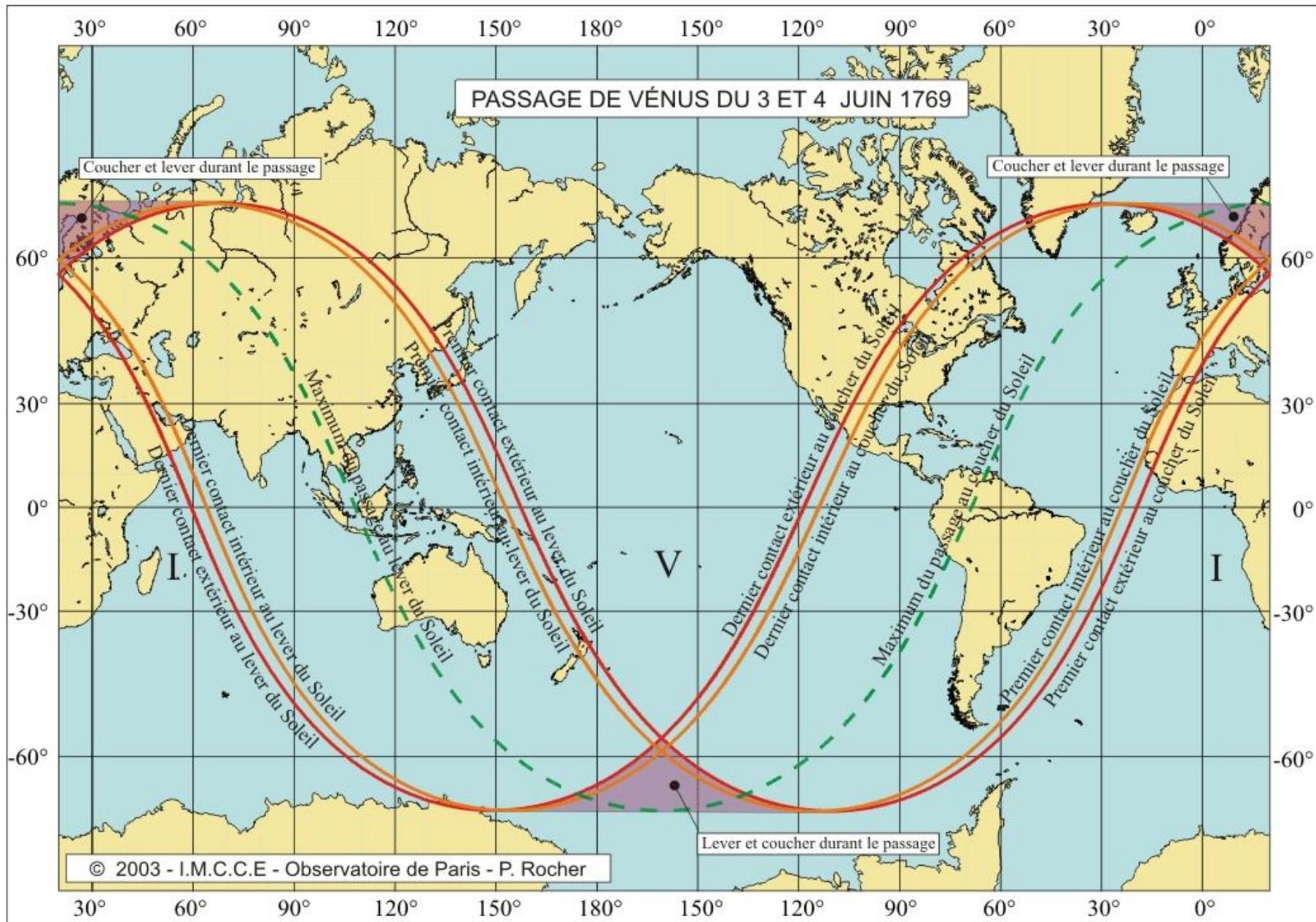
— Inclinaison nulle.
- - - Différentes inclinaisons



Le passage de 1761: la guerre de 7 ans (1756-1763) va gêner les astronomes



La nécessité de voyages lointains

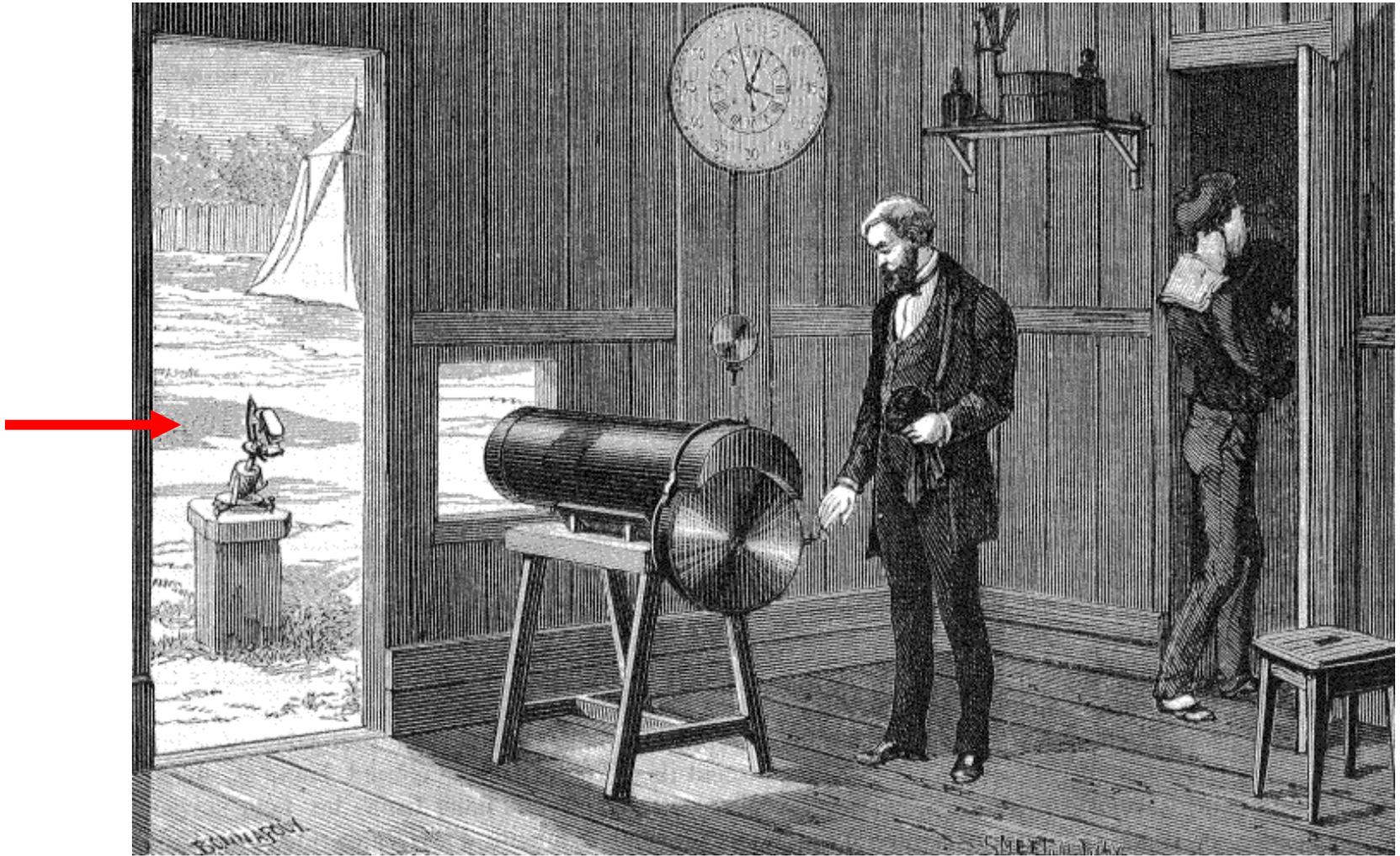


Le passage de 1769



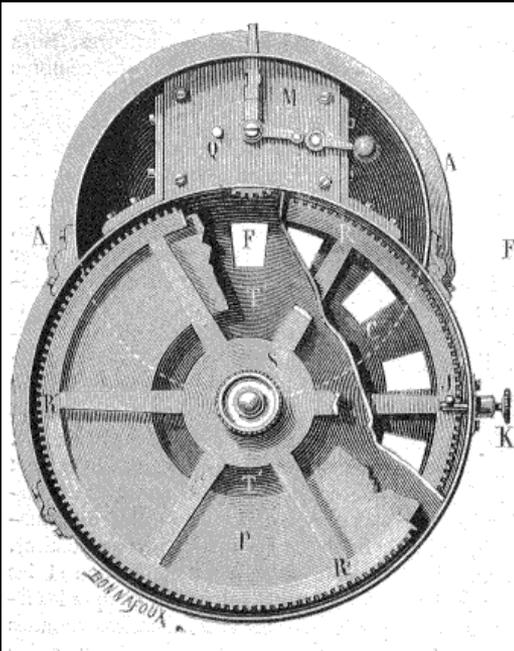
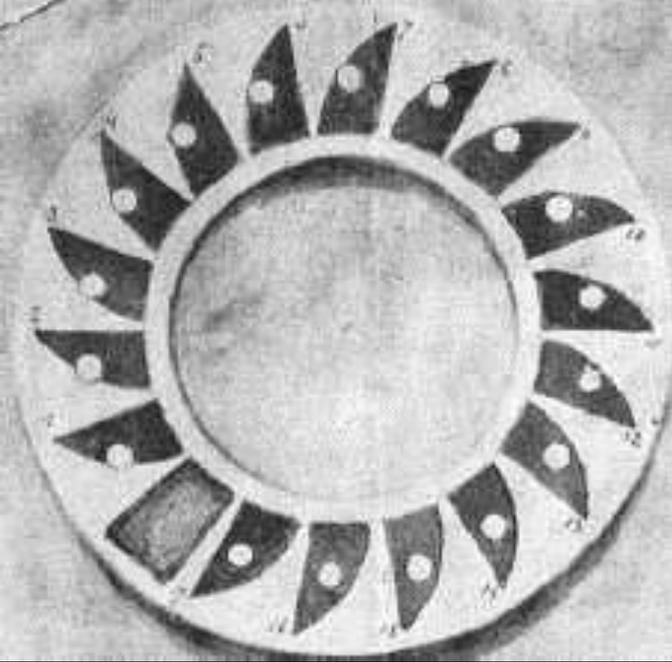
Le capitaine Cook à Tahiti à « Point Venus »

Au XIXème siècle: l'avènement de la technique



L'invention du sidérostat par Léon Foucault est désormais utilisée par les astronomes pour capter les rayons solaires

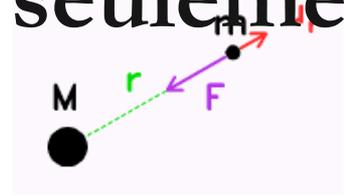
Observation de 1874 au Japon par Janssen



Le premier film: le passage de Vénus
devant le Soleil

Les lois de Newton, plus précises que les lois de Kepler (vraies pour deux corps seulement):

introduire la notion de force instantanée à distance

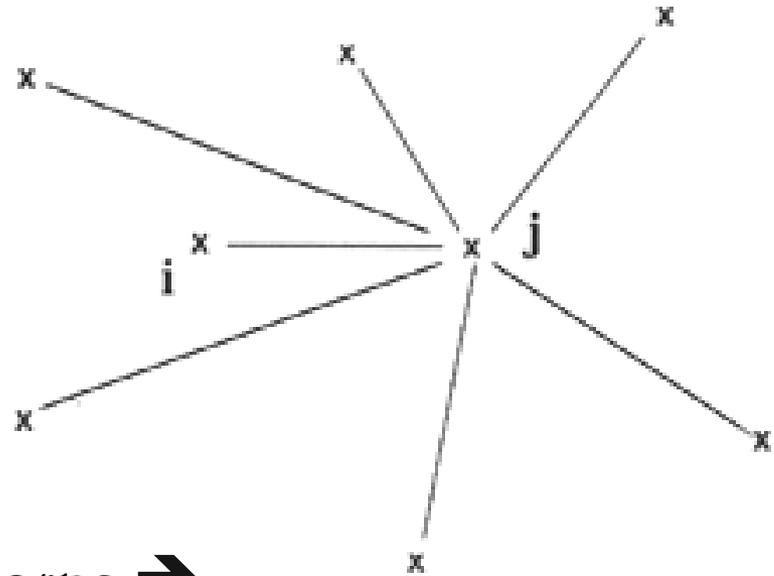


-loi fondamentale de la mécanique: $\mathbf{F} = m \boldsymbol{\gamma}$

-loi de la gravitation universelle: $\mathbf{F} = \mathbf{G} m M / r^2$

Forces et accélérations sont liées

$$\mathbf{F}_j = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}} \frac{k m_i m_j \mathbf{P}_i \mathbf{P}_j}{|\mathbf{P}_j \mathbf{P}_i|^3}$$



La complexité du problème à « n » corps →

Les équations différentielles

$$\mathbf{F} = m \boldsymbol{\gamma} \quad \rightarrow \quad m \frac{d^2 \boldsymbol{x}}{dt^2} = f(\boldsymbol{x}) \quad \text{où } f = \mathbf{G} m \mathbf{M} / r^2$$
$$\rightarrow \boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}(t)$$

Application à la mécanique céleste:

Dans le cas de trois corps et plus, il n'y a pas de solution analytique générale: il faut trouver des solutions particulières ou des solutions approchées sous forme de séries dépendant du temps.

Dans le cas de deux corps: les lois de Kepler sont démontrées, il y a une solution exacte, c'est le mouvement sur une conique.

Besoin de l'astrométrie:

Ces équations seront confrontées en permanence aux mesures astrométriques dont la précision va augmenter et nécessiter de complexifier encore ces équations

**Le problème à deux corps a une solution:
une trajectoire elliptique définie par 6 paramètres:**

a: demi grand axe

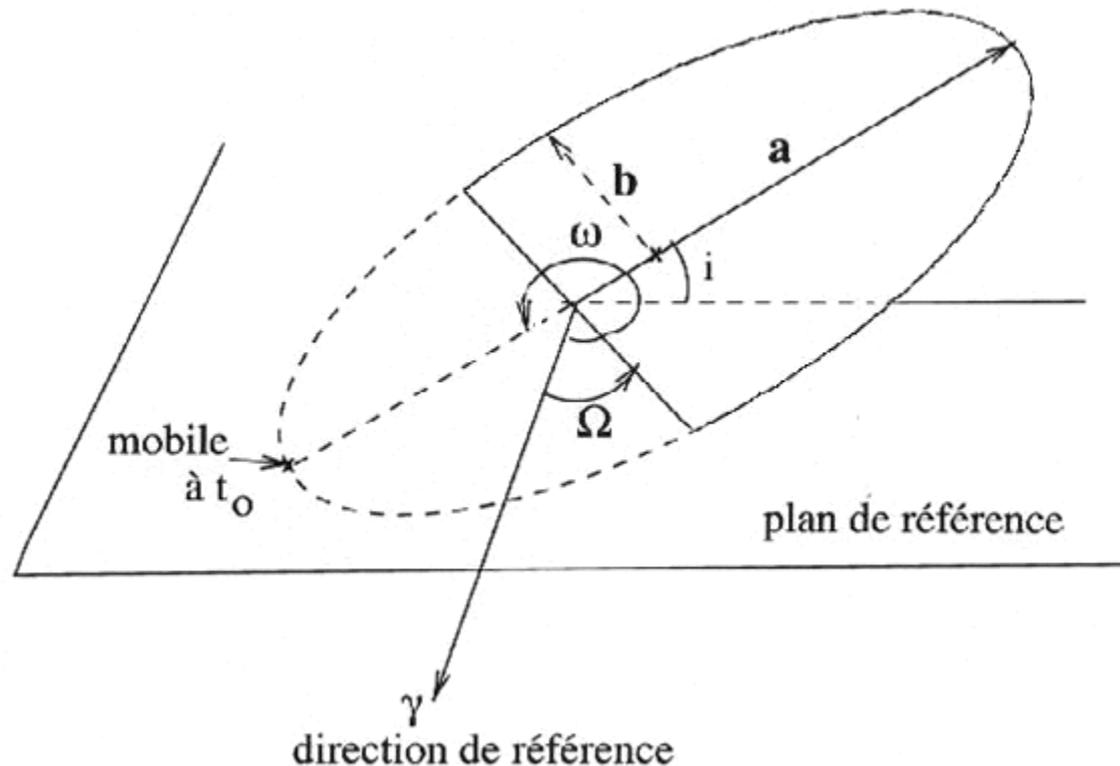
e: excentricité

i: inclinaison

Ω : longitude du noeud

ω : longitude du périastre

t_0 : instant de passage au périastre



$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$$

Cas où l'on a plus de deux corps: pas de solution analytique exacte

Par chance le système solaire est une somme de problèmes à deux corps:

- soleil + planète
- planète + satellite

Rappel: définition de l'ellipse

a : demi grand axe

e : excentricité

i : inclinaison

Ω : longitude du noeud

ω : longitude du périastre

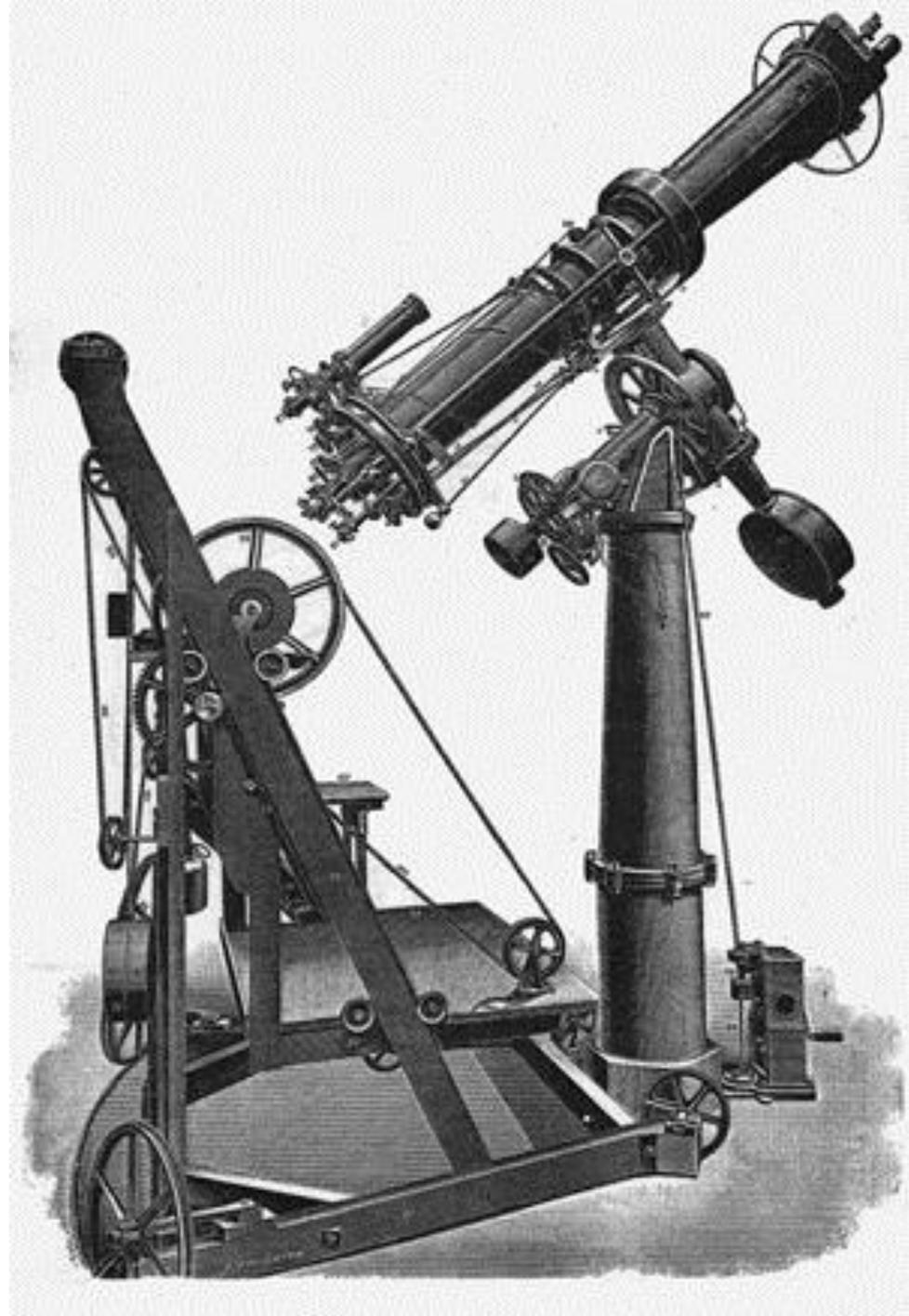
t_0 : instant de passage au périastre

On va résoudre des problèmes à deux corps, perturbés par des forces extérieures

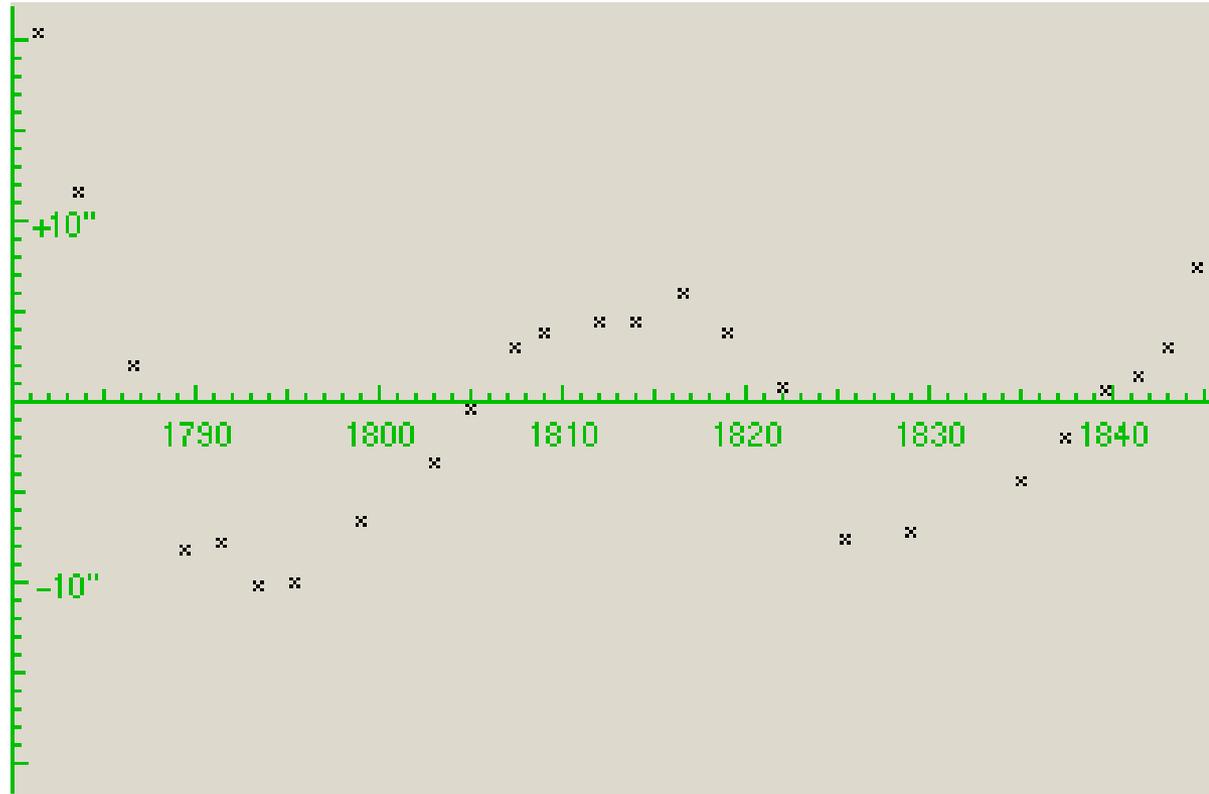
→ Lagrange introduit des équations qui « font varier les constantes »: les six paramètres de définition de l'ellipse vont varier au cours du temps en fonction des forces perturbatrices. A chaque instant, leur valeur définit l'orbite « osculatrice ».

**D'autres
façons
d'observer:
la mesure
directe des
angles**

**Micromètre et
héliomètre**

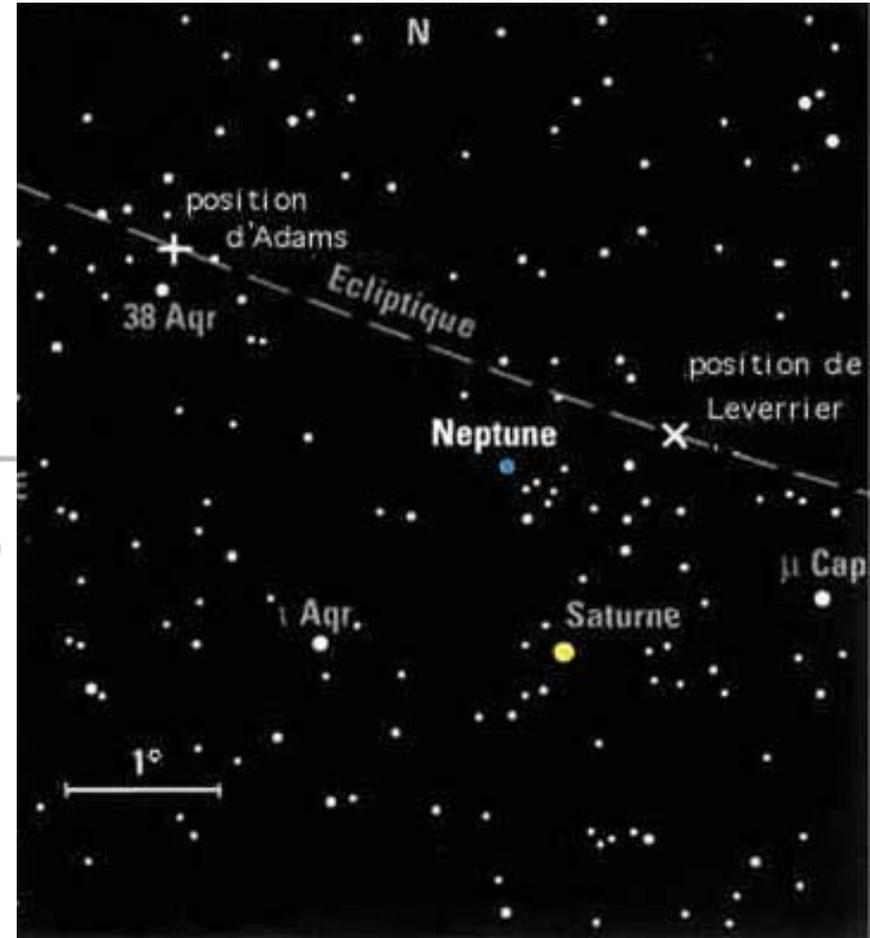
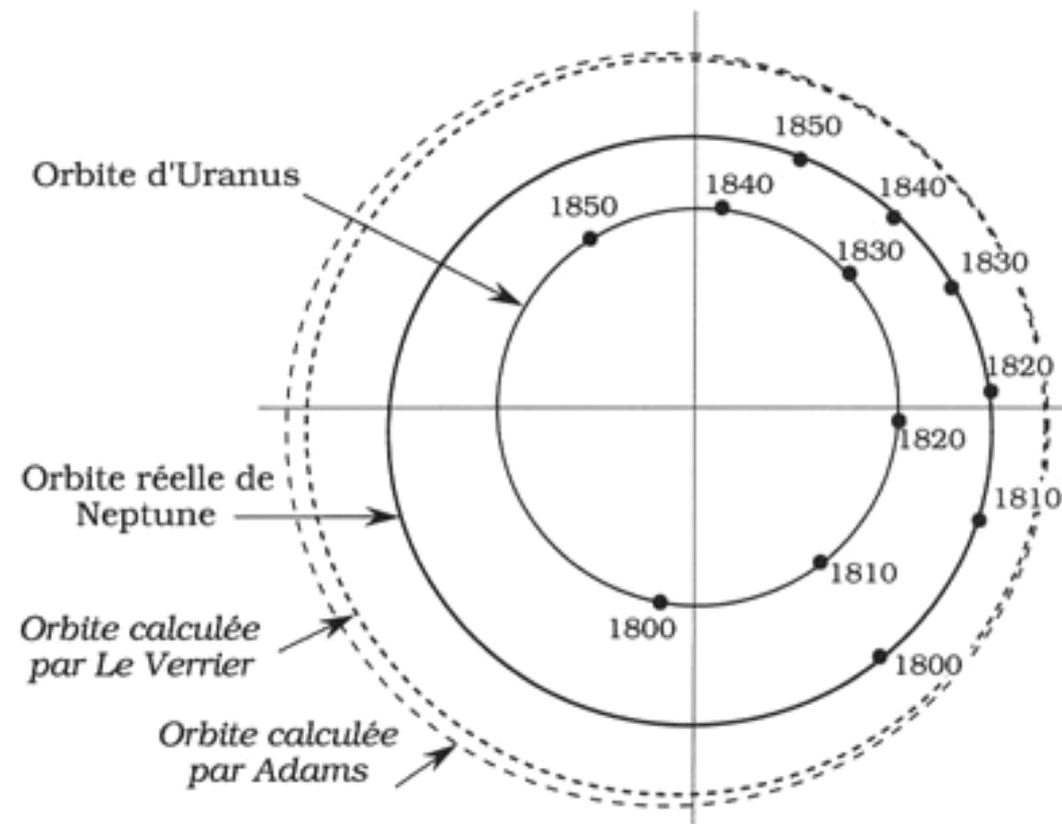


Le triomphe de la mécanique céleste et de l'astrométrie: au XIXème siècle, la découverte de Neptune par Le Verrier

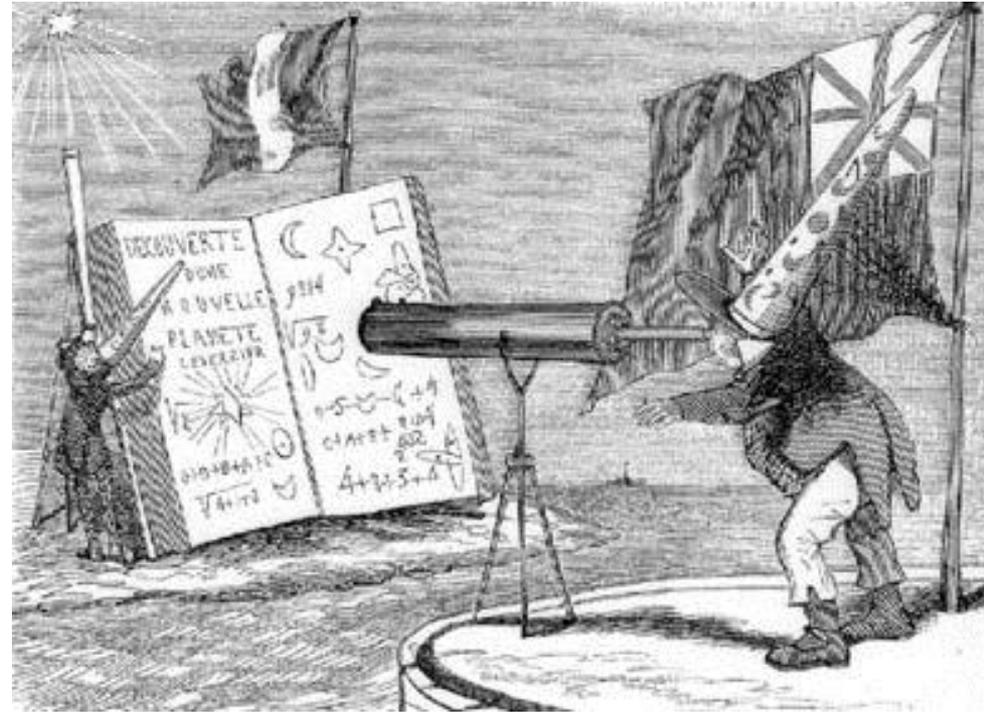


Écarts entre les calculs et l'observation astrométrique d'Uranus obtenus grâce à l'augmentation de la précision de mesure

Le triomphe de la mécanique céleste et de l'astrométrie: la découverte de Neptune par Le Verrier



Les caricatures



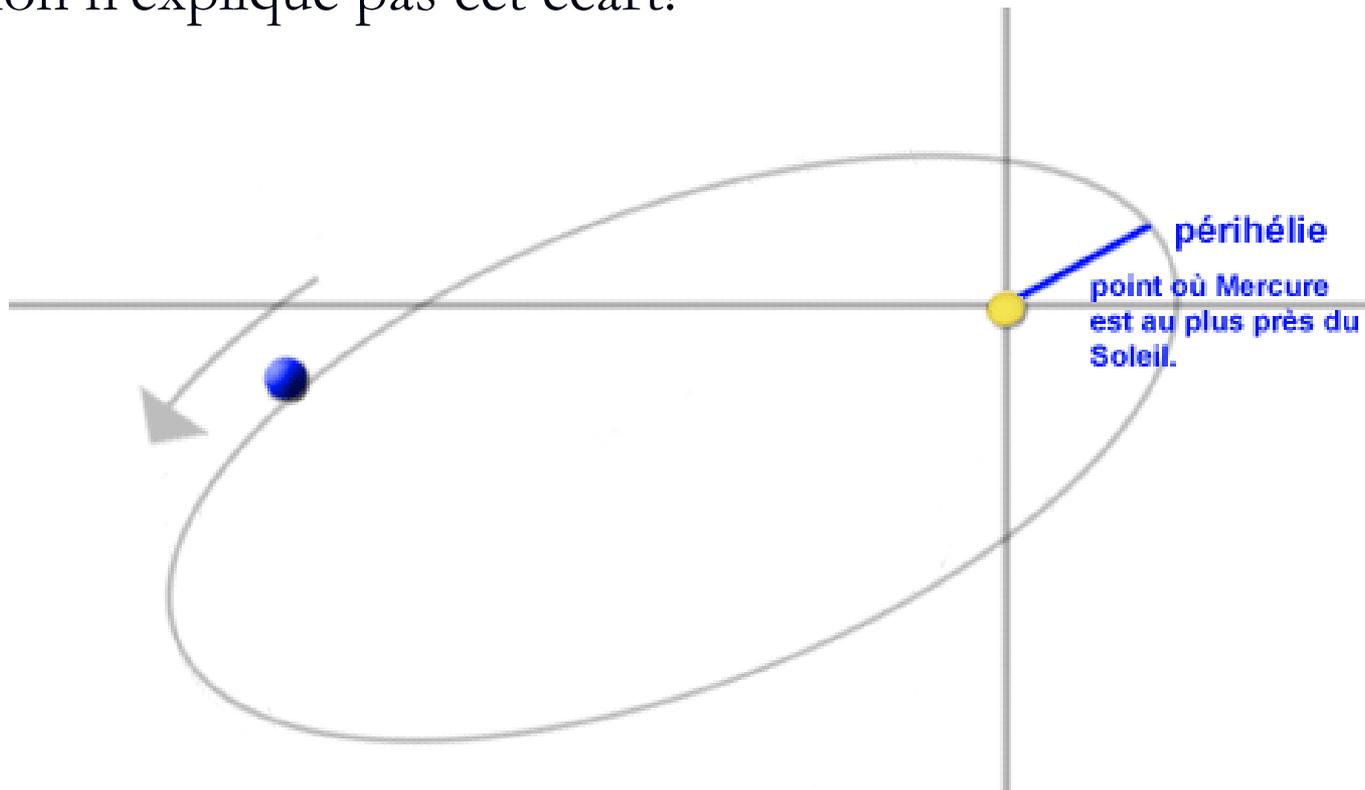
À gauche Le Verrier observe dans ses calculs

À droite Adams observe dans les calculs de Le Verrier

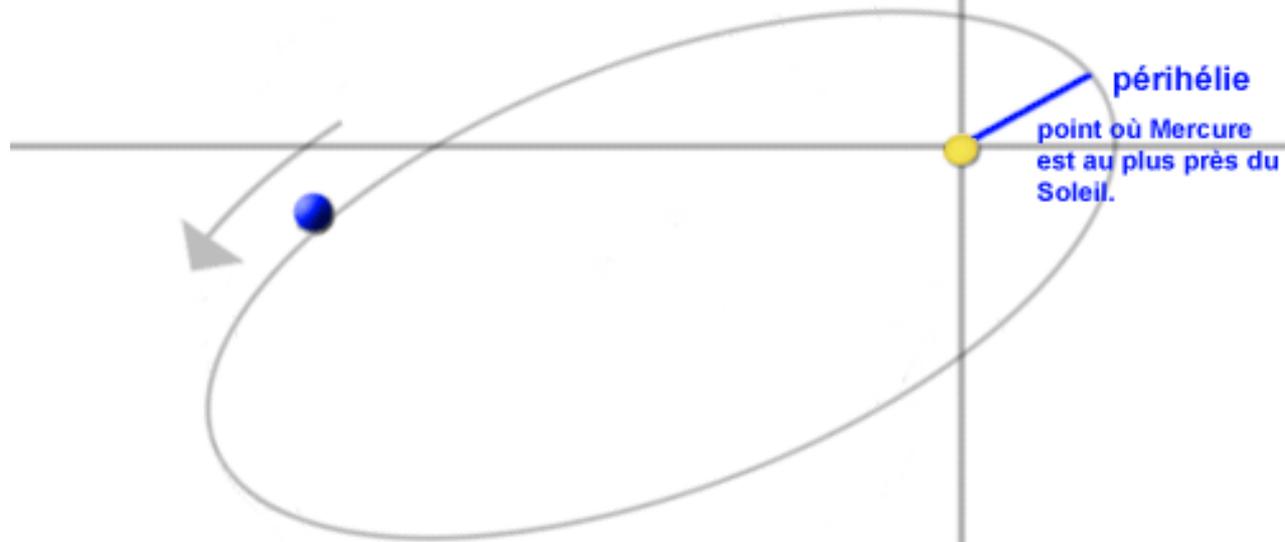
Le cas Mercure: comme pour Uranus, Mercure s'écarte des calculs!

L'augmentation de la précision de mesure des distances va rendre caduques les modèles admis jusqu'alors.

Par exemple, les mesures précises de position de Mercure montrent que la planète n'est pas à sa place mais le modèle newtonien de la gravitation n'explique pas cet écart!



Les limites de la gravitation universelle de Newton



Un nouveau modèle va expliquer les errements de Mercure: la relativité générale

- Il n'y a pas de repère ni de temps absolus (exit Galilée)
- Il n'y a pas d'actions à distance (exit Newton)
- L'univers est courbe (exit Euclide)

La relativité

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$

relativité galiléenne

$$\begin{cases} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{cases}$$

relativité restreinte

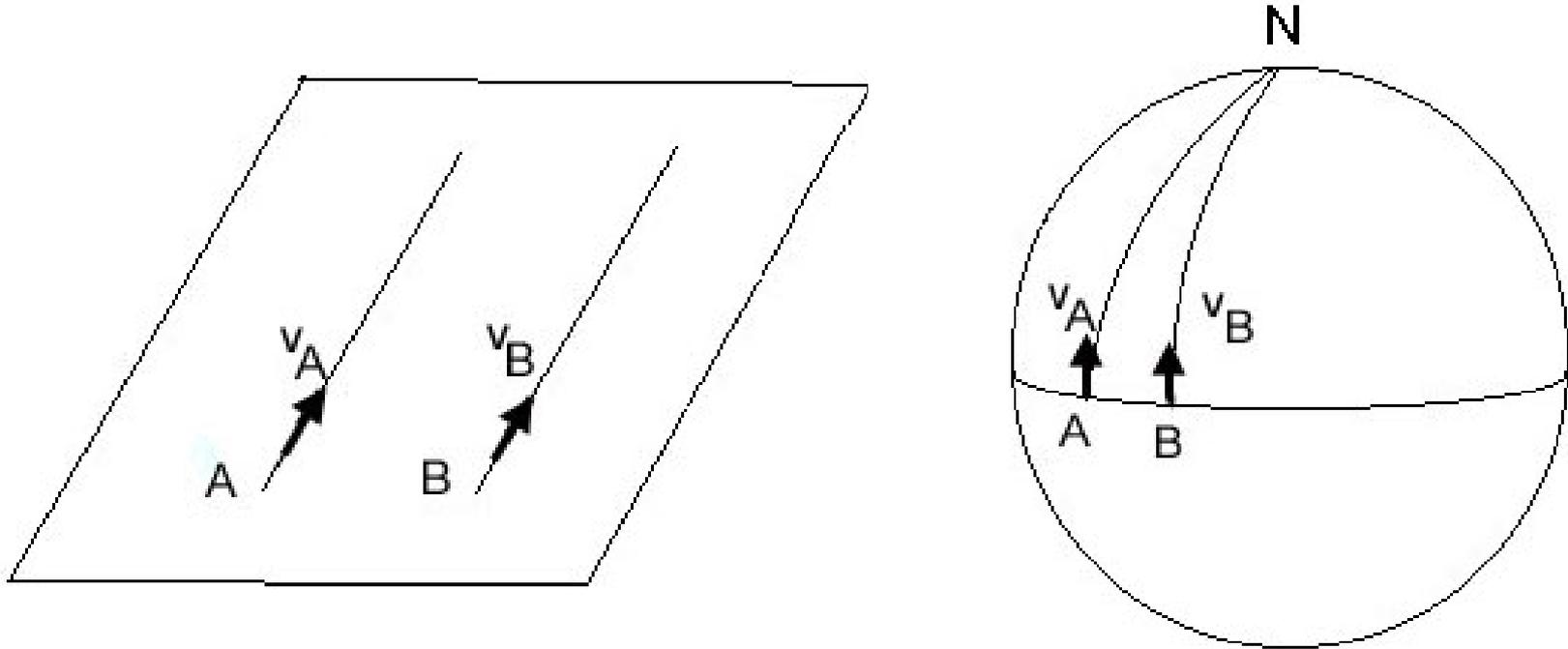
La relativité restreinte



La vitesse observée de la lumière des phares n'est pas la vitesse de la lumière + la vitesse de la voiture

La relativité générale:

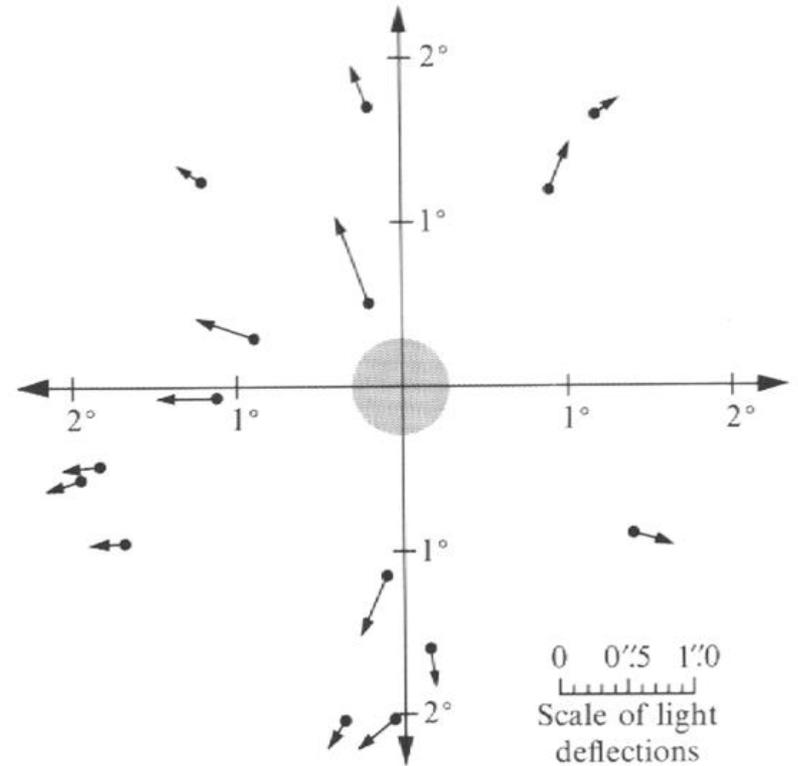
principe d'équivalence et courbure de l'espace



Il n'y a plus de force d'attraction entre les corps!

À gauche, un univers sans « gravité » et à droite un univers avec « gravité ». A et B « s'attire » et se retrouvent au pôle.

La preuve: les rayons lumineux des étoiles sont déviés par la masse du Soleil



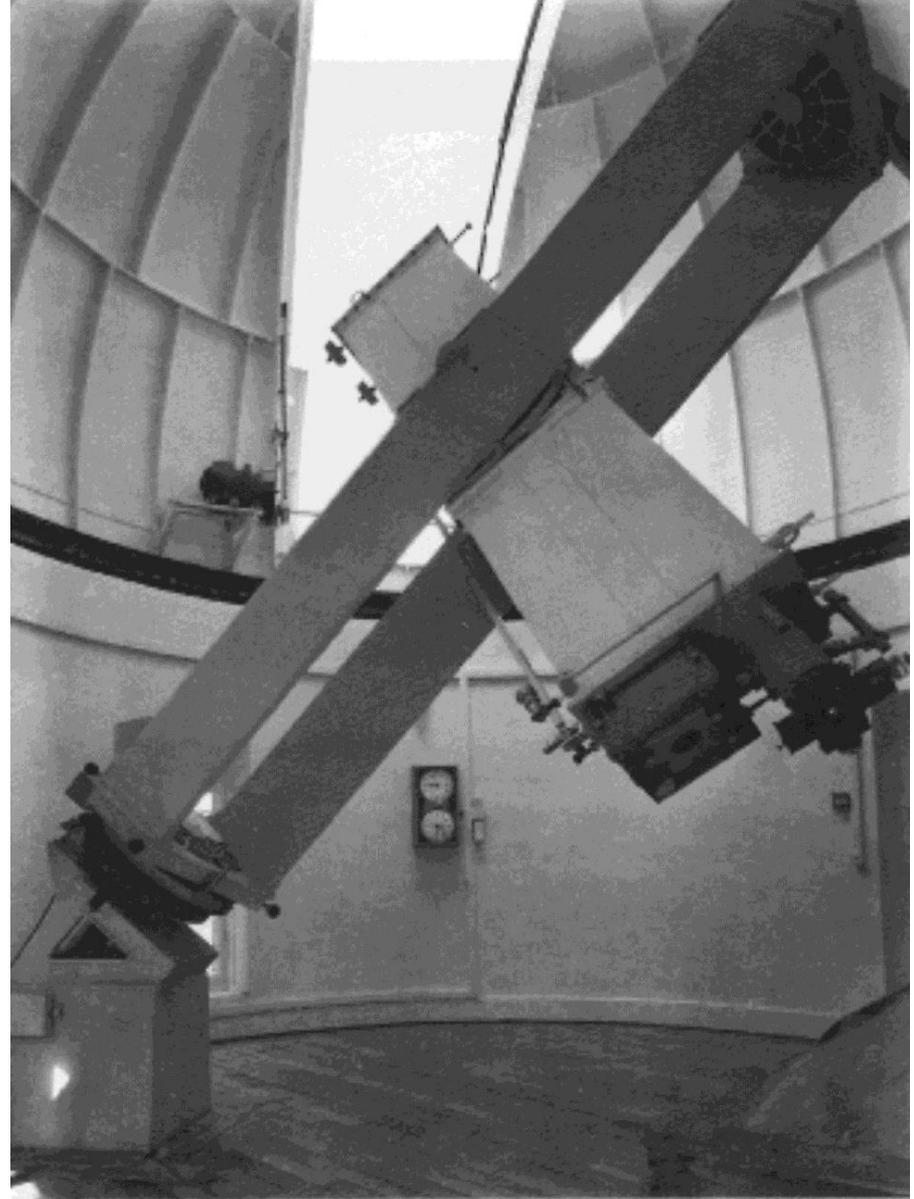
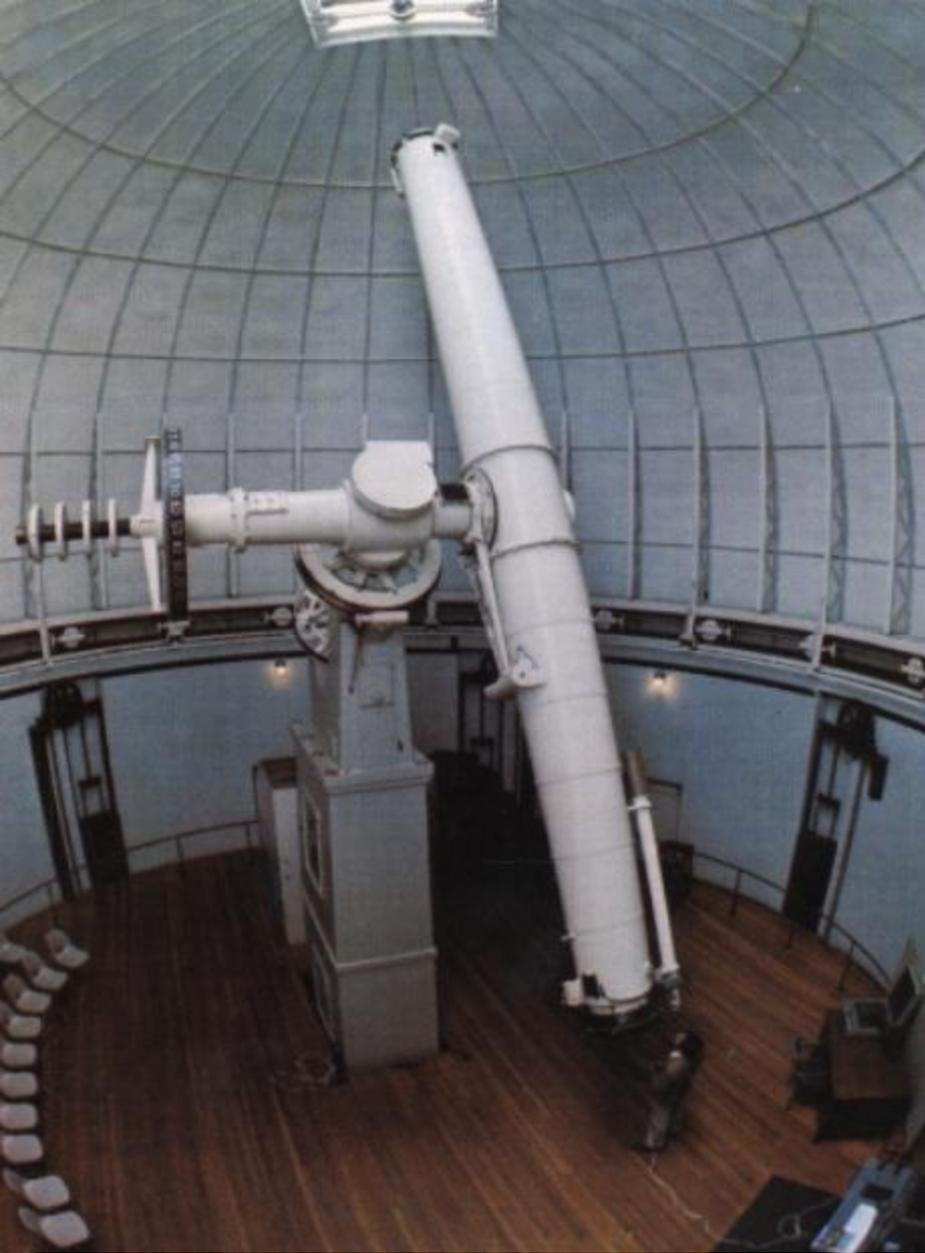
Ce serait impossible par la loi de Newton puisque les photons sont sans masse...

Les arcs gravitationnels

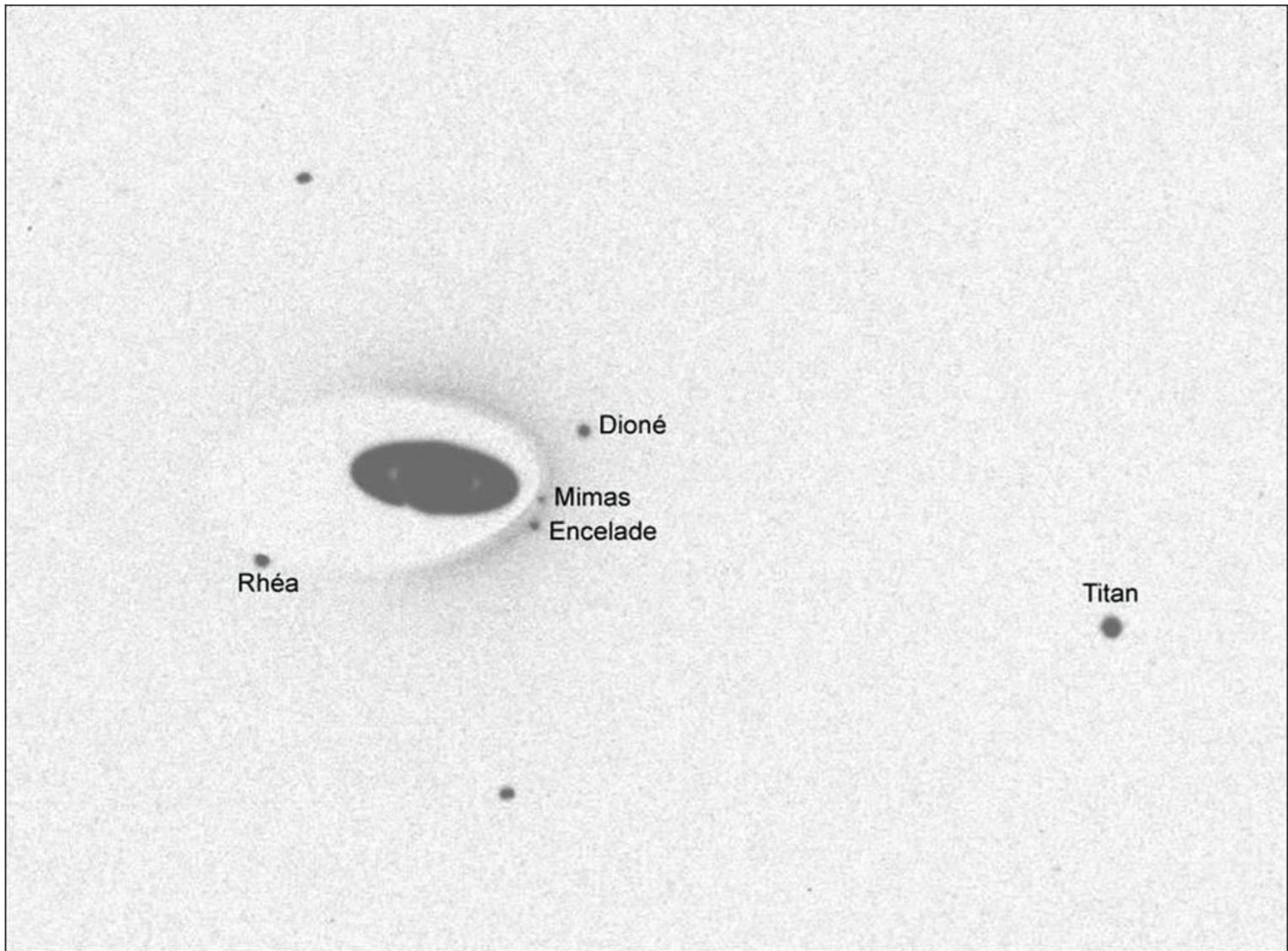


L'avènement de la photographie

- Fin du XIXème siècle, utilisation des plaques photographiques pour observer et mesurer le ciel
- L'observation peut être analysée longtemps après avoir été réalisée
- La précision augmente encore



À gauche, un grand réfracteur, à droite un instrument de la Carte du ciel

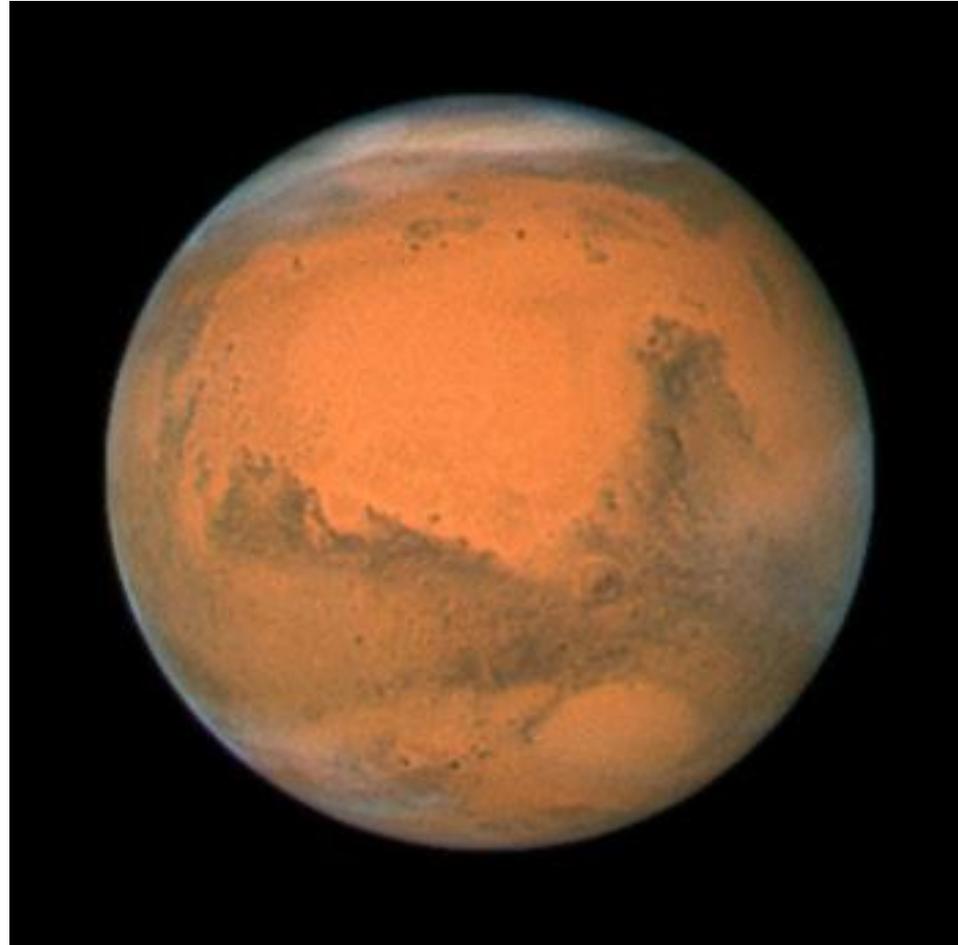


Saturne et ses satellites



Neptune dans un champ d'étoiles

Aujourd'hui la mesure Terre-Soleil se fait grâce à Mars 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



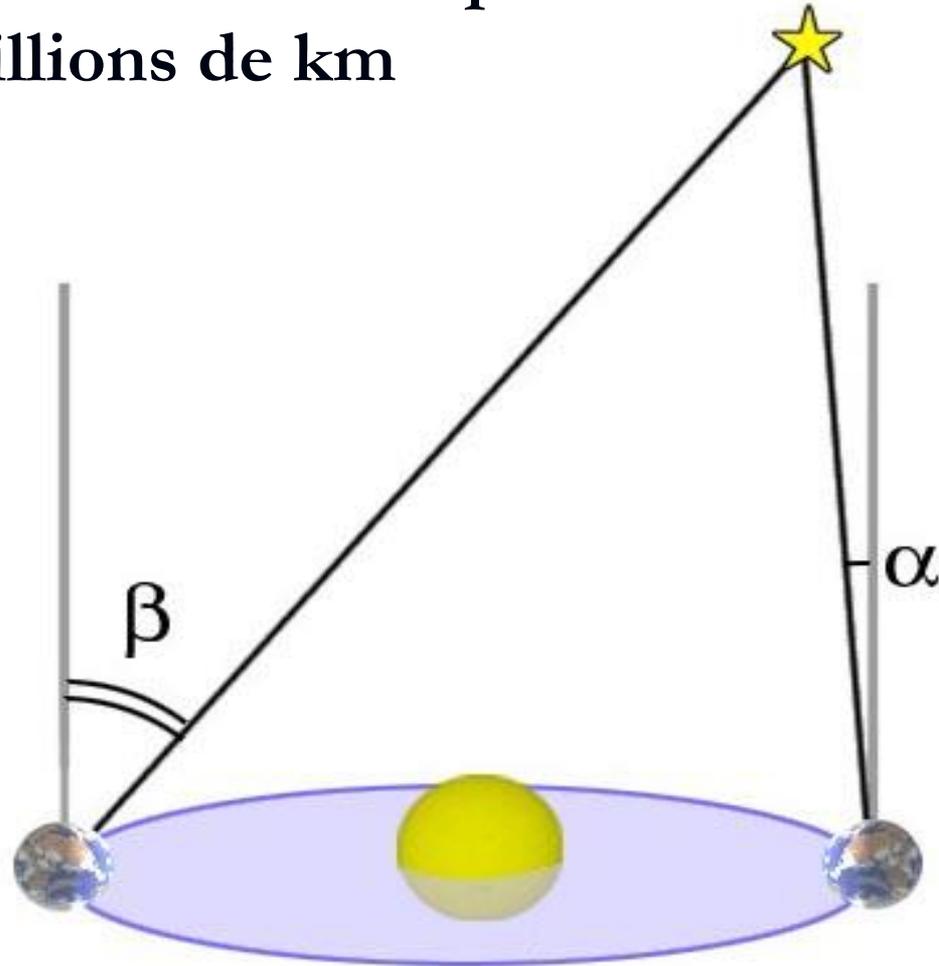
La distance Terre-Soleil est de 149 597 870 km 691 m

- 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

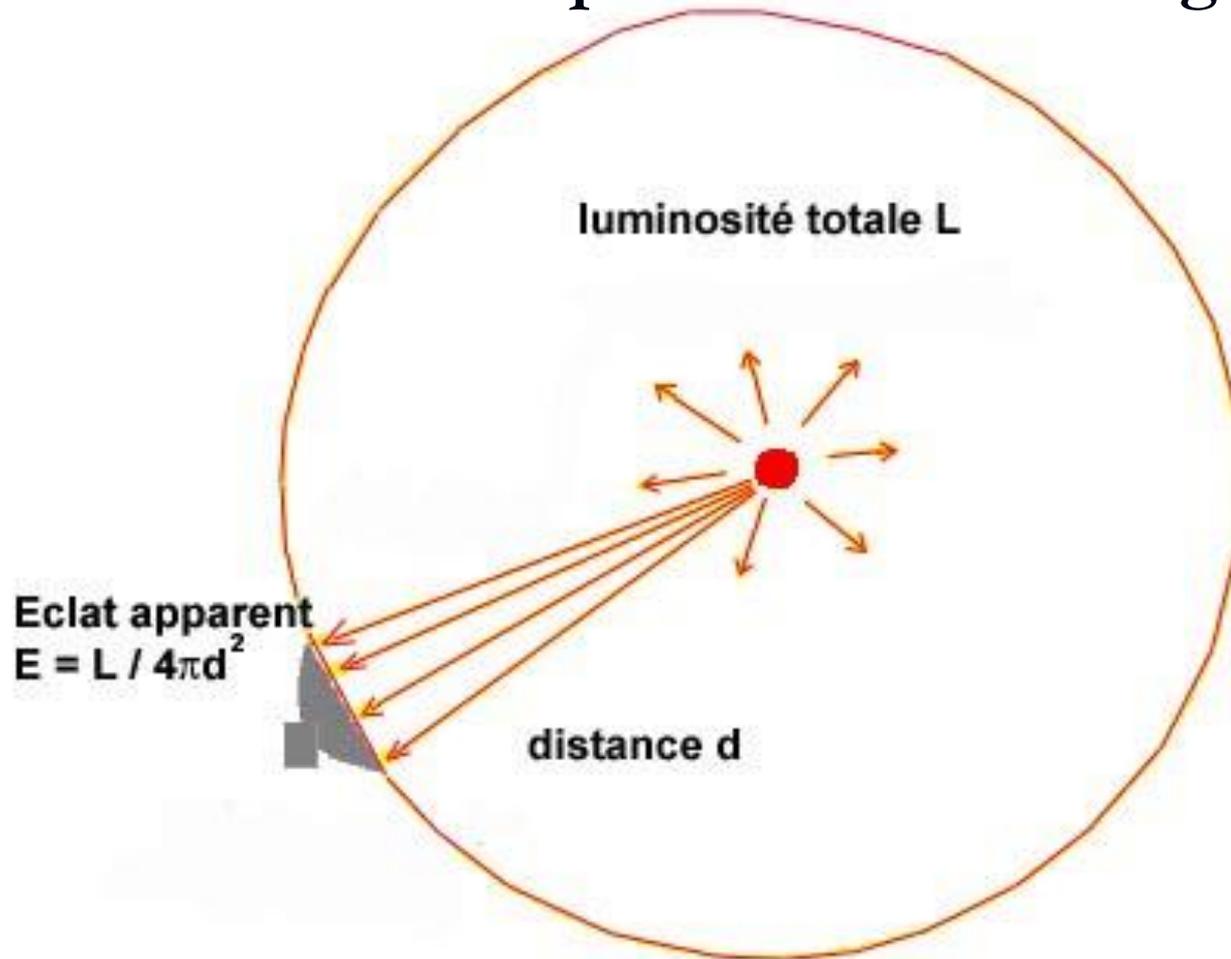
	km	temps de lumière
Lune	400 000	1 seconde
Soleil	150 millions	8 minutes
Jupiter	700 millions	40 minutes
Pluton	6 milliards	4 heures
Alpha du Centaure	40 000 milliards	4 années
Centre galactique	400 millions de milliards	35 000 années
Galaxie d'Andromède	12 milliards de milliards	1 million d'années
Galaxie 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? Oui: c'est la parallaxe annuelle avec une base de 300 millions de km



Cette méthode ne s'applique qu'aux étoiles proches de nous et nécessite une grande précision de mesure: les parallaxes annuelles sont toutes inférieures à une seconde de degré.

La luminosité des étoiles va suppléer la triangulation et l'astrométrie pour les étoiles éloignées

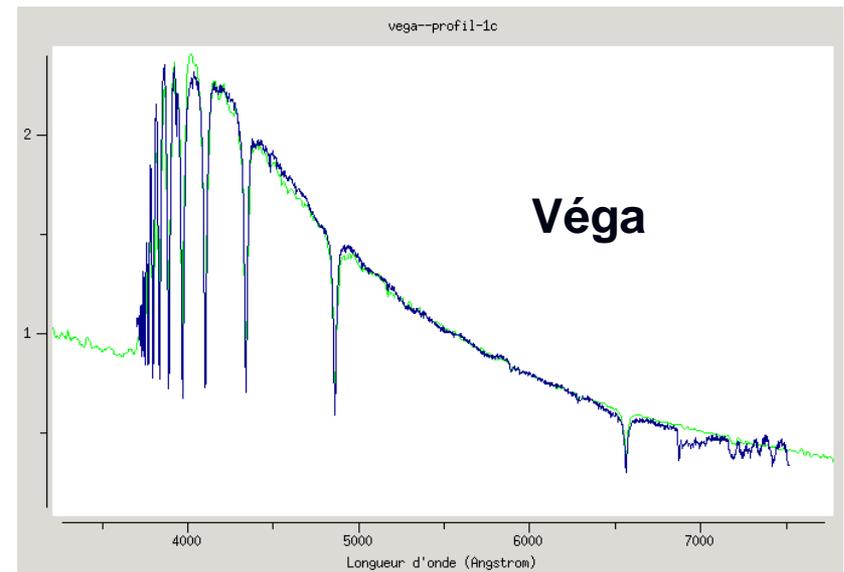
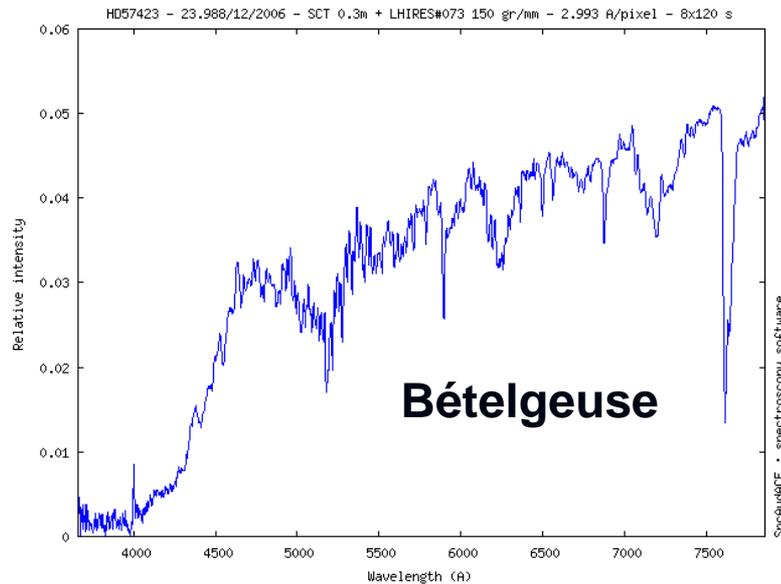
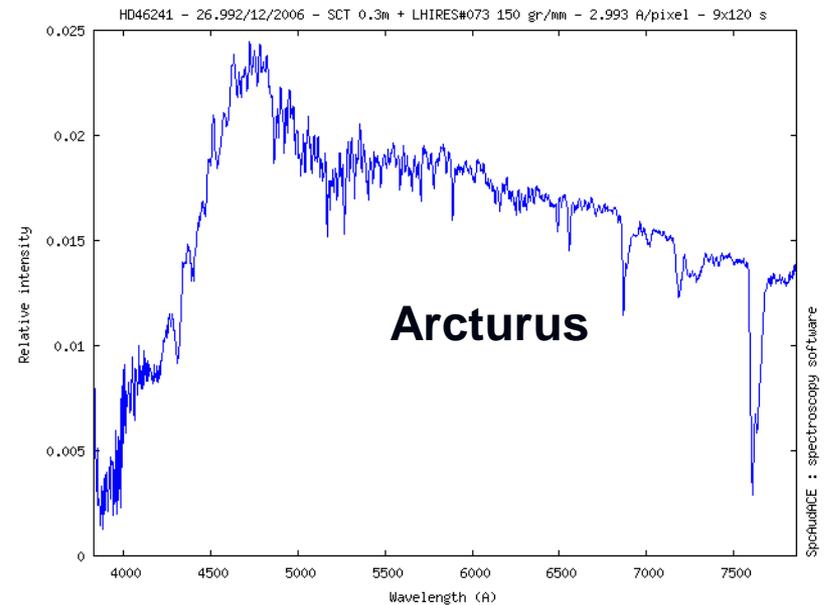
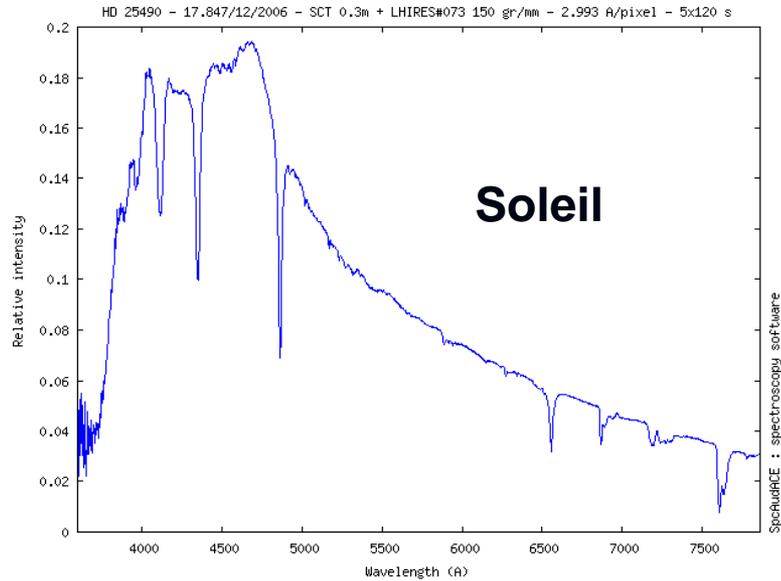


Plus une étoile est loin, moins elle est brillante (→ parallaxe photométrique)



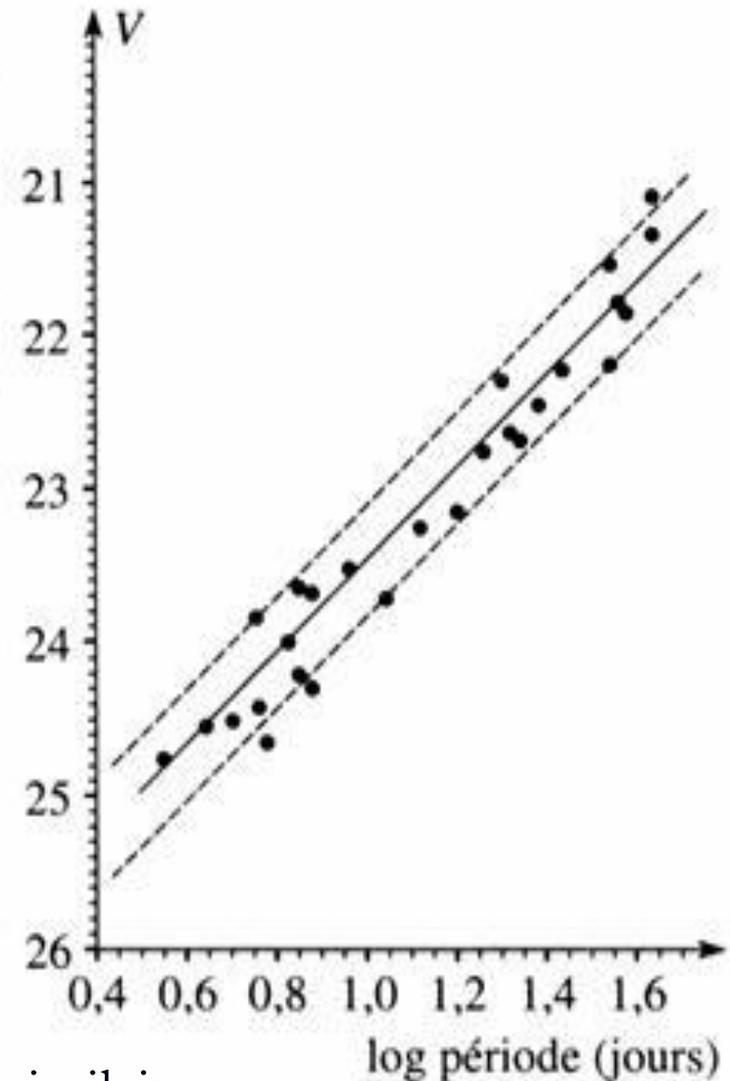
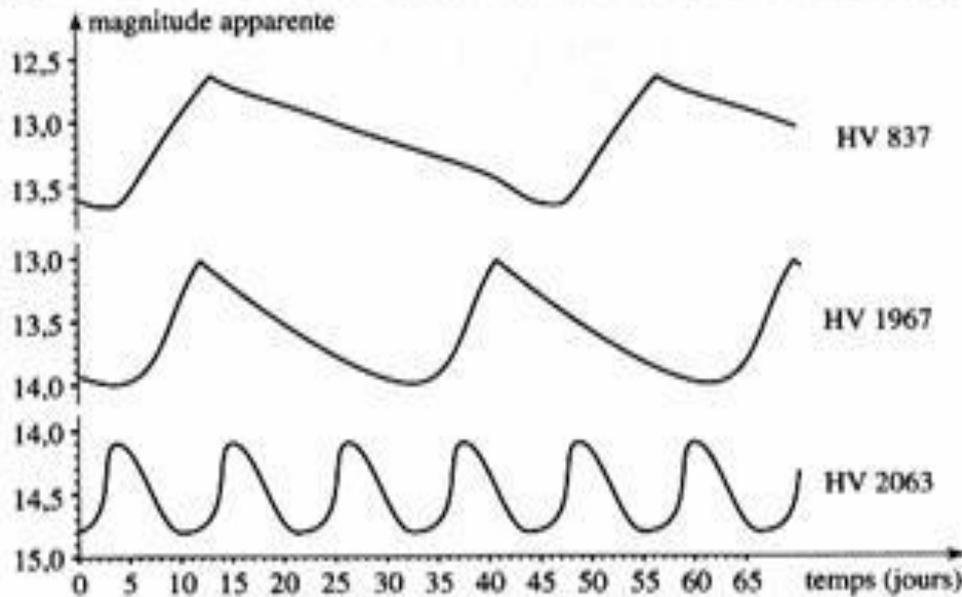
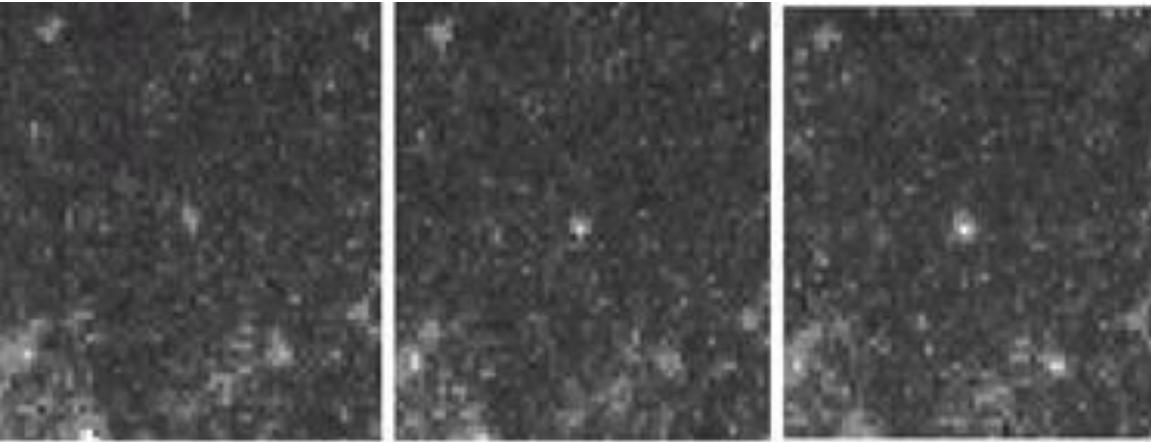
Plus le lampadaire est loin, moins il apparaît lumineux mais a-t-il la même puissance?

Caractériser les étoiles par leur couleur



Les étoiles de même spectre (couleur) ont une brillance similaire

Caractériser les étoiles par leur variabilité (les « céphéïdes »)

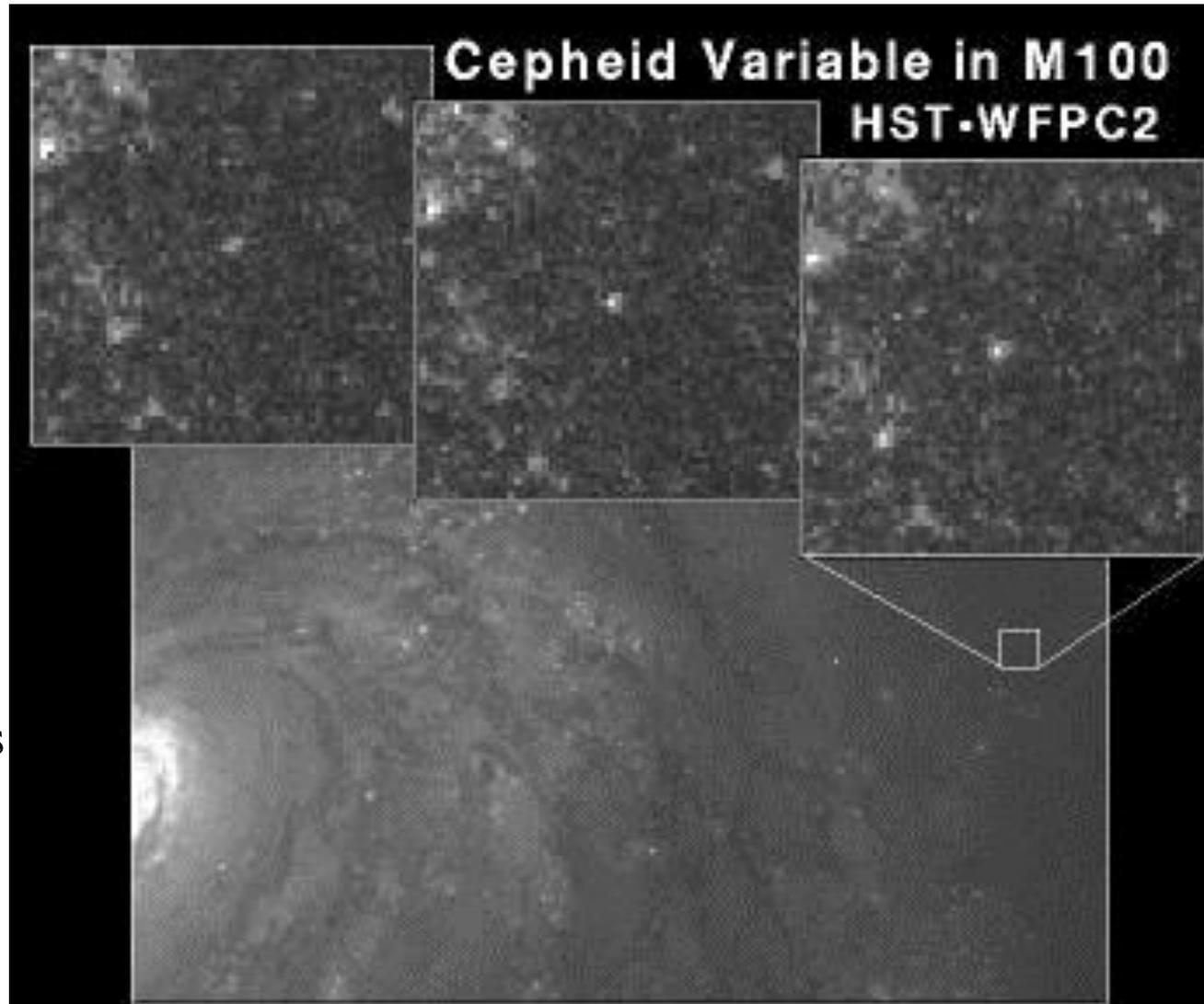


Les étoiles de même variabilité ont une brillance similaire

Et les galaxies?

- On distingue très difficilement les étoiles individuellement

→ les étoiles variables
« céphéïdes » sont
visibles dans les galaxies
proches



Et les galaxies?

→ 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)

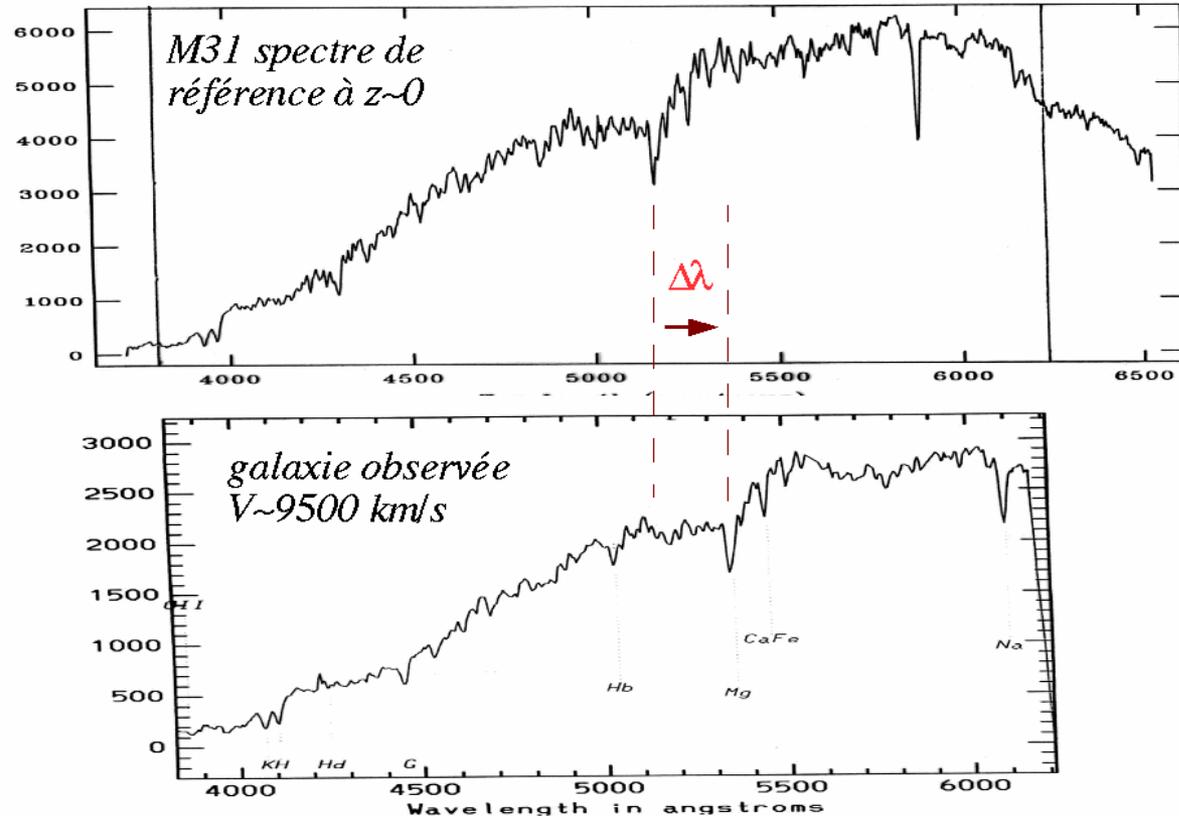


→ la rotation des galaxies donne une idée de leur taille et de leur distance. MAIS, ça ne colle pas vraiment bien!

La fuite des galaxies lointaines

La mesure du redshift

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



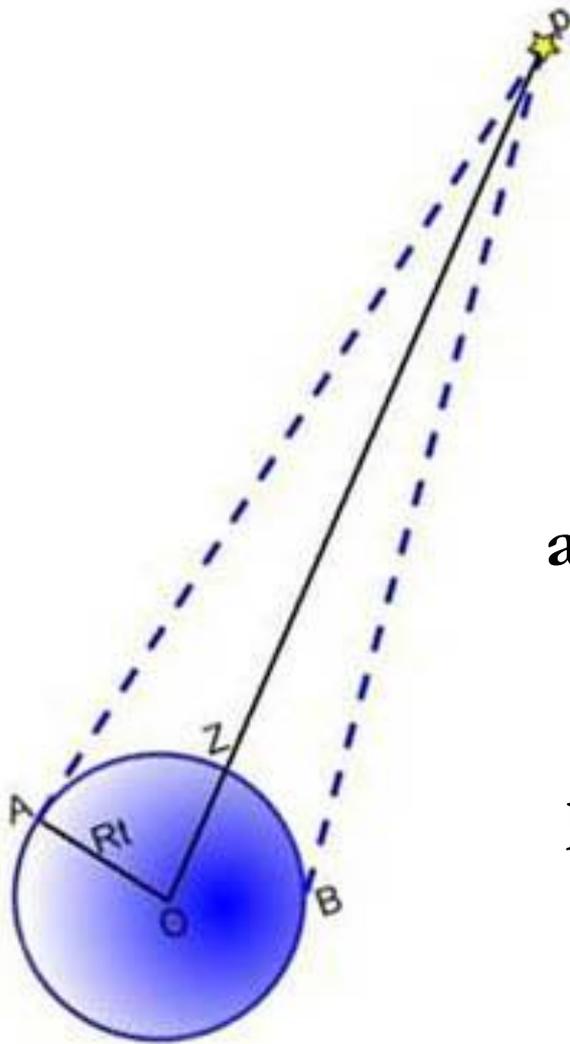
→ le modèle d'univers qui prévoit l'expansion des galaxies va pouvoir servir à comparer les distances relatives des galaxies, même les plus éloignées. MAIS, l'expansion semble accélérer!

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

Les techniques de l'astrométrie

L'astrométrie, c'est mesurer des angles pour obtenir des parallaxes, c'est mesurer des positions angulaires sur la sphère céleste pour obtenir des cartes du ciel ou catalogues d'étoiles



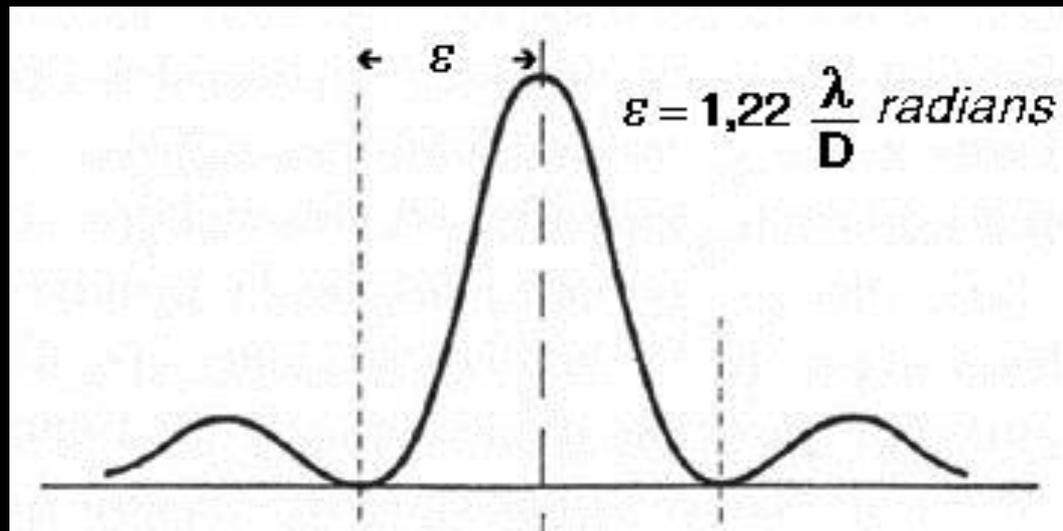
La parallaxe diurne

Parallaxe de la Lune = 1 degré = 3600 "

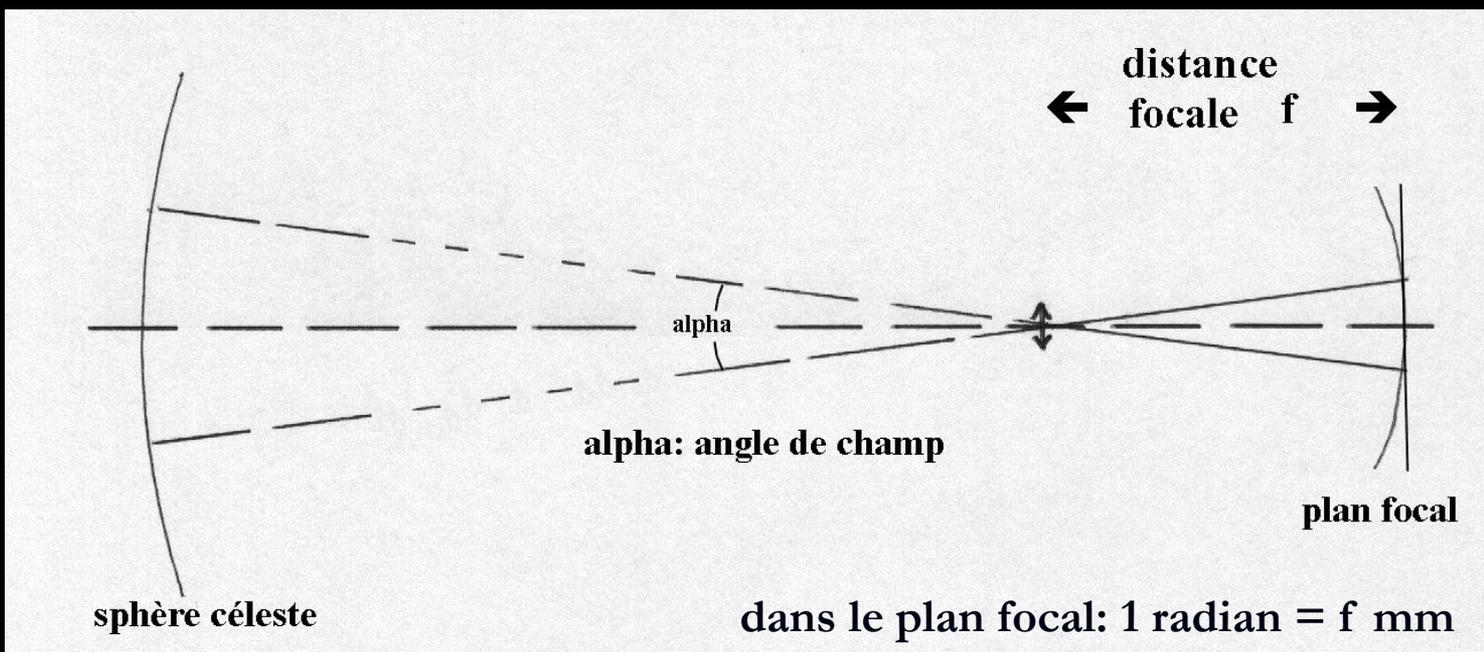
Parallaxe du Soleil = 8 "

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.

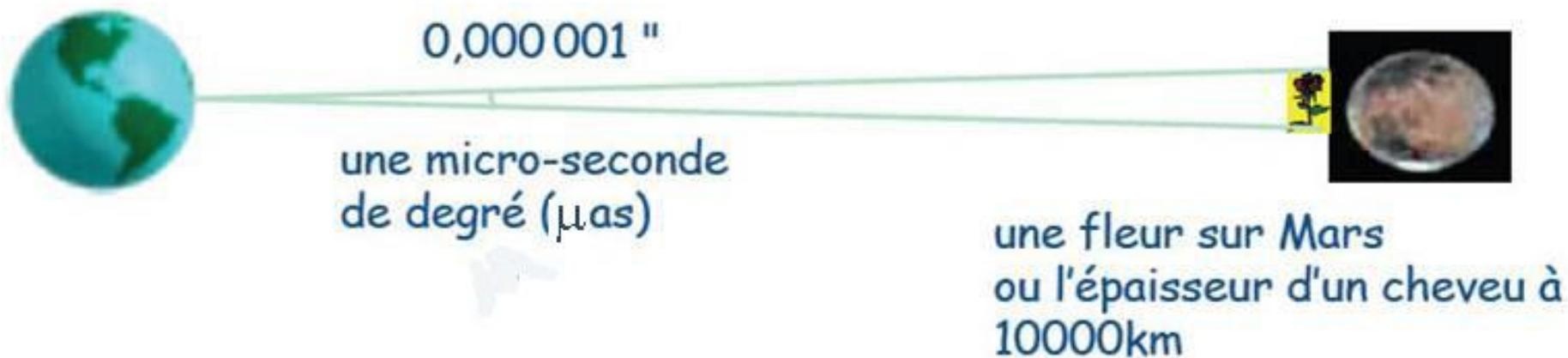
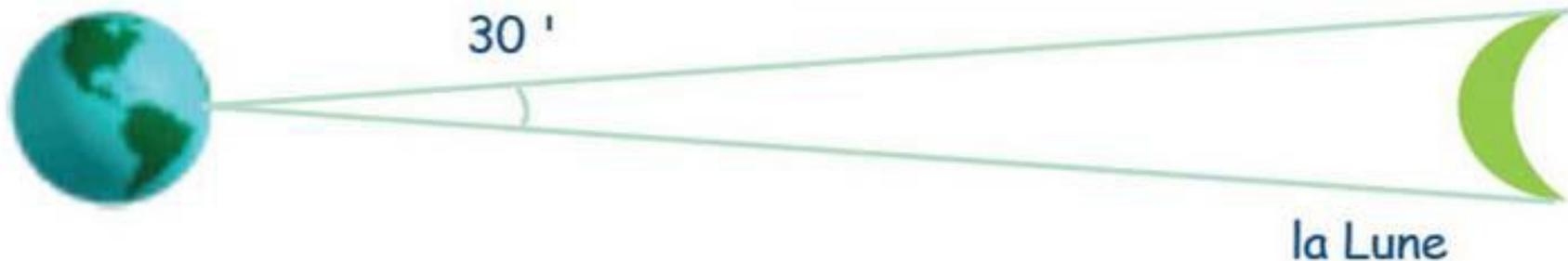
Exemples:

Télescope de Schmidt: 0 ".100

Télescope longue focale: 0".010

Hipparcos: 0".001

Gaia: 0 ".000001



Historique de la précision de mesure

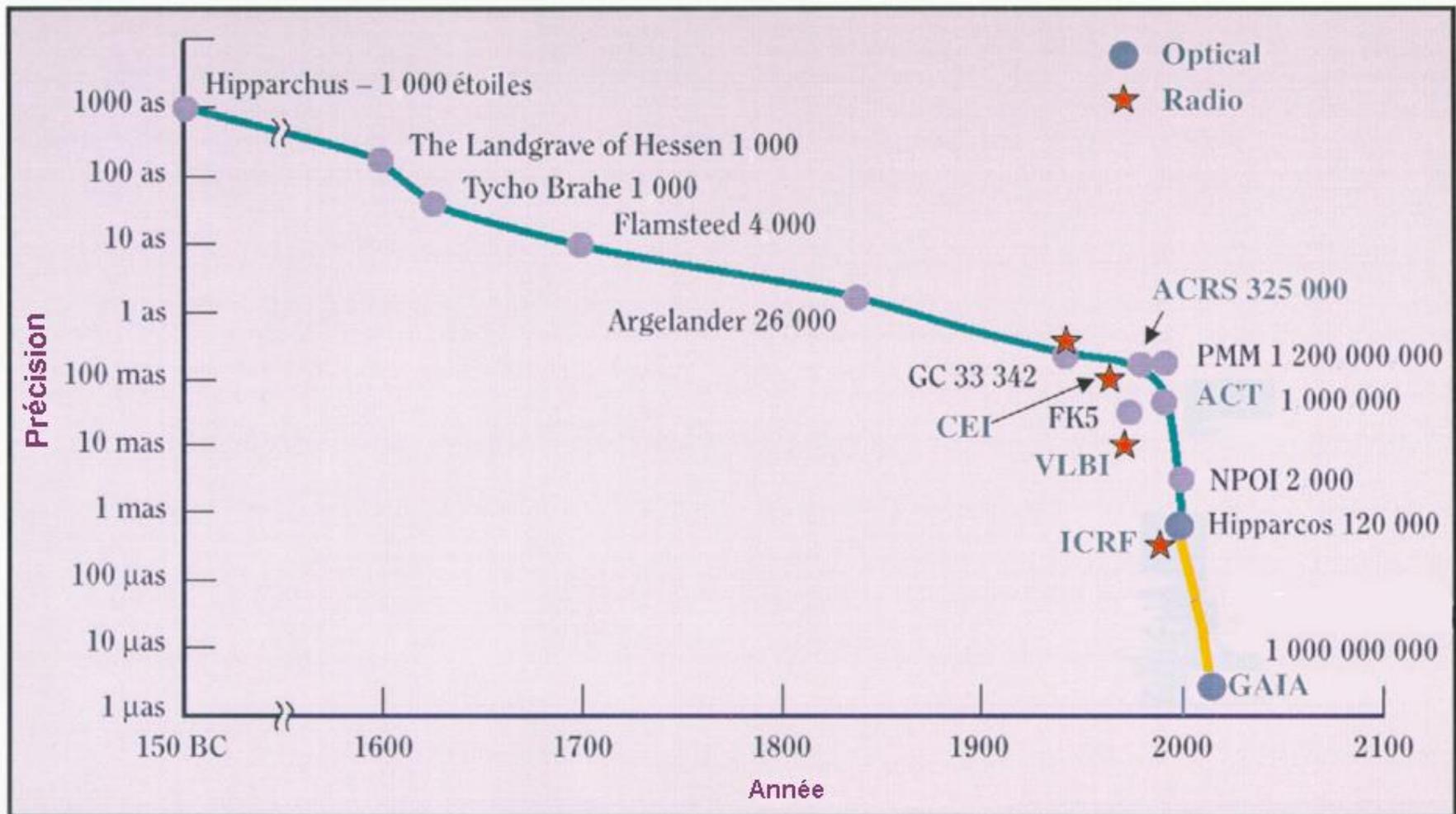
À l'œil nu:

- 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?

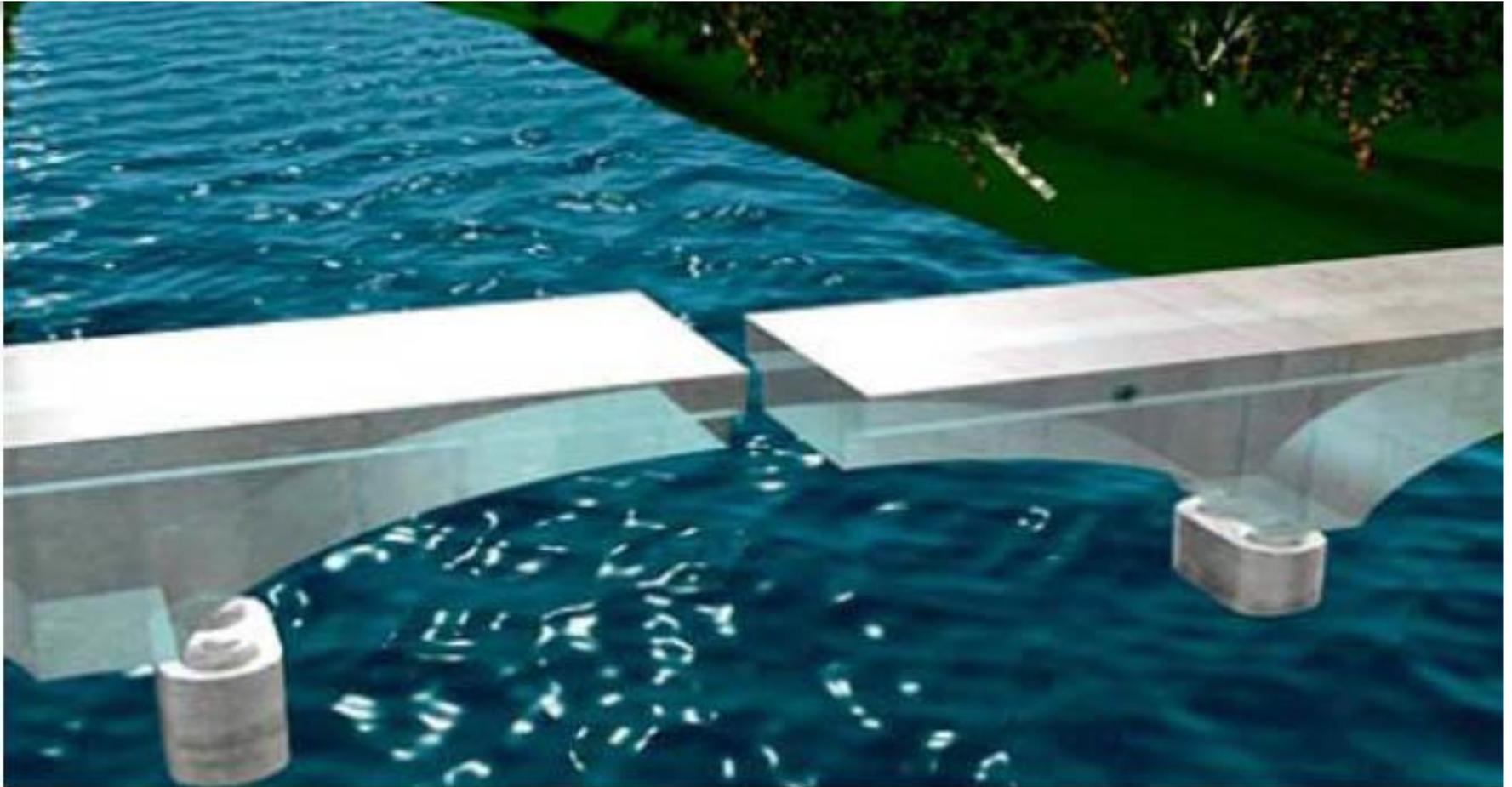
Évaluer une quantité avec un étalon

- 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



Design error at bridge construction in Laufenburg (2003): During the construction of the bridge across the Rhine river in Laufenburg, a control showed that a height difference of 54 centimeters exists between the bridge built from the Swiss side and the roadway of the German side. Reason of the error is the fact that the horizons of the German and Swiss side are based on different reference frames. Germany refers to the sea level of the North Sea, Switzerland to the Mediterranean.

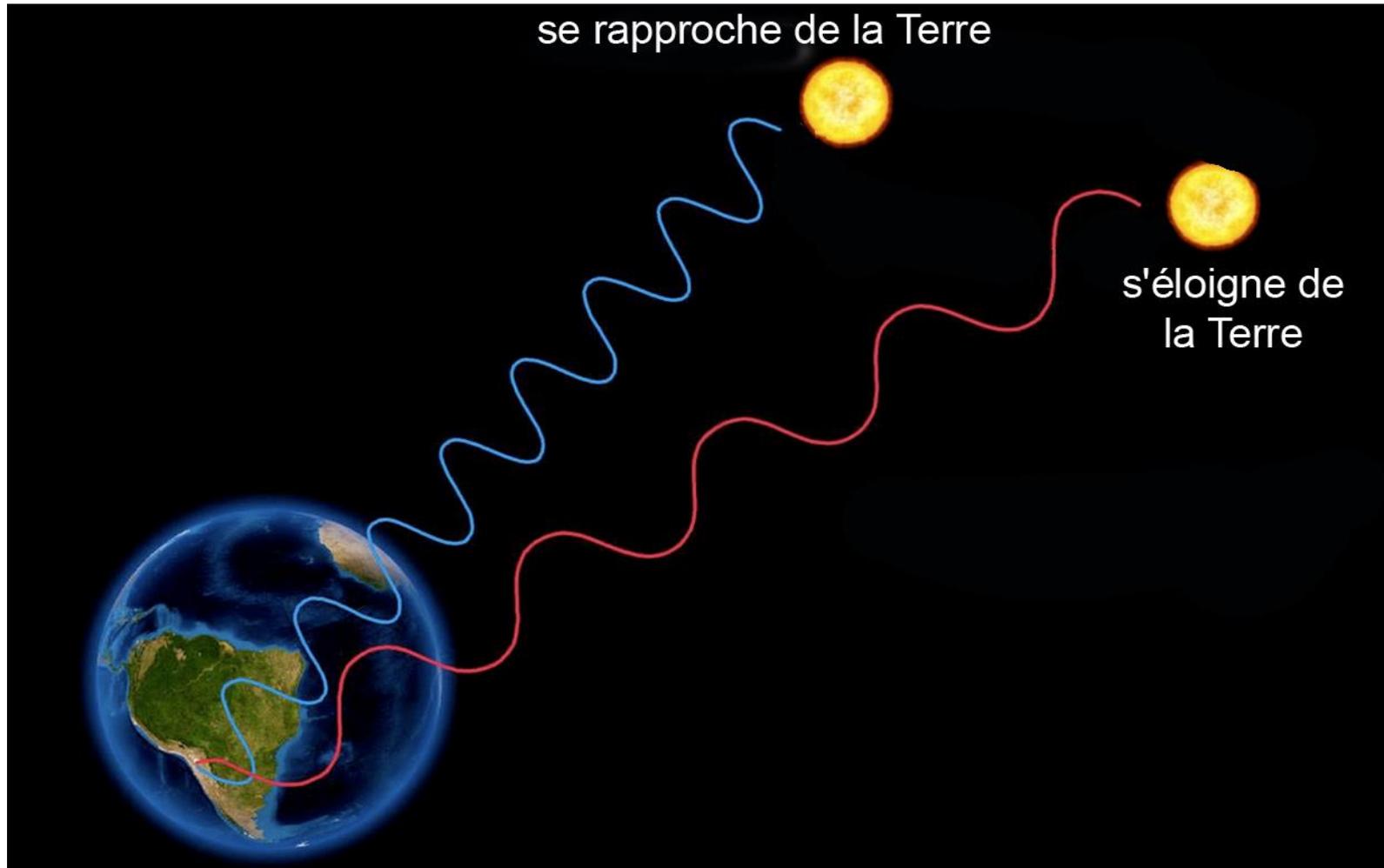
Courtesy of Hermann Drewes / DGFI

La différence entre précision et exactitude

Deux techniques pour l'astrométrie: une mesure angulaire ou une mesure directe de distance ou de vitesse

- Mesurer la position angulaire 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 à convertir en angle
- Mesurer la distance ou la vitesse radiale
 1. Mesurer une distance par tir radar sur un objet proche (astéroïdes)
 2. Mesurer la vitesse radiale par décalage Doppler (planètes extrasolaires, galaxies)

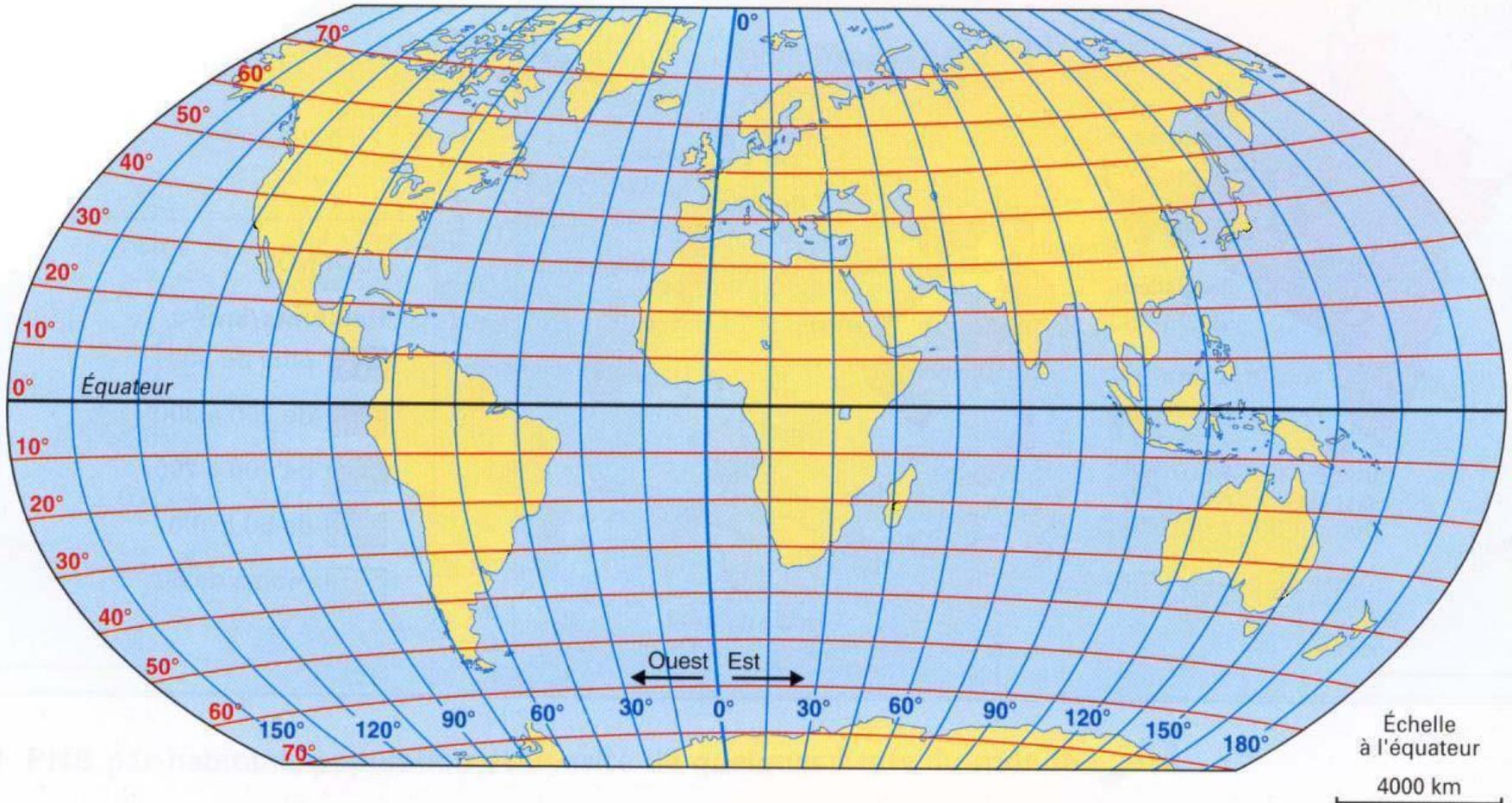
L'effet Doppler: mesurer la vitesse radiale des étoiles



Détection des planètes extra solaires

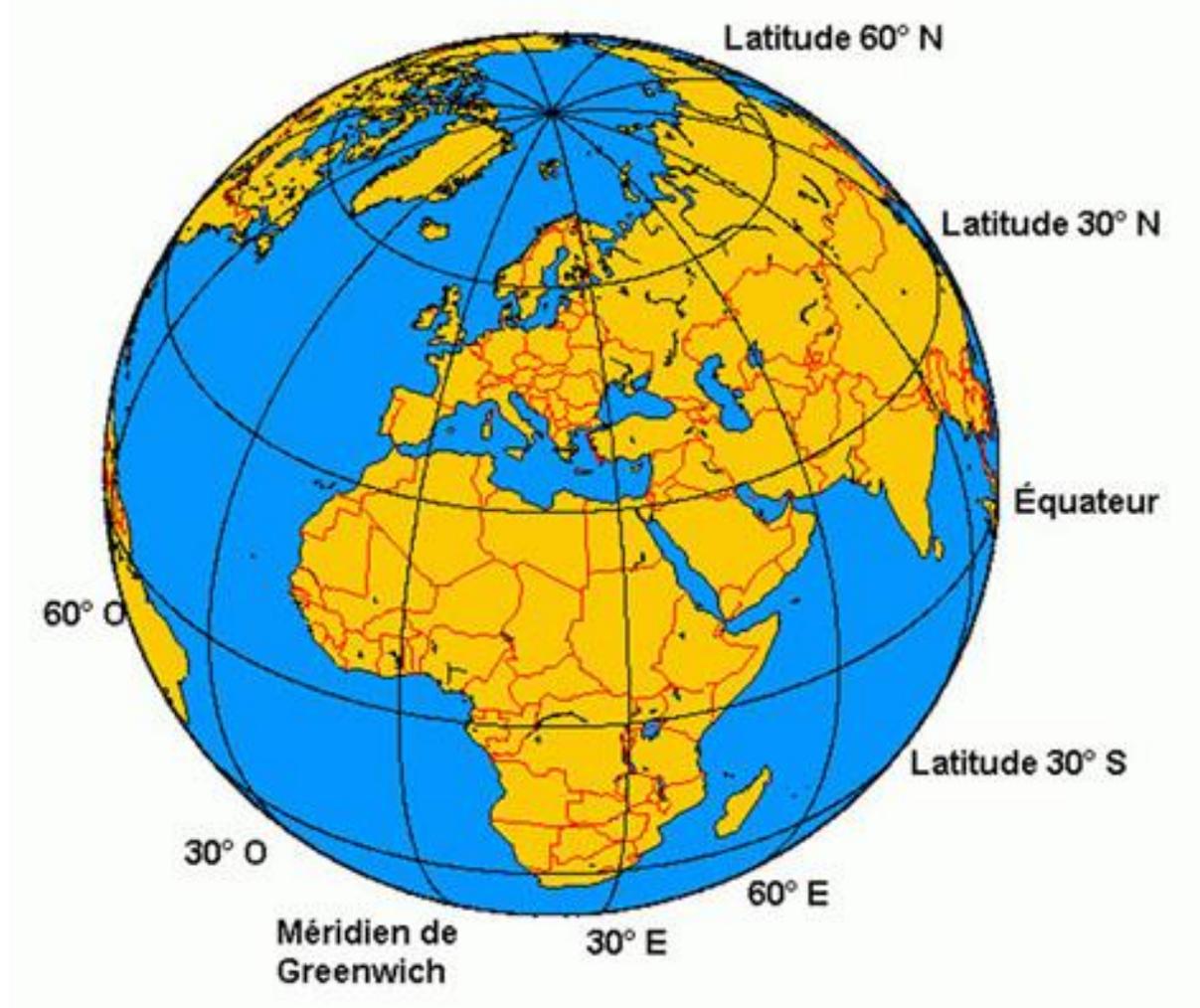
- **Comment mesurer la position angulaire d'un objet:**
 - Par rattachement à des astres proches connus (imagerie)
 - Par rapport au référentiel de l'observateur (cas de la méridienne)
 - Lors d'un phénomène particulier (éclipse, passage – cas de la méridienne)
- **Dans les deux premiers cas, il faut se ramener à un référentiel commun espace-temps pour tous les observateurs**

Comment mesurer des positions: rappel: les coordonnées géographiques



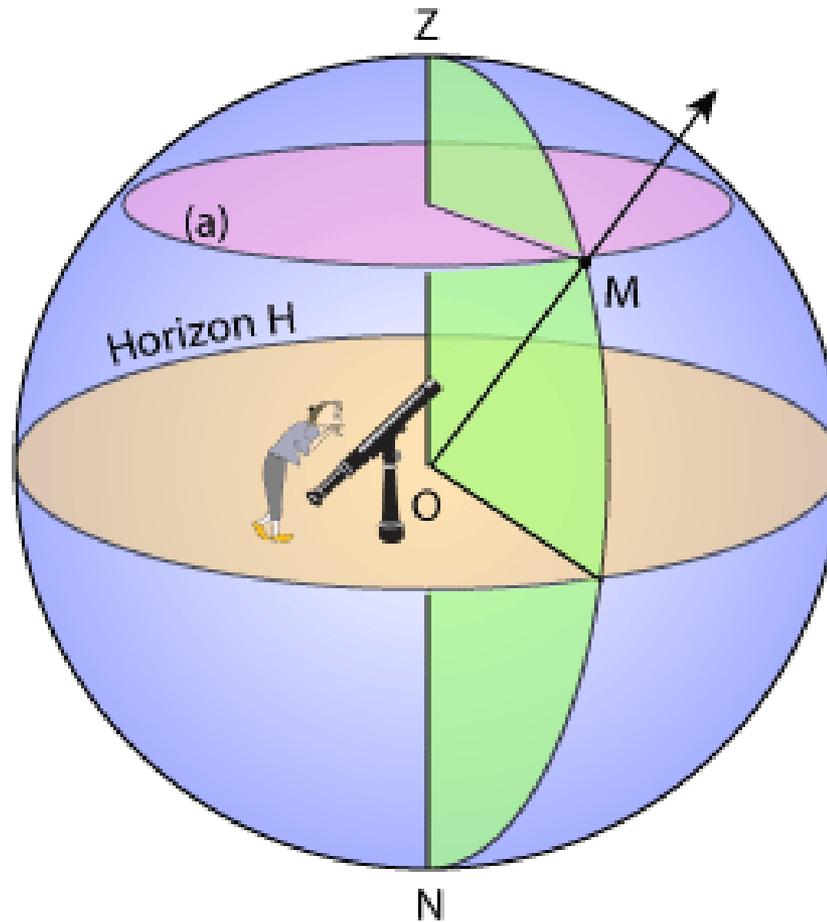
un système permettant de se localiser sur Terre
et on va faire de même avec la sphère céleste

Comment mesurer des positions: rappel: les coordonnées géographiques



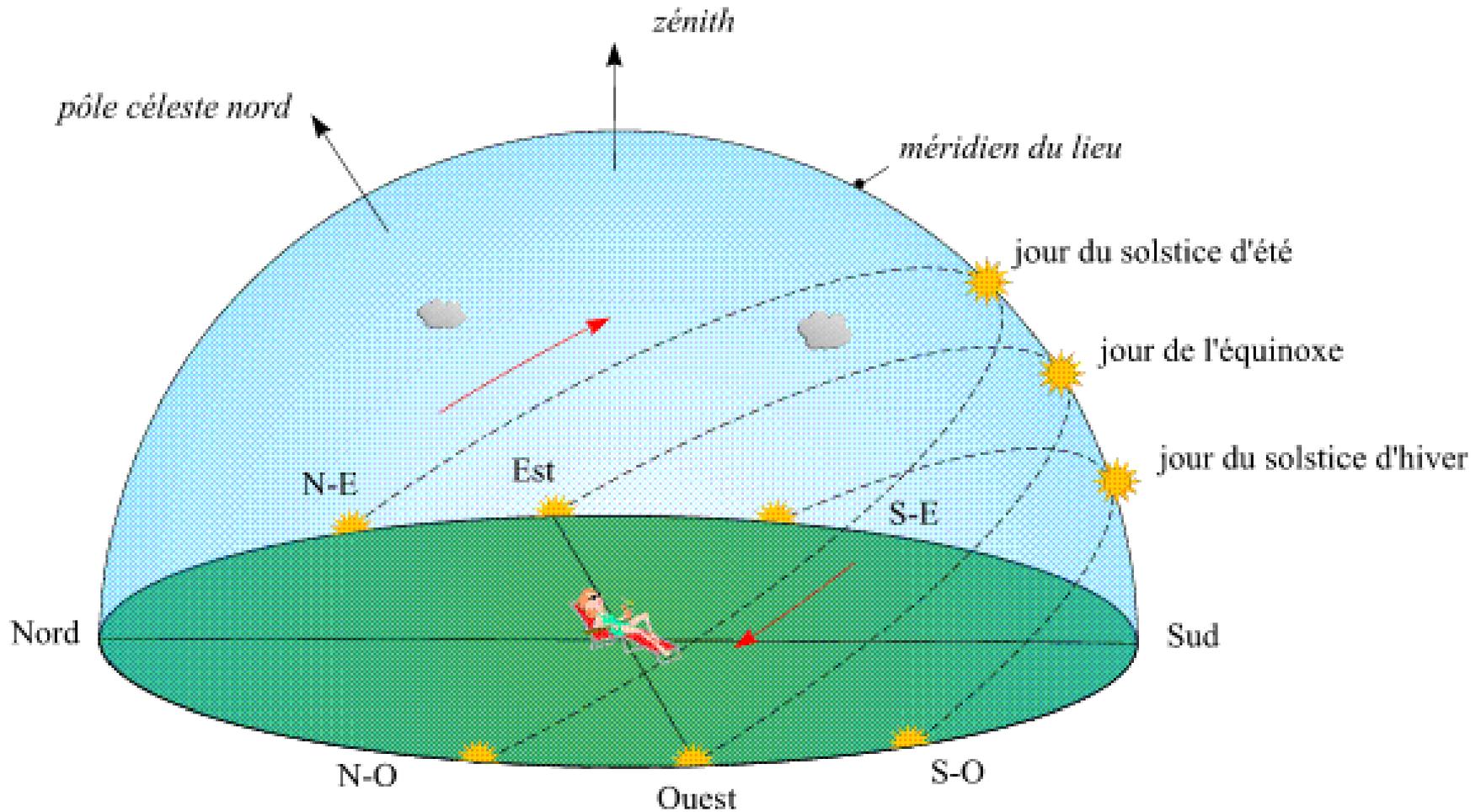
un système applicable à la sphère céleste si ce n'est
que cette sphère tourne par rapport à la Terre

Un système pour se repérer: définir un pôle et un équateur



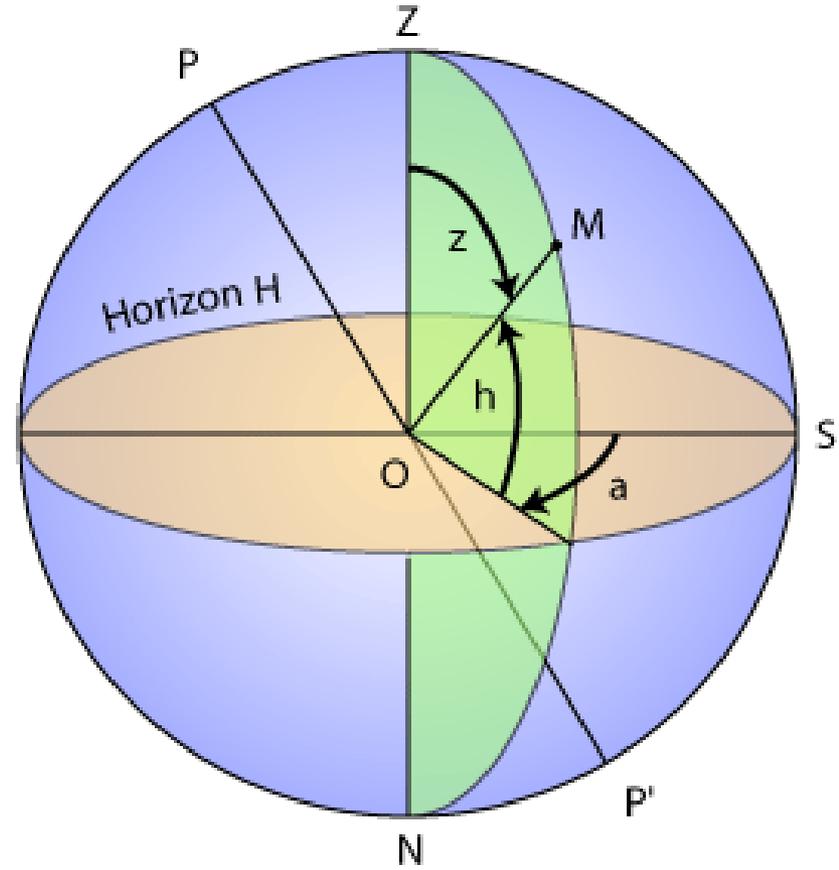
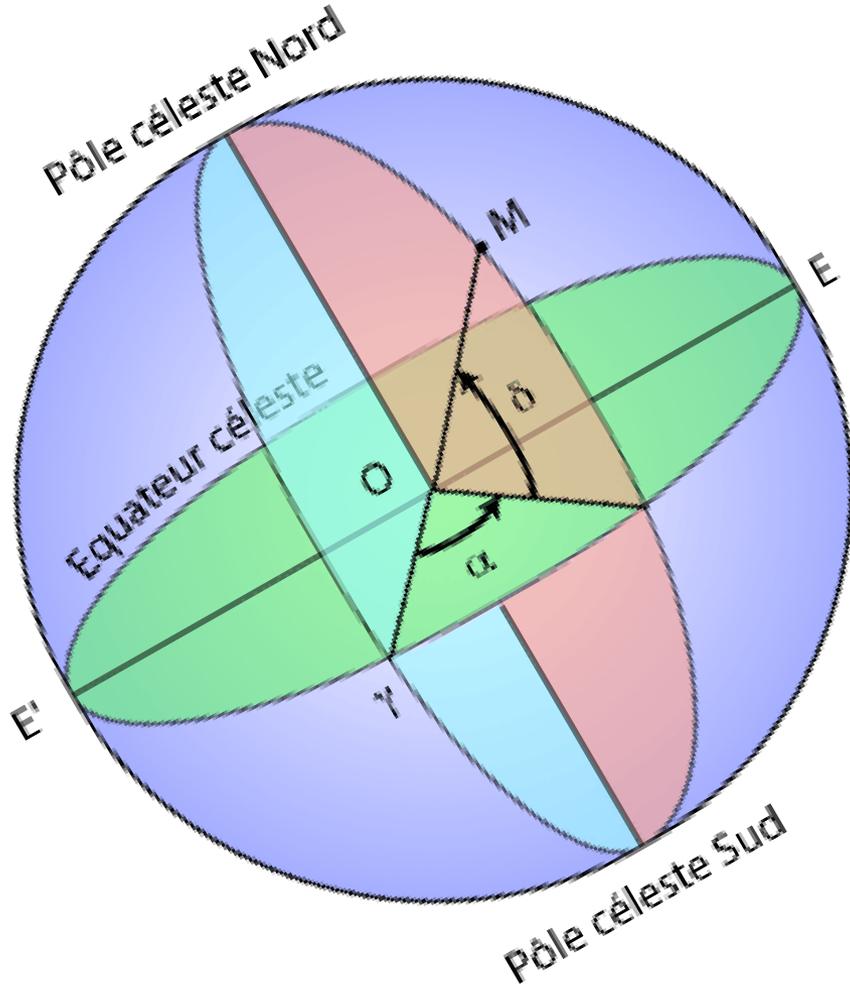
Un système qui dépend de chaque lieu d'observation

Le mouvement apparent du Soleil et des étoiles



dessine un nouveau référentiel local avec un pôle et un équateur

Un système commun pour tous



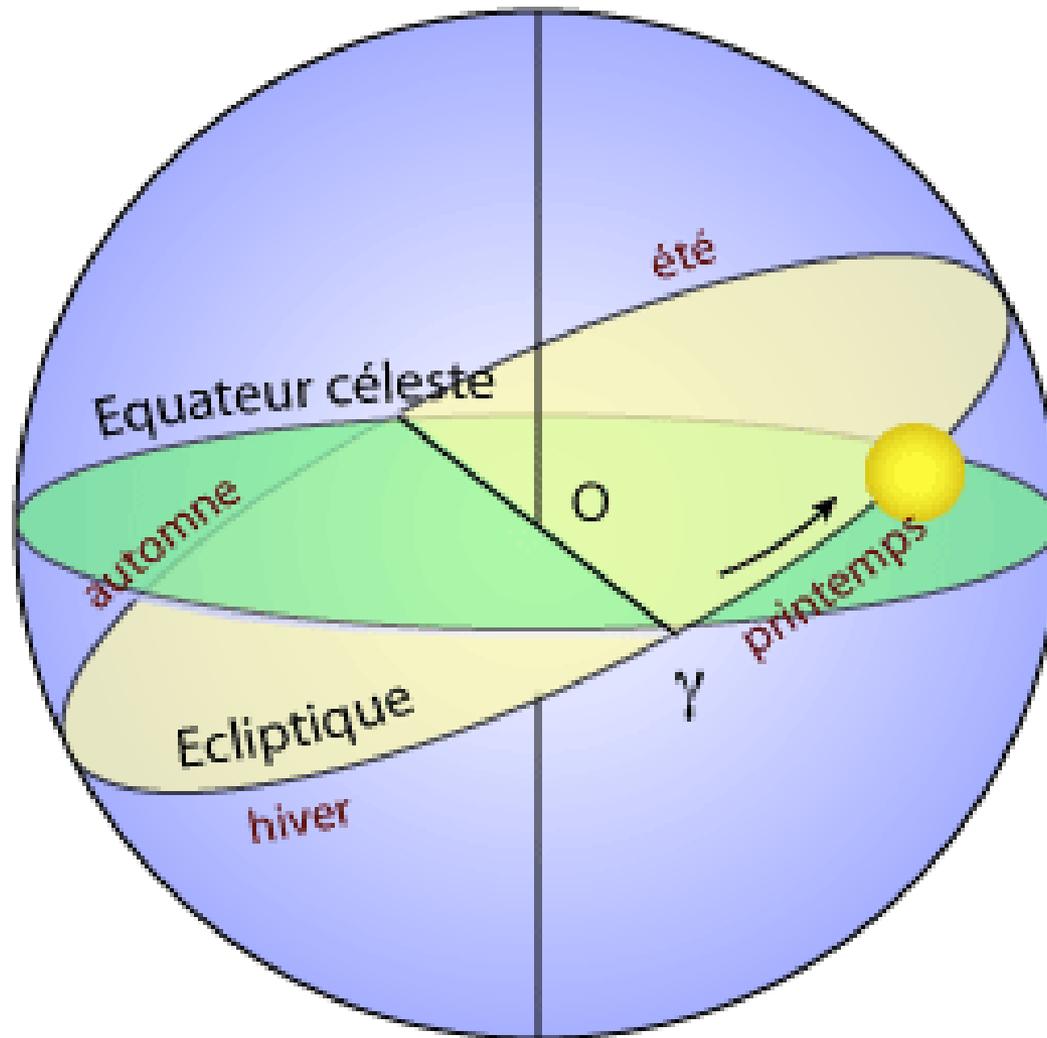
Référentiel:

équatorial

local

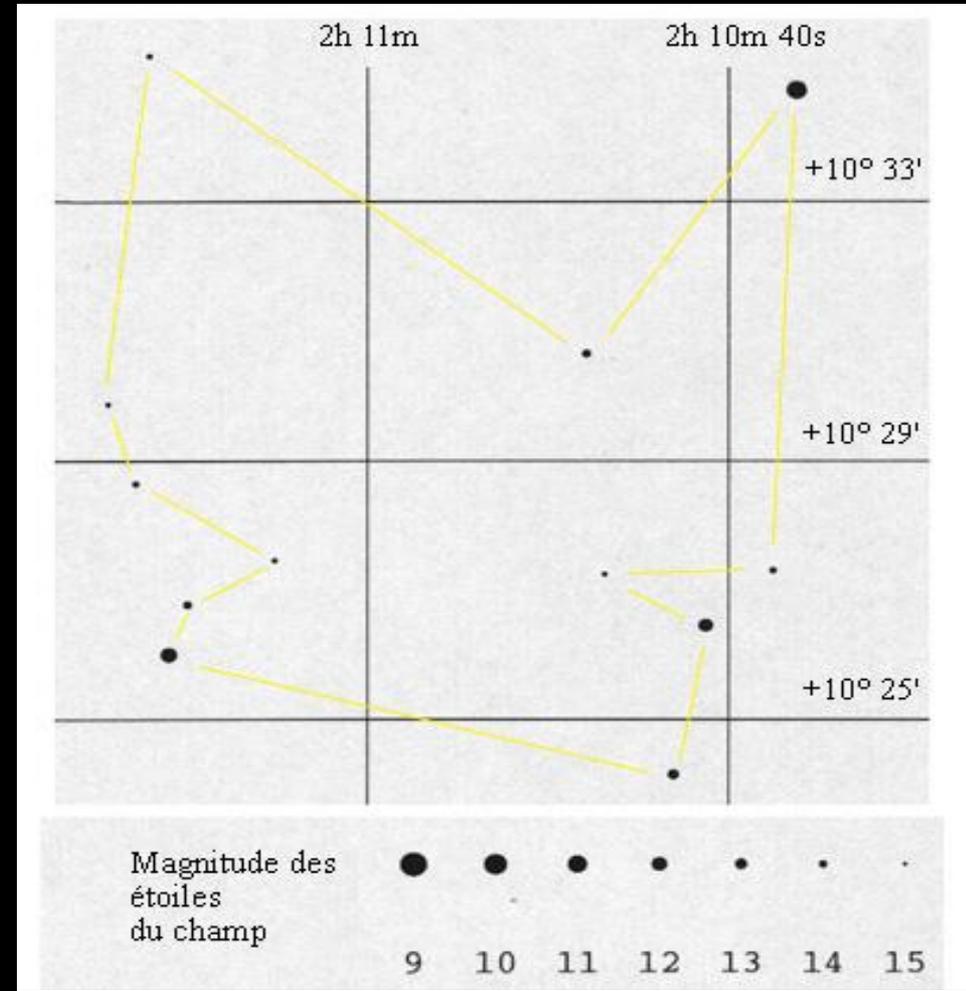
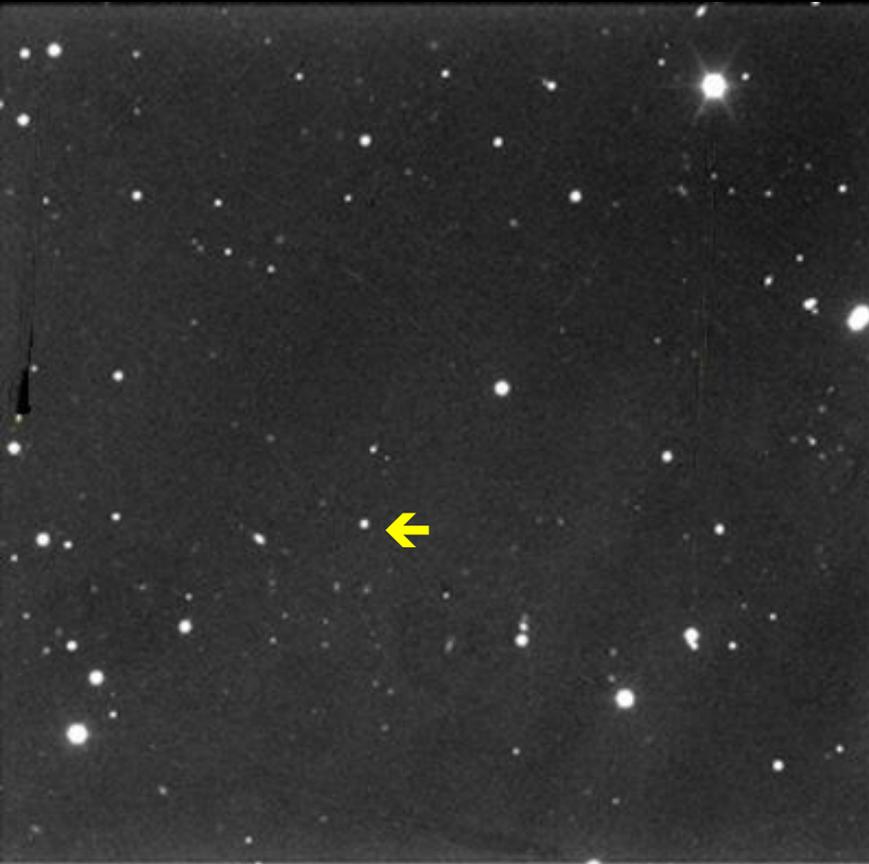
Trouver une origine (des longitudes) dans un ciel où tout bouge!

Pôle céleste Nord

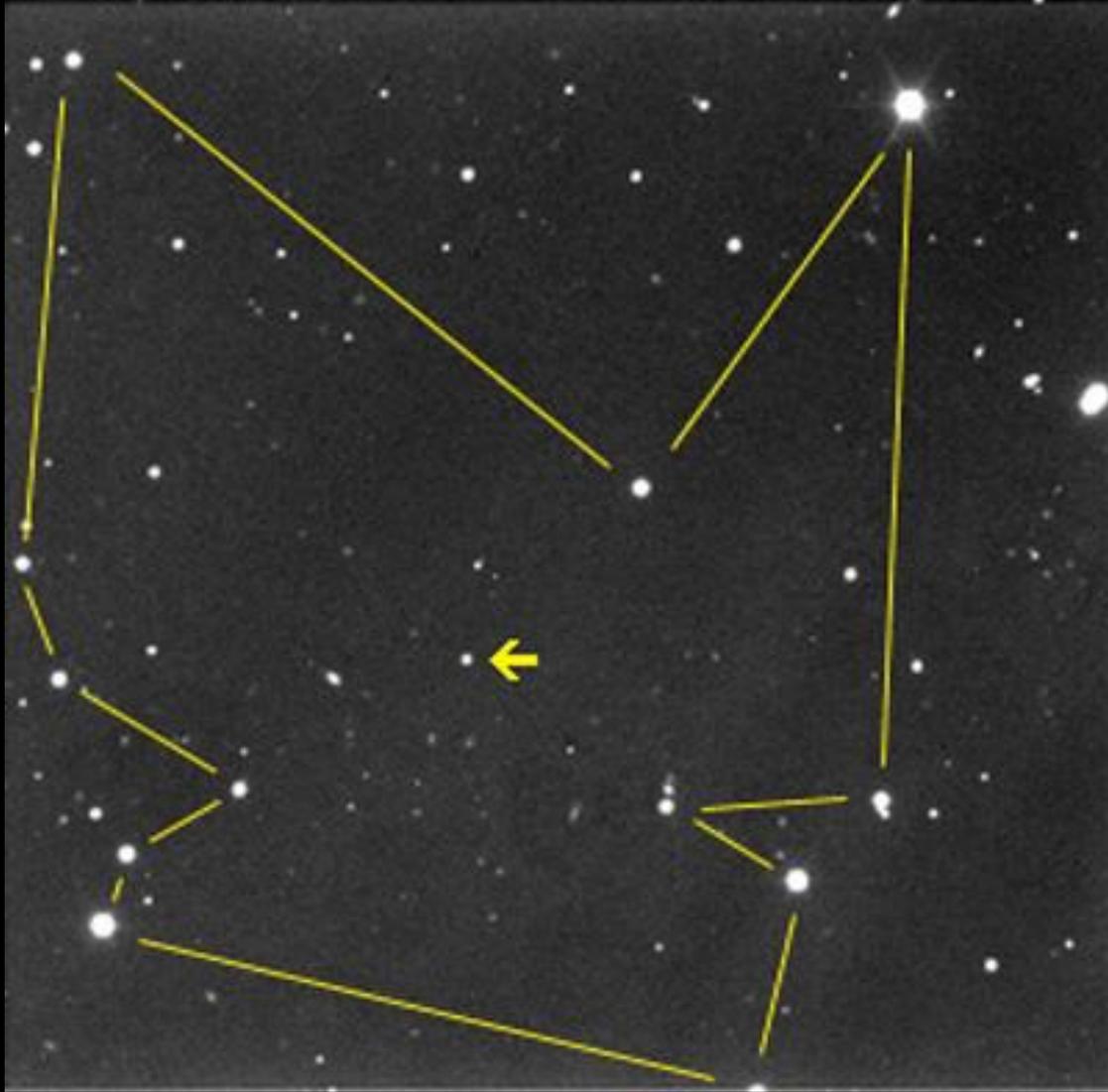


Pôle céleste Sud

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 les positions.



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

Le rattachement

■ La projection gnomonique

(X et Y: coordonnées « tangentielles »)

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

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

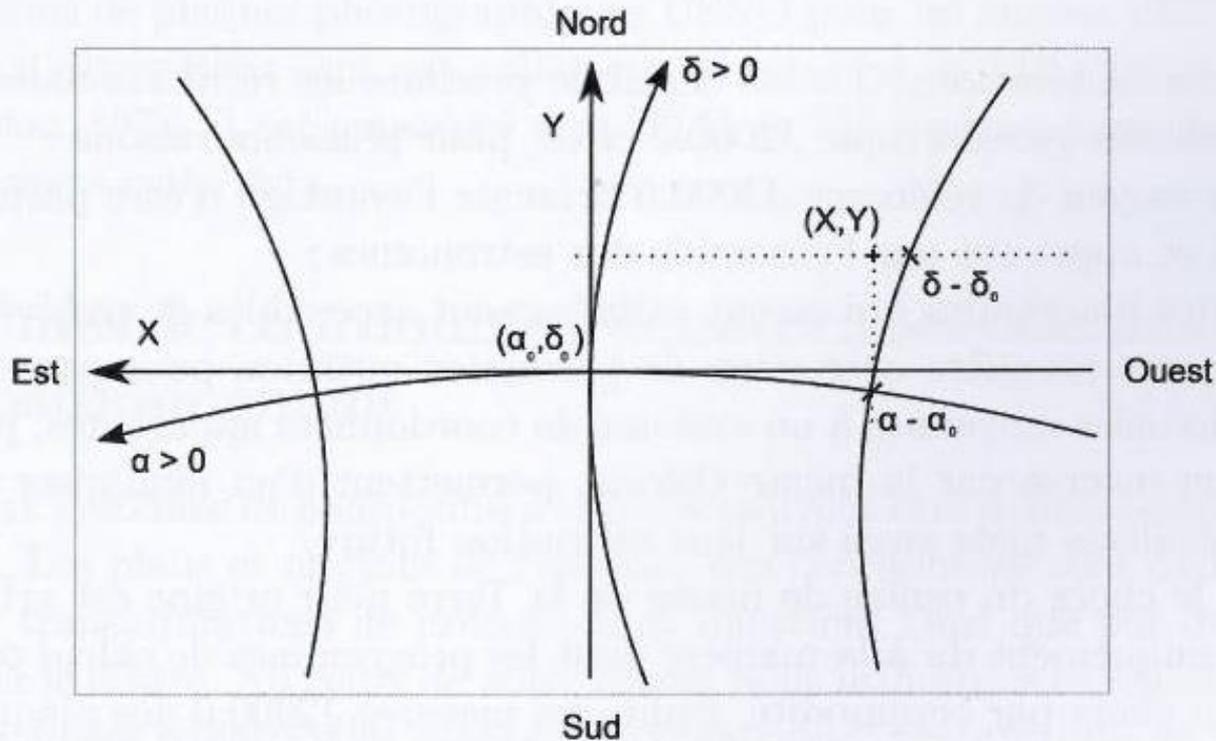
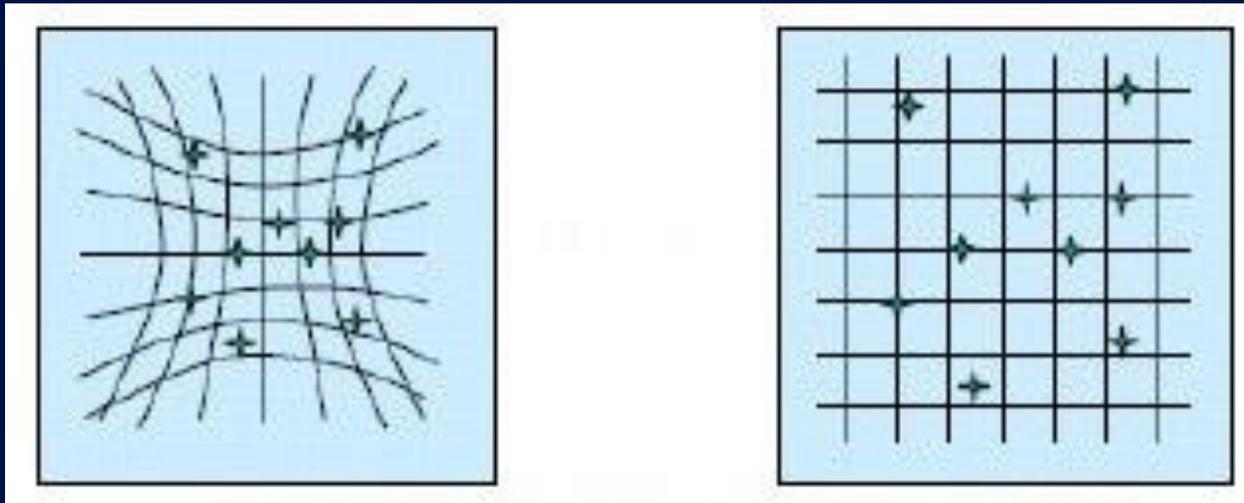


Figure 2.1 – Représentation tangentielle (plane) d'un champ sphérique.

La distorsion du champ



- À gauche, l'image enregistrée déformée par les imperfections de l'optique du télescope
- 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 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

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

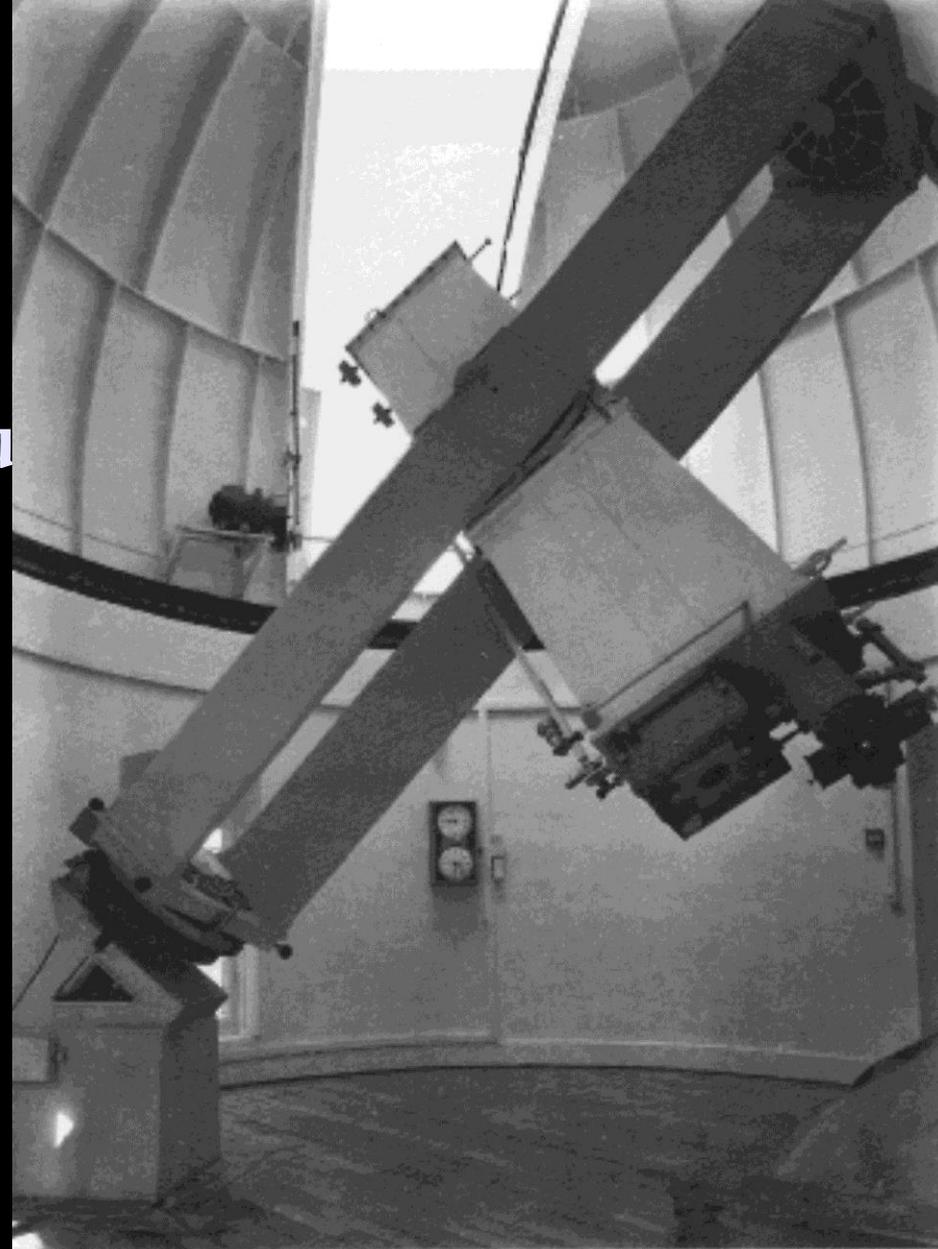
Date	Nom	Nb d'étoiles	Mag limite	Précision mas	Précision mvts propres	Origine
1997	Hipparcos	120 000	12.4	< 0.78	< 0.88 mas/an	obs. spatiales
2000	Tycho 2	2 500 000	16	< 60	< 2.5 mas/an	de Tycho et 143 sources
1998	USNO A2	526 280 881				
2001	GSC II	19 000 000		360		Plaques Schmidt
2003	USNO B1	1 milliard	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

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!

La « carte du ciel », un
grand projet de la fin du
XIX^{ème} siècle

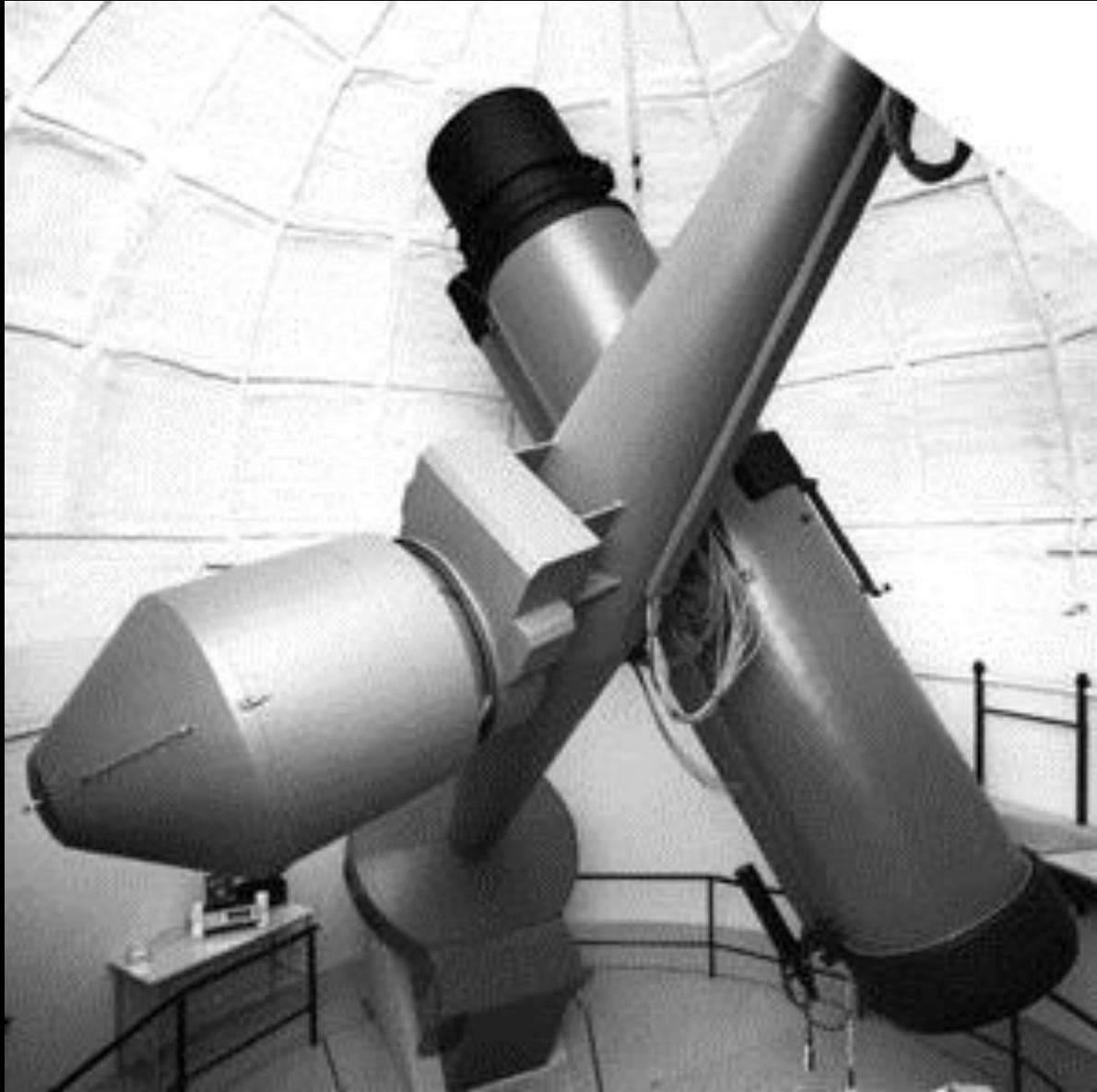
Monture équatoriale à berceau



ÉQUATORIAL DE LA CARTE DU CIEL

Instrument composé de deux lunettes, l'une photographique, l'autre visuelle. L'objectif photographique a été taillé par les frères Henry.

Le télescope de Schmidt: un grand champ



Monture équatoriale anglaise

Un télescope spatial pour s'affranchir de l'atmosphère terrestre



Télescope spatial Hubble Space Telescope : diamètre 2.4m, focale 57.6m, conception Cassegrain (Ritchey-Chrétien)

L'astrométrie aujourd'hui: Gaia, un satellite astrométrique hors de l'atmosphère

Le but du projet GAIA est de produire un nouveau catalogue d'un milliard d'étoiles avec une précision de 0.1 à 0.001 mas selon la magnitude.

Les parallaxes pourront être calculées pour un milliard étoiles avec une bonne précision jusqu'à 10 000 parsec(*).

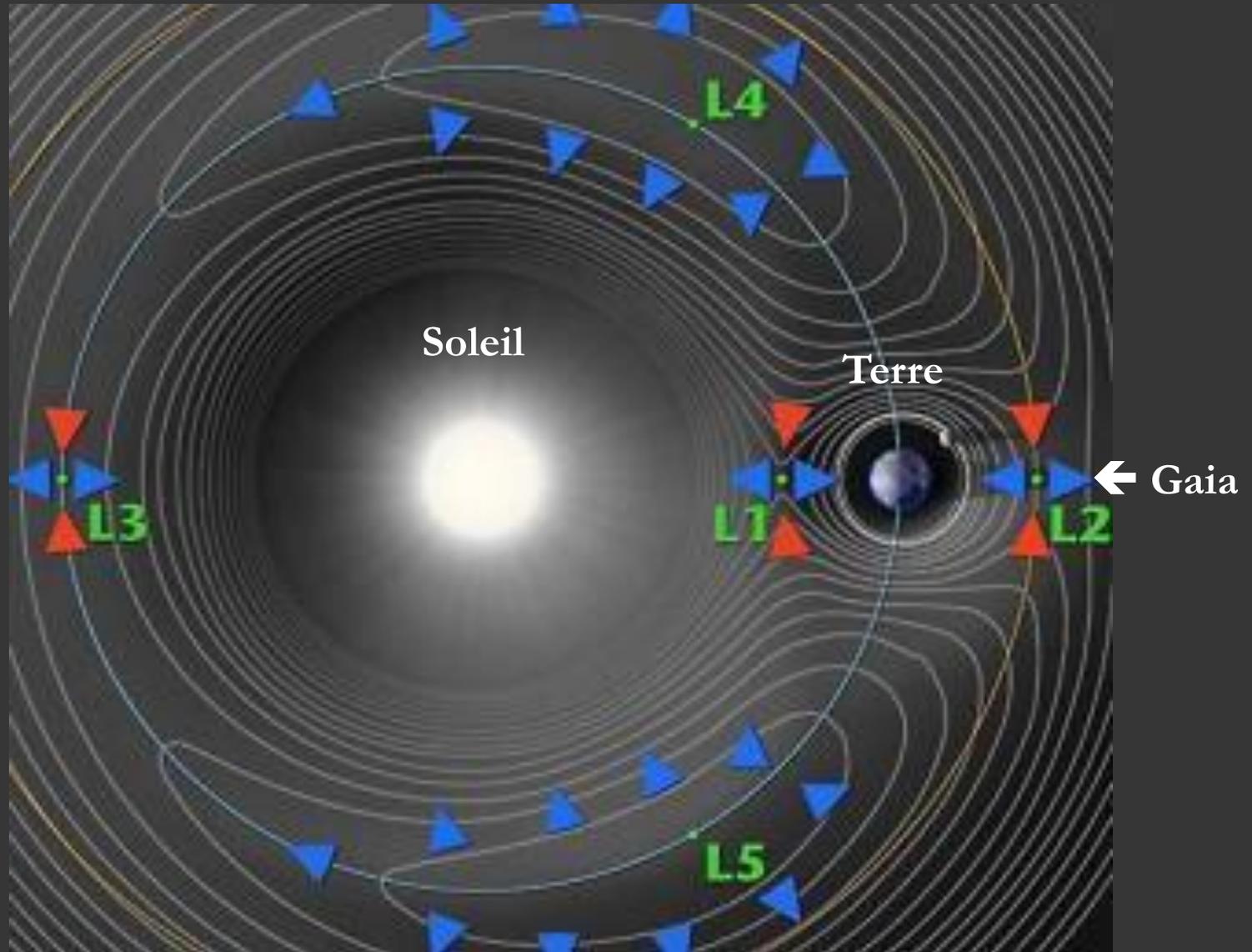
(*): un parsec = distance d'une étoile dont la parallaxe annuelle est égale à une seconde de degré

Gaia, satellite astrométrique

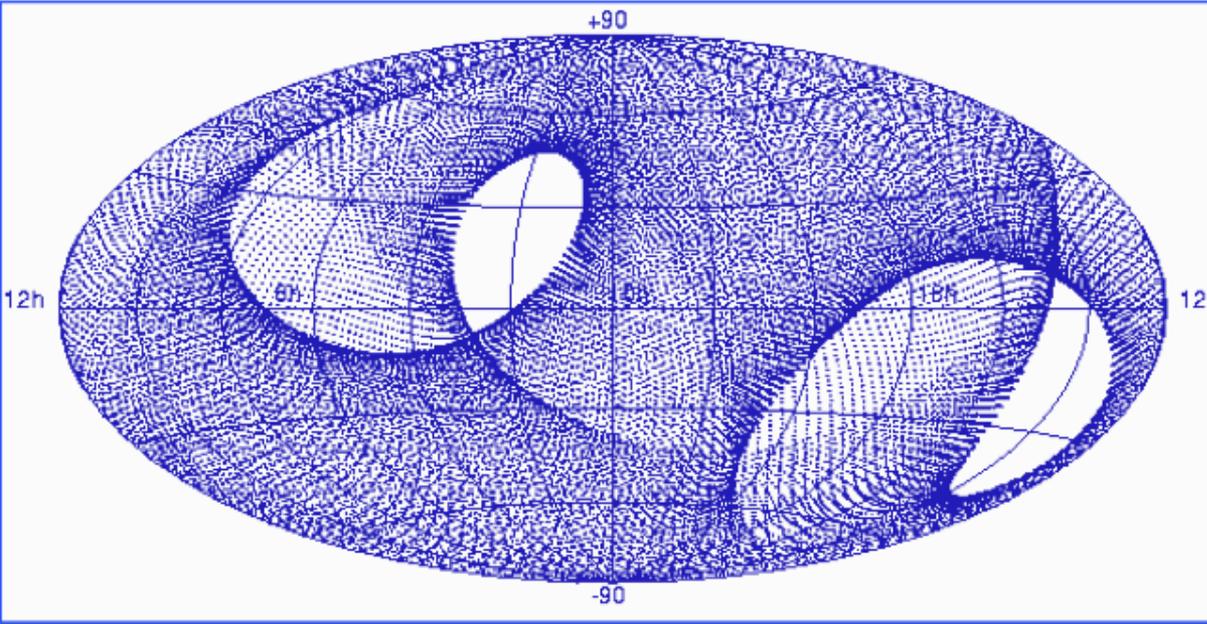
Contrairement aux catalogues précédents, Gaia ne va pas partir d'un catalogue existant à améliorer (comme l'« input catalog INCA» d'Hipparcos ou l'UCAC pour SIM) mais réaliser une astrométrie globale du ciel (ce qui conduira à inverser une matrice un milliard-un milliard en fin de mission...).

Gaia ne fait pas d'astrométrie par rattachement mais mesure directement des positions sur la sphère céleste par rapport à ses propres repères (quasars, objets « fixes »).

Les « points de Lagrange » de l'orbite terrestre

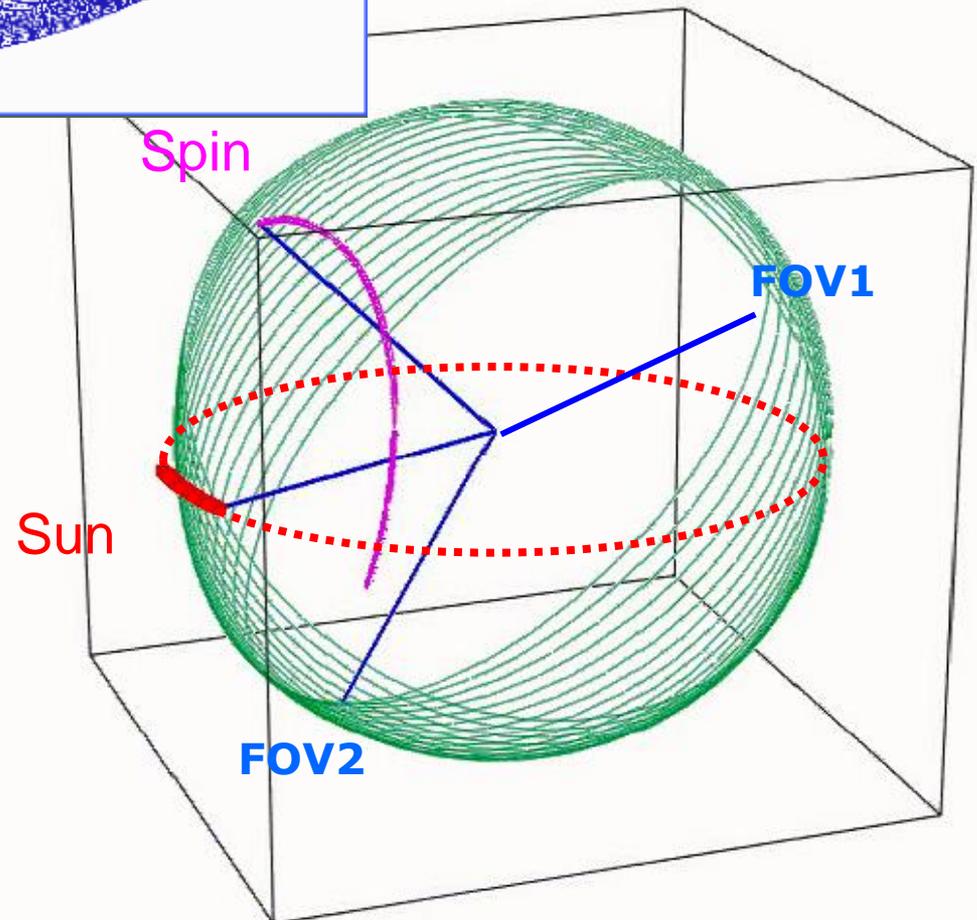


La loi de balayage du ciel

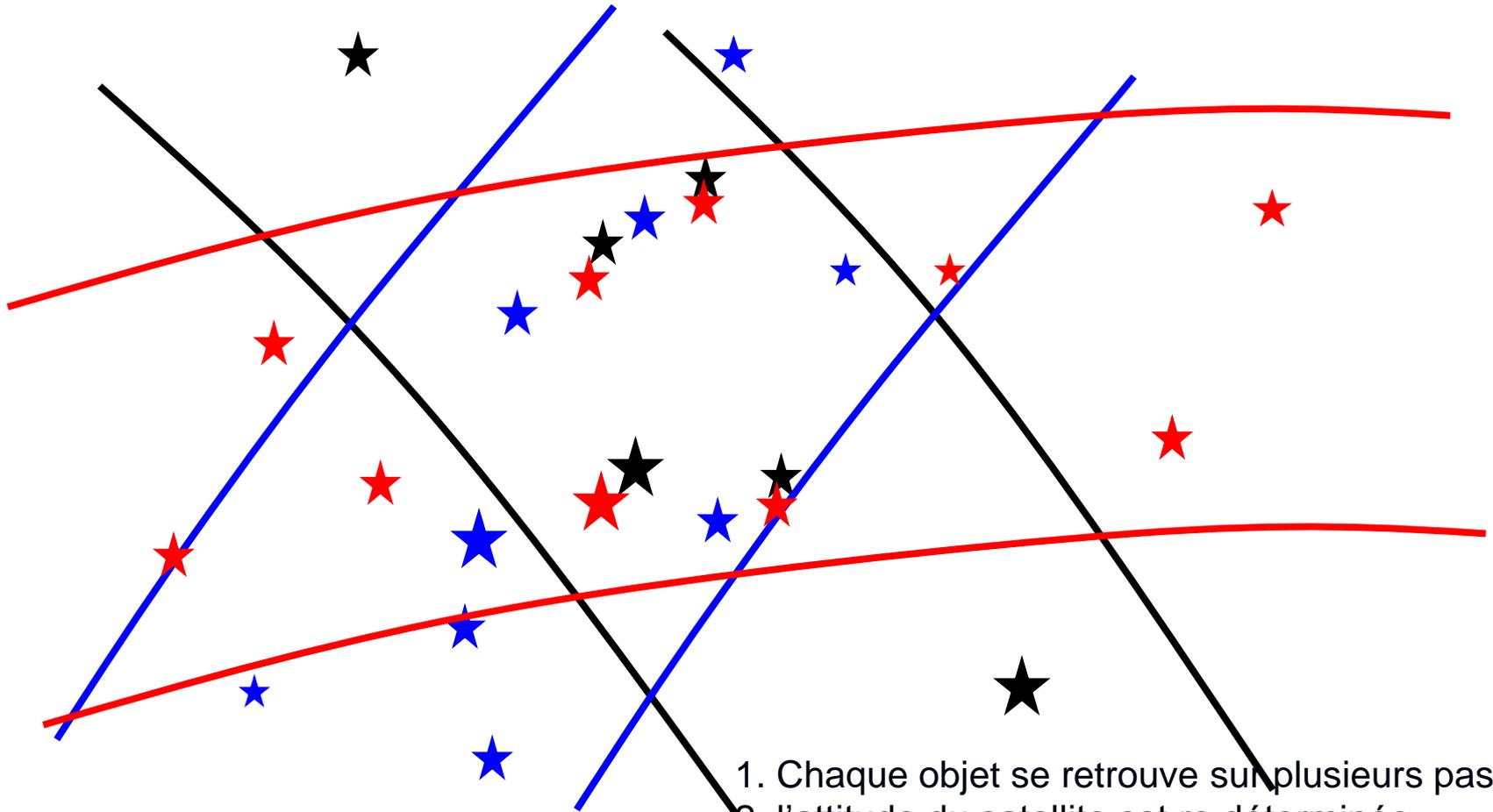


Gaia balaie le ciel (comme le fait une lunette méridienne)

- ❑ Ciel complet en 6 mois
 - ❑ Durée 5 ans
 - ❑ Balayage non uniforme
- ➔ **écliptique désavantagée**



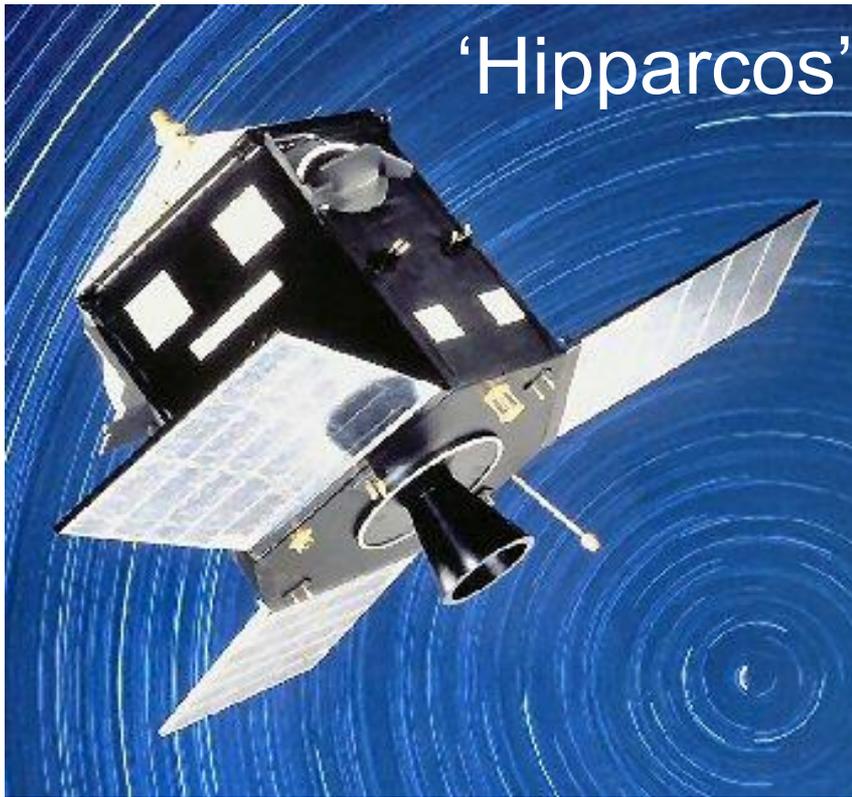
Les principes de "réduction"



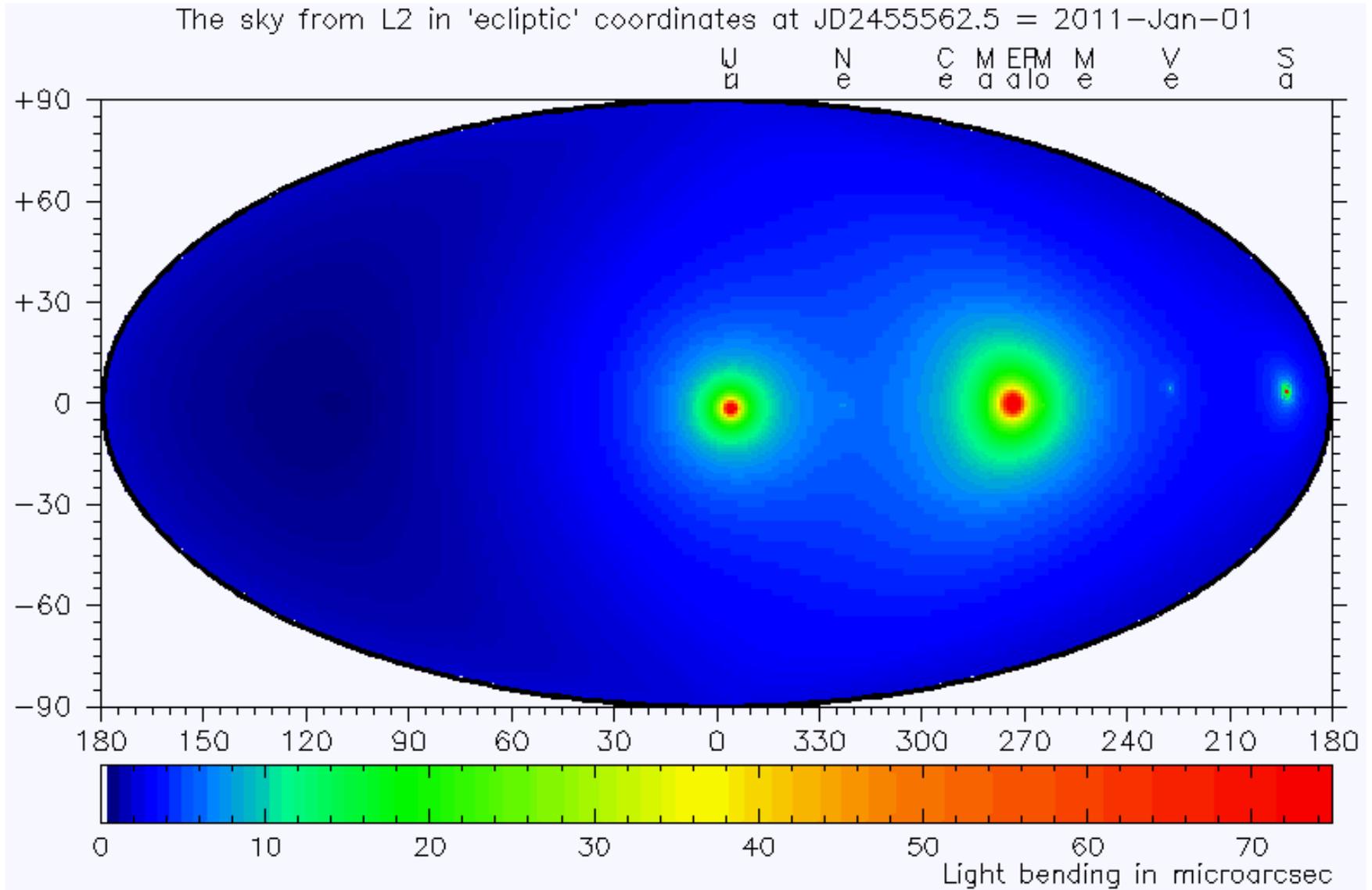
**Sens de balayage du ciel
(plus grande précision dans
le sens de balayage)**

1. Chaque objet se retrouve sur plusieurs passages
2. l'attitude du satellite est redéterminée
3. La position des objets est calculée
4. La précision est améliorée
5. D'autres balayages se rajoutent au premier
6. On itère le processus
7. On se rattache à des objets "fixes" du ciel

Hipparcos “prototype” de Gaia



La déflexion relativiste de la lumière



La précision de Gaia est telle que toutes les planètes engendreront une déflexion relativiste

Gaia: « une vision 3D de l'univers »

- ✓ Cinématique des étoiles
 - ✓ Position astrométrique complète (α, δ, π)
et vitesse (μ_α, μ_δ et vitesse radiale)
 - ✓ Photométrie
 - ✓ Spectroscopie
- ✓ Système de référence



10 kpc

1000 million objects
measured to $l = 20$

20 kpc

>20 globular clusters
Many thousands of Cepheids and RR Lyrae

Horizon for proper motions
accurate to 1 km/s

Mass of galaxy from
rotation curve at 15 kpc

Sun

30 open clusters
within 500 pc

Dark matter in disc measured
from distances/motions of K giants

Horizon for detection of
Jupiter mass planets (200 pc)

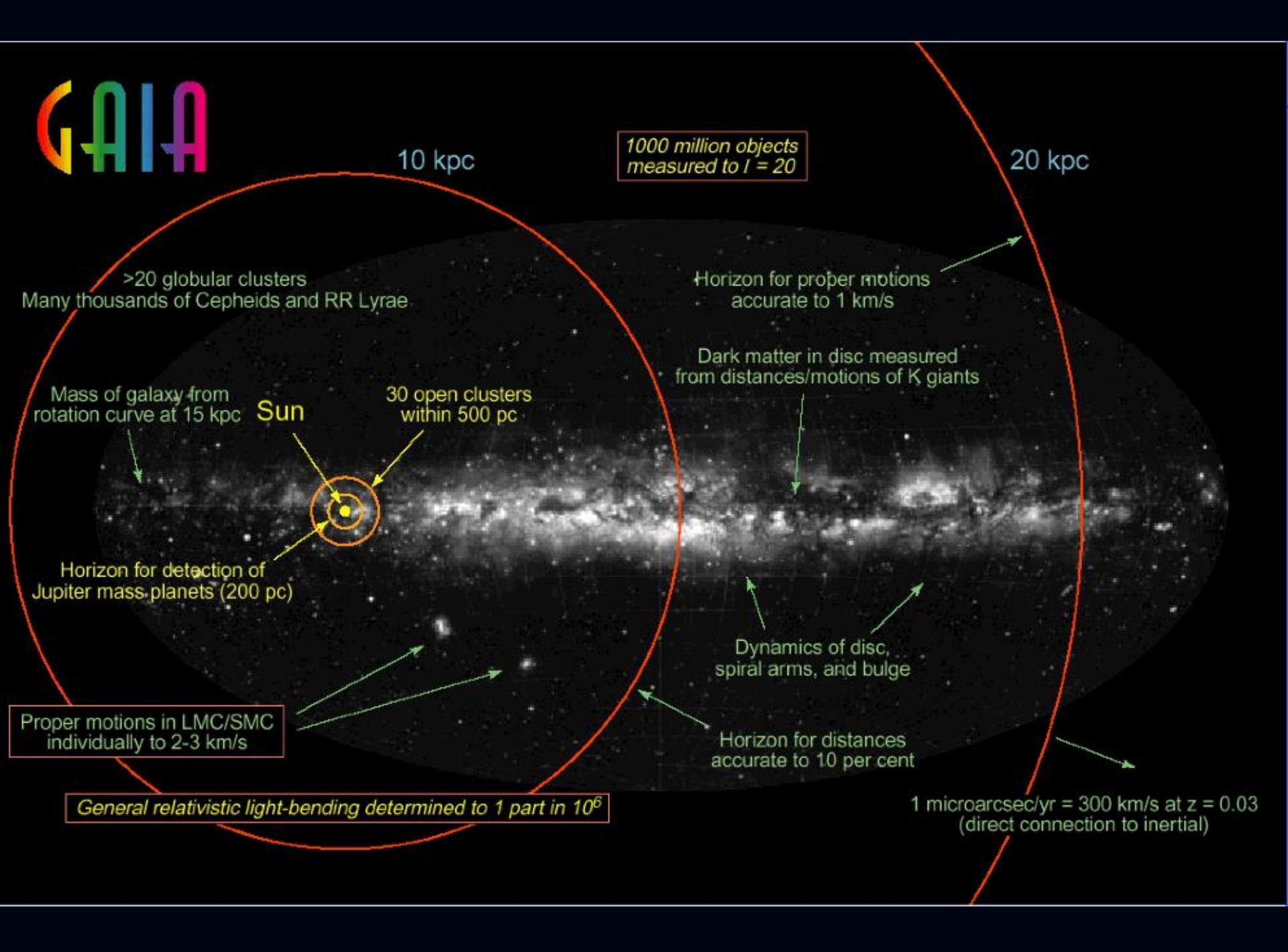
Dynamics of disc,
spiral arms, and bulge

Proper motions in LMC/SMC
individually to 2-3 km/s

Horizon for distances
accurate to 10 per cent

General relativistic light-bending determined to 1 part in 10^6

1 microarcsec/yr = 300 km/s at $z = 0.03$
(direct connection to inertial)



Le catalogue Gaia

- Gaia efface toutes les mesures réalisées auparavant et réalise un catalogue d'un milliard d'étoiles ultra-précis
- Les catalogues du passé ne perdent pas toute utilité: ils pourront tester les mouvements propres des étoiles déterminés par Gaia: les positions des étoiles des catalogues sont très précises à la date de réalisation des catalogues mais se dégradent au cours du temps du fait de la mauvaise connaissance des mouvements propres des étoiles.

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 corps mobiles, étoiles et astres du système solaire.
- L'astrométrie a eu besoin d'instruments fiables comme les lunettes méridiennes pour construire les premiers catalogues.