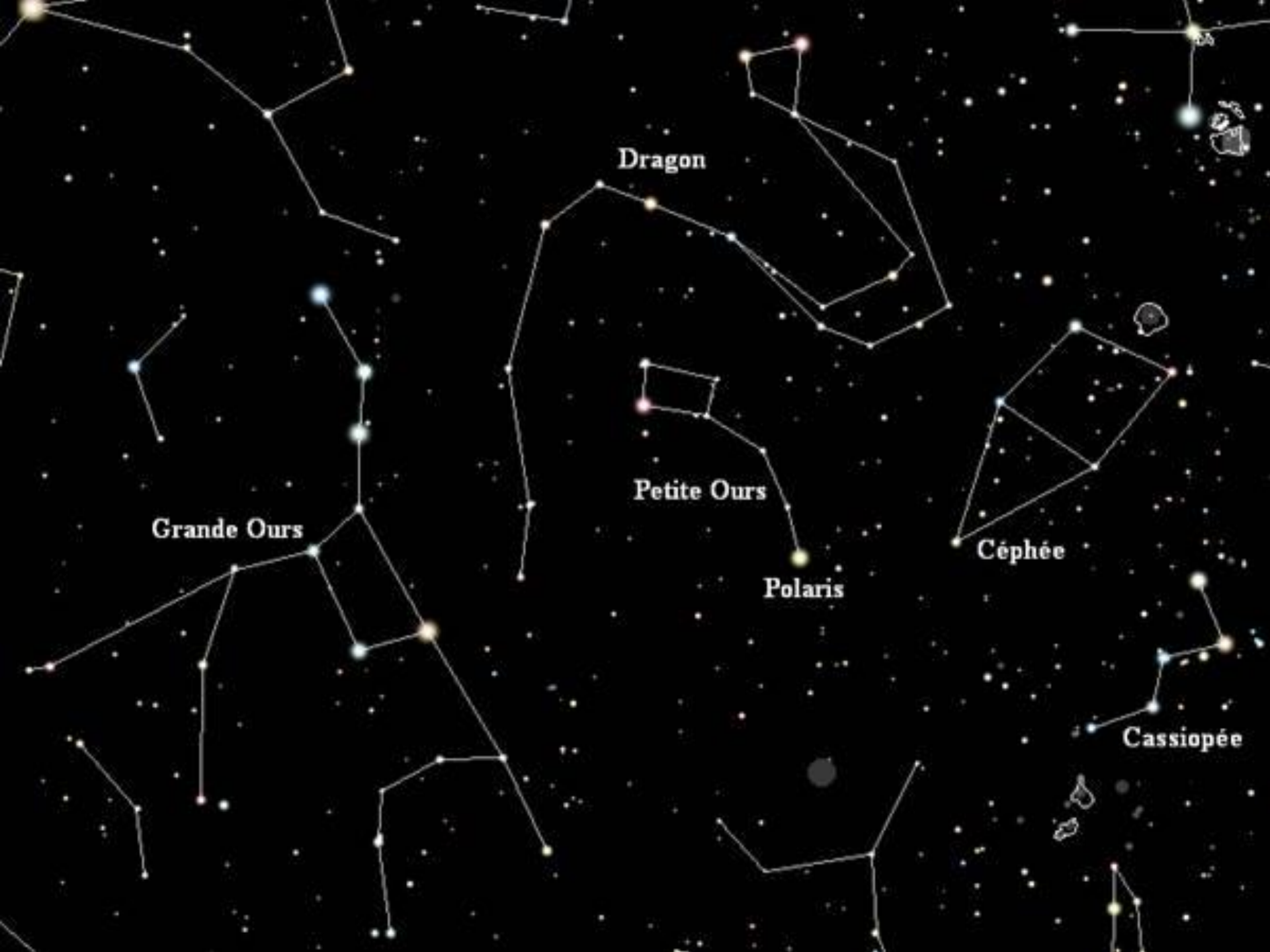
A long-exposure photograph of a starry night sky, showing numerous white and yellow streaks (star trails) against a dark blue background. The trails are mostly parallel, suggesting a long exposure taken from a fixed location. The bottom of the image shows a dark silhouette of a landscape with some distant lights.

La sphère céleste et l'astrométrie

École d'été « l'univers à la portée de tous »

23-26 août 2017



Dragon

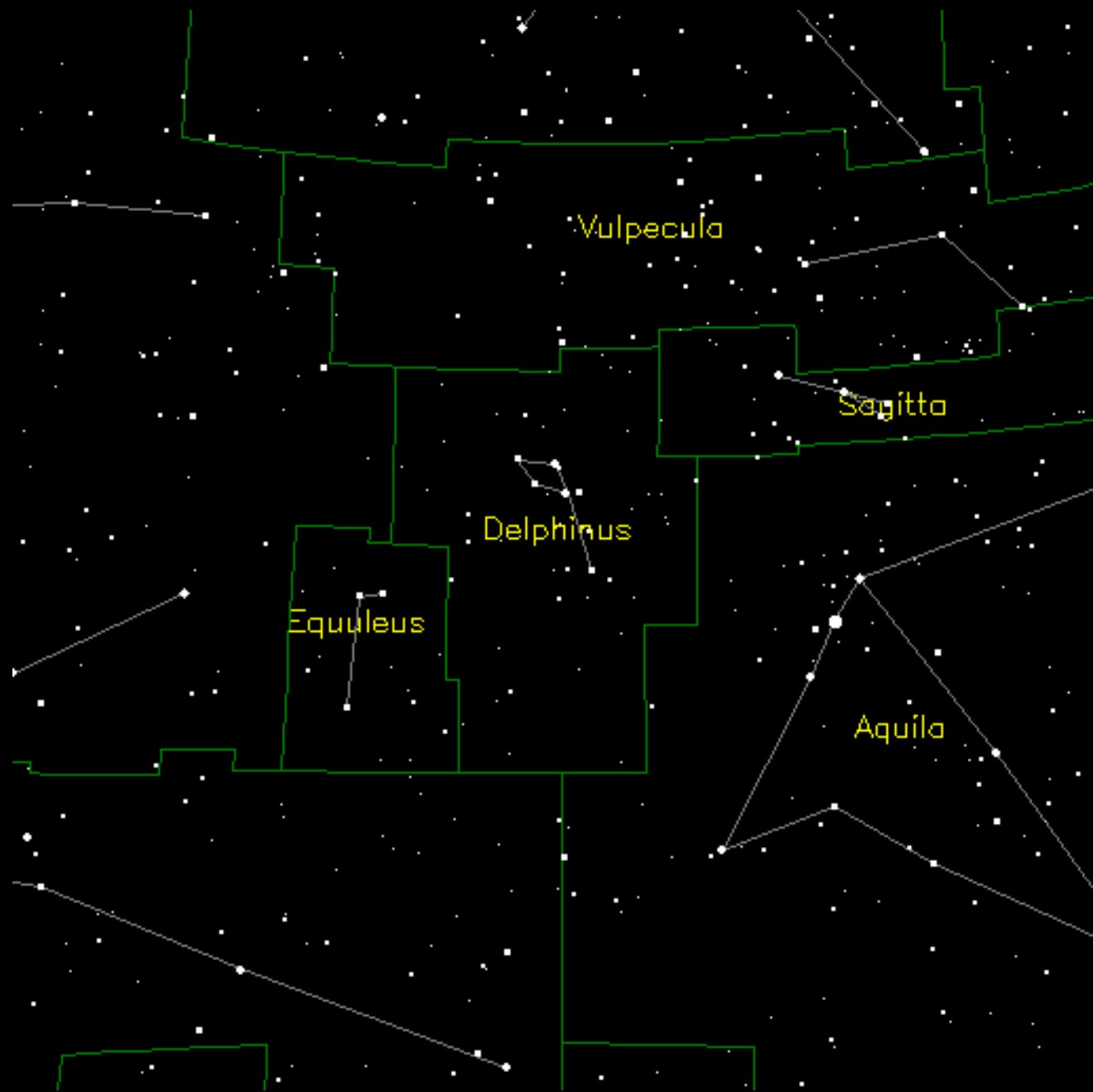
Grande Ours

Petite Ours

Polaris

Céphée

Cassiopée



Vulpecula

Sagitta

Delphinus

Equuleus

Aquila

À quoi servent étoiles et constellations?

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

- On ne saura vraiment les utiliser qu'à partir du XVIIIème siècle!
- C'est stratégique pour les pouvoirs en place mais *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: tout tourne!
 - C'est-à-dire la position de la Terre autour de son axe
 - C'est-à-dire savoir mesurer le temps avec un certaine précision

À quoi servent étoiles et constellations?

- En dix secondes de temps, la Terre a tournée 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!

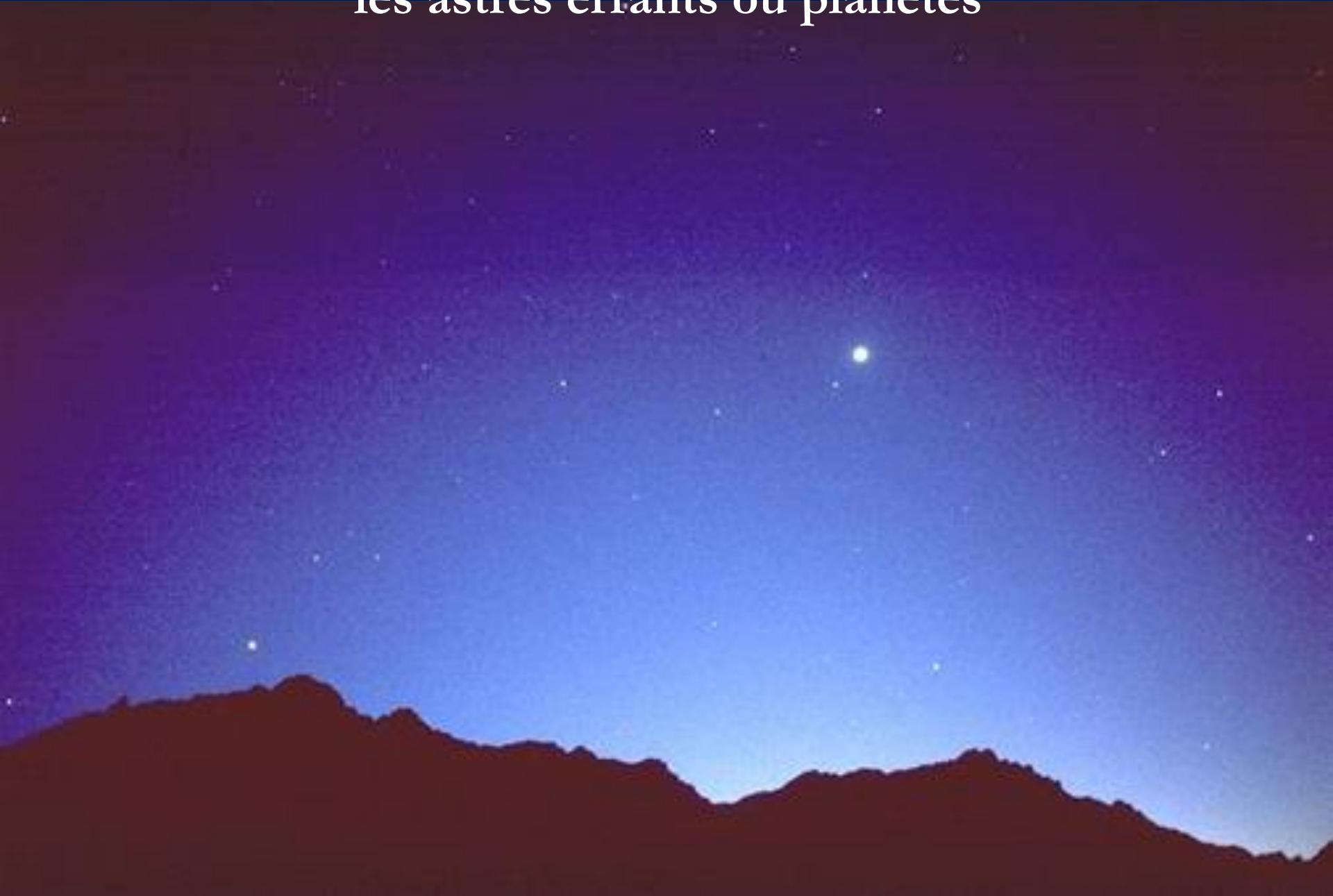
Pourquoi mesurer des positions?

- Pour comprendre comment se déplace les objets mobiles.
- Parce que ce qu'on croit fixe, est souvent mobile si la précision de mesure augmente!
- Pour établir un modèle d'univers et déterminer les distances aux astres observés.
- La précision de mesure: un combat permanent qui ne se terminera jamais...

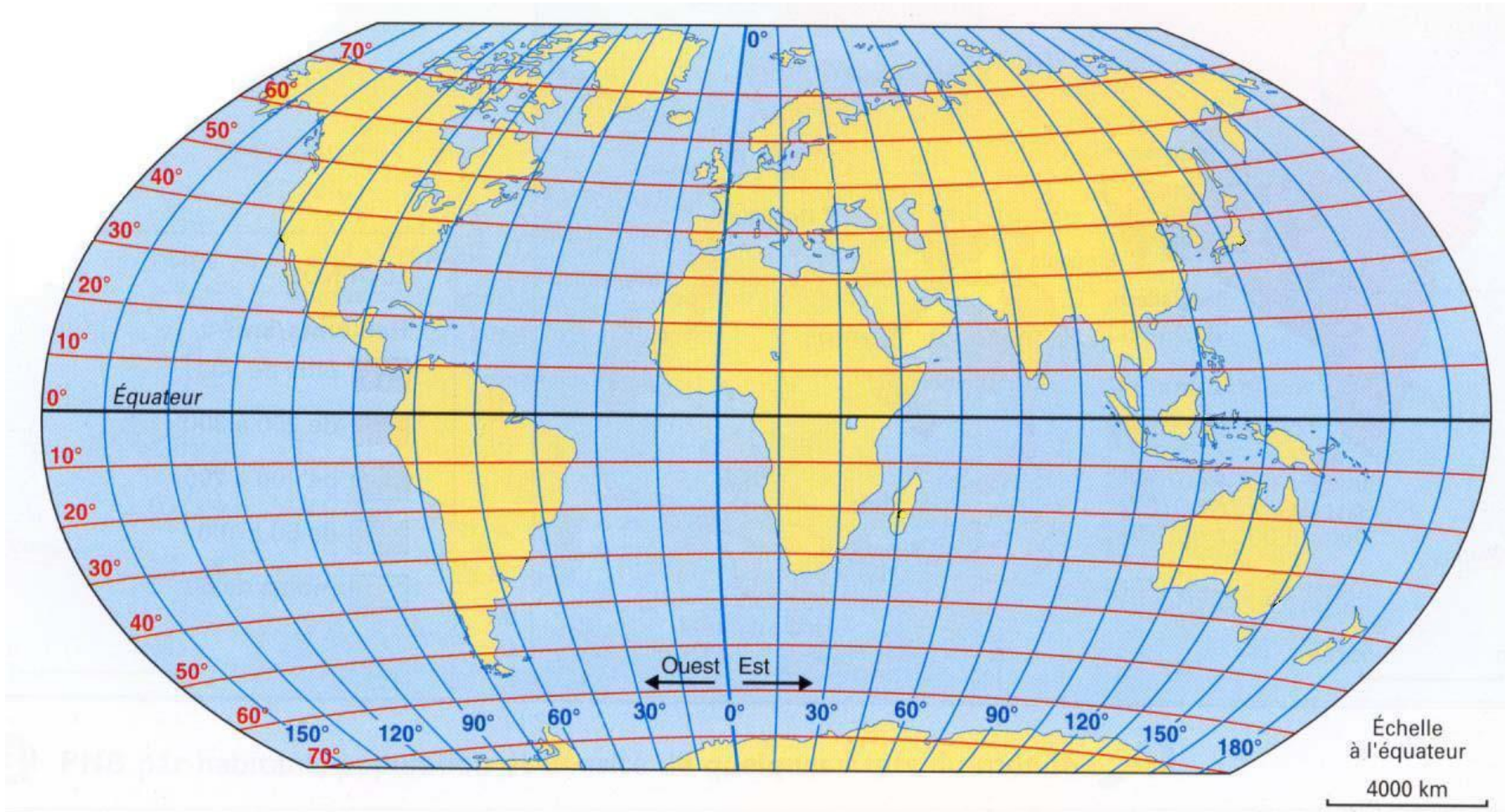
Qu'est-ce que l'astrométrie?

- C'est la mesure de positions et distances dans l'univers
- La géométrie et la géodésie mesurent la Terre; l'astrométrie mesure le ciel
- Elle permet:
 - de se repérer sur Terre
 - de se repérer dans le ciel
 - 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 définir des systèmes de référence

Quelques objets se déplaçant rapidement parmi les étoiles: les astres errants ou planètes

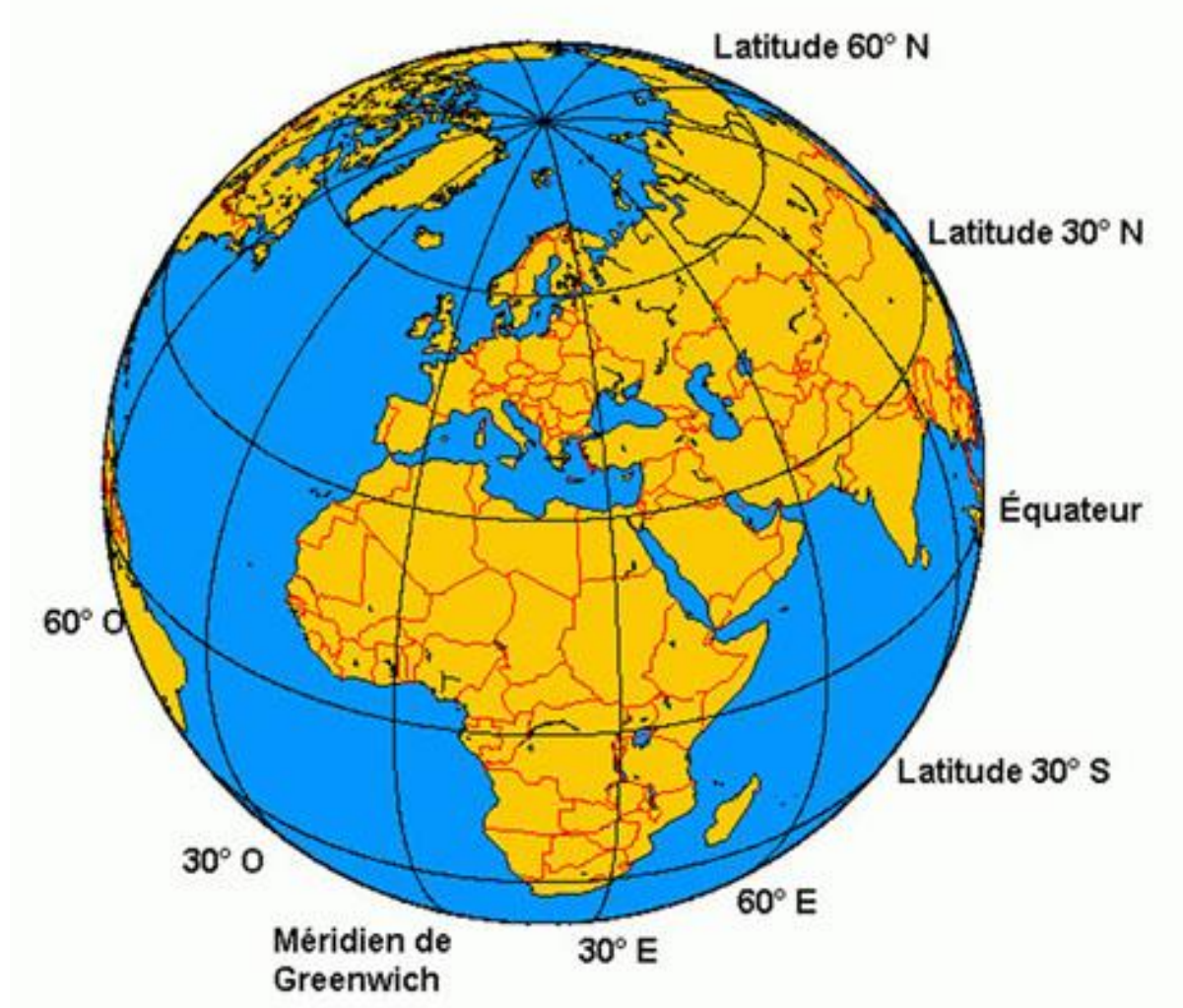


Comment mesurer des positions: rappel: les coordonnées géographiques



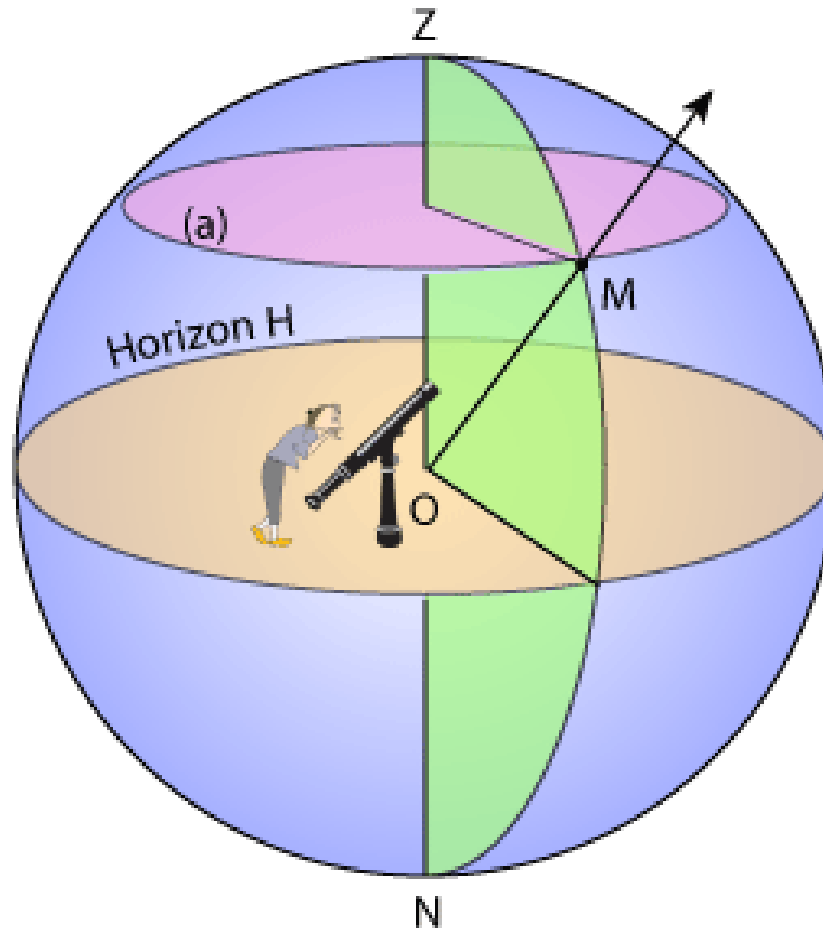
un système permettant de se localiser sur Terre

Comment mesurer des positions: rappel: les coordonnées géographiques



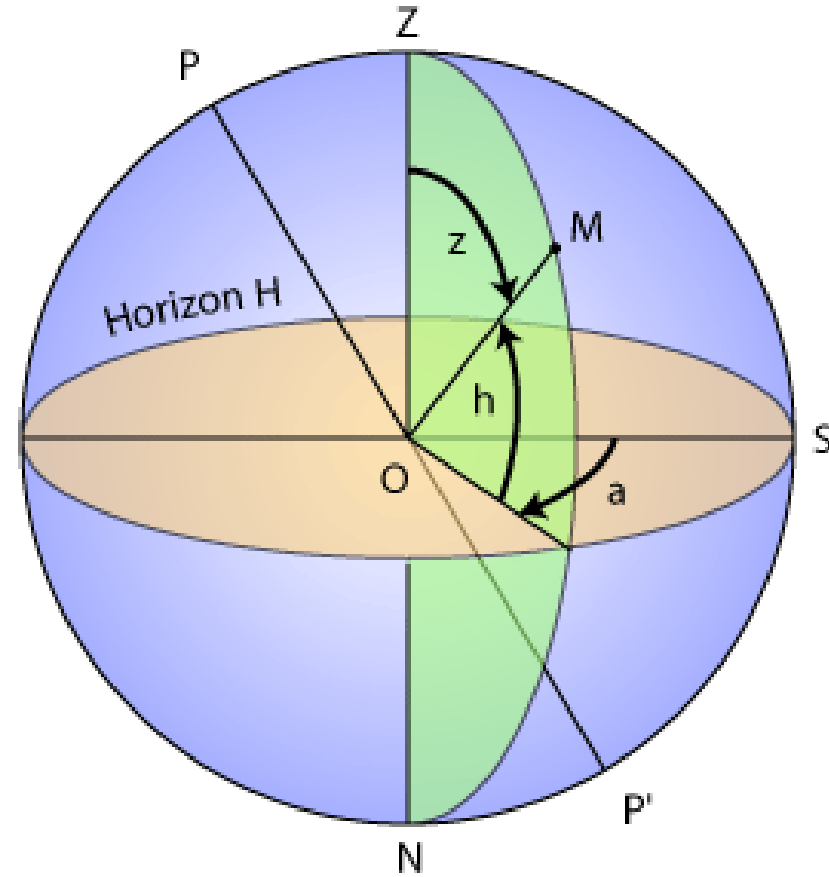
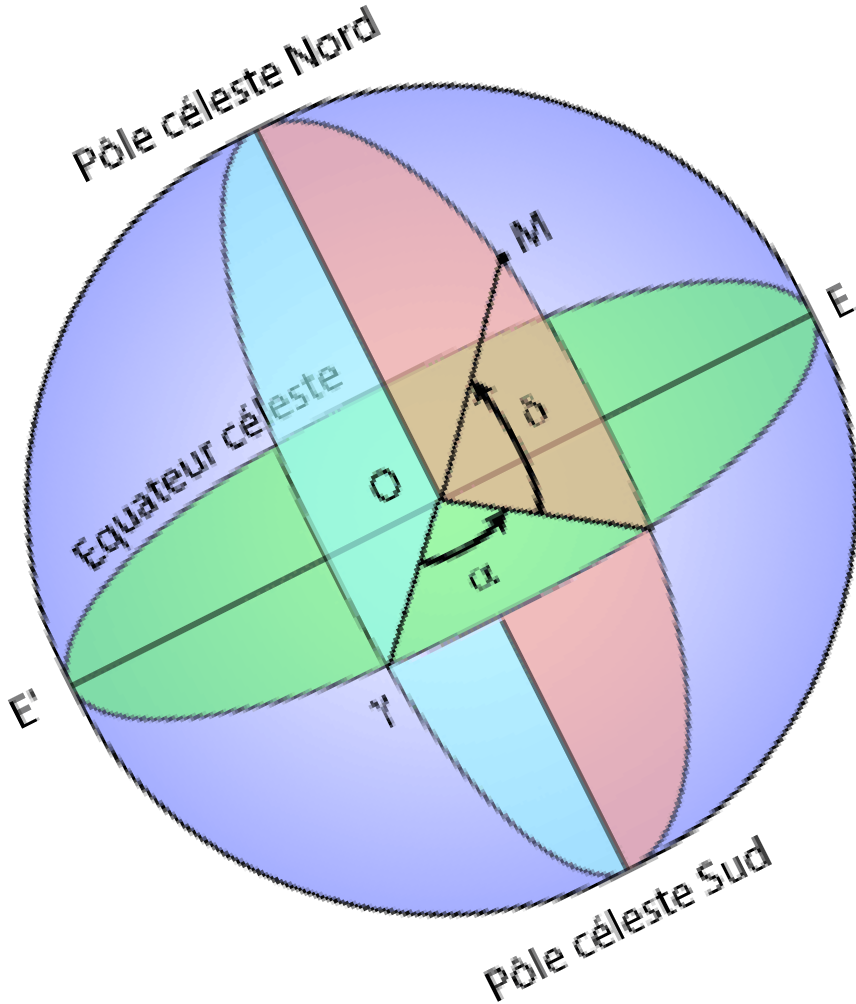
un système permettant de se localiser sur Terre

Comment mesurer des positions: des références pour se repérer



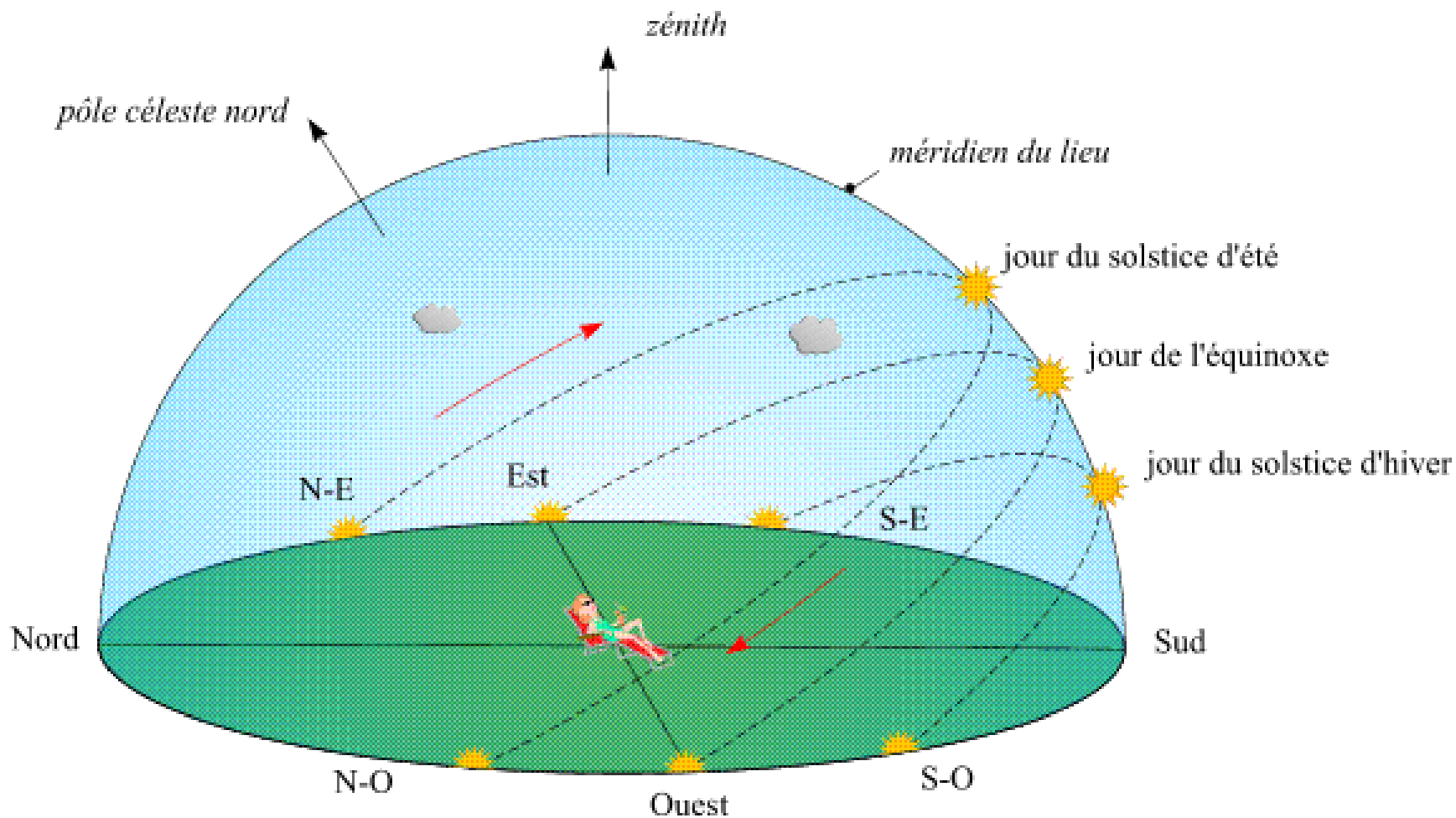
un système local

Un système commun pour tous

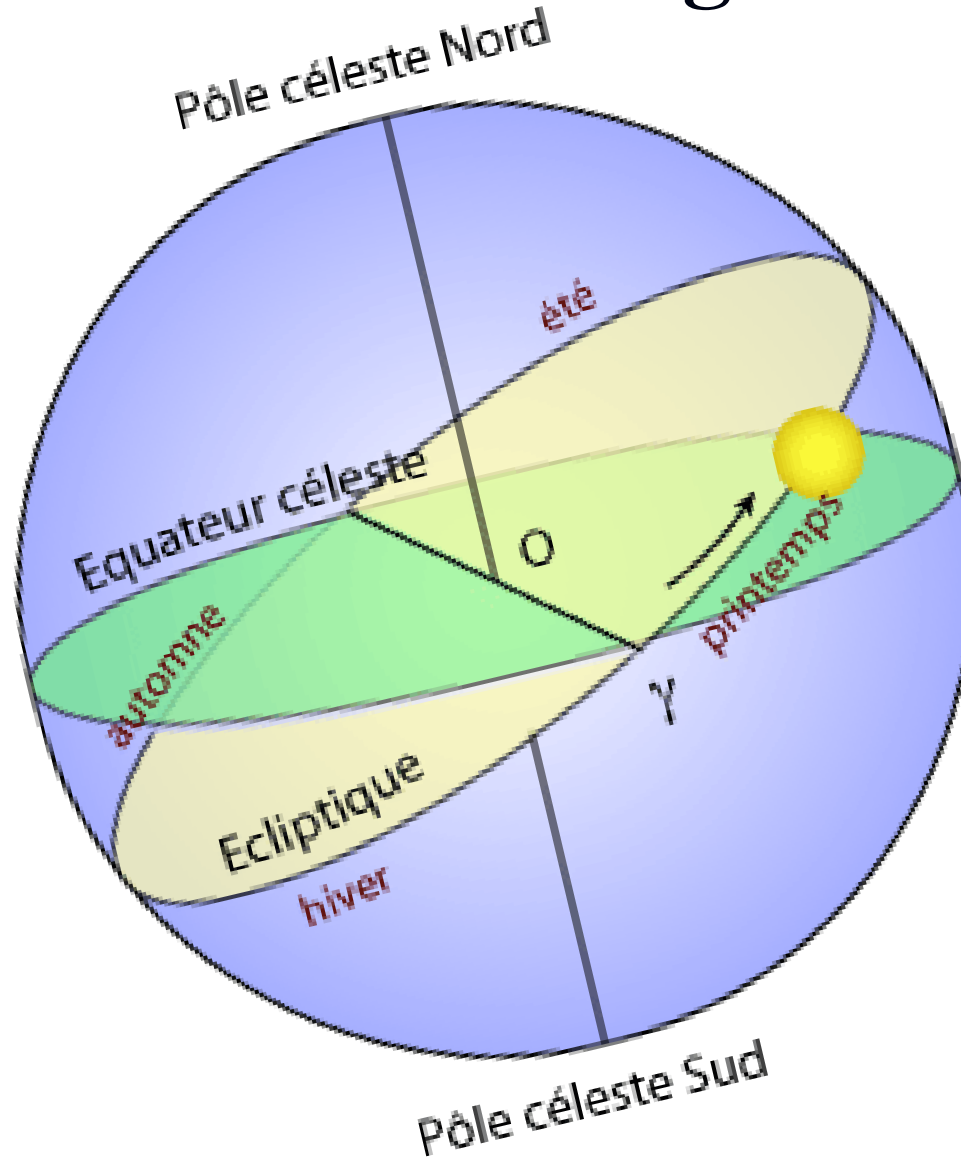


- La rotation de la Terre est observable par tous

Le mouvement apparent du Soleil

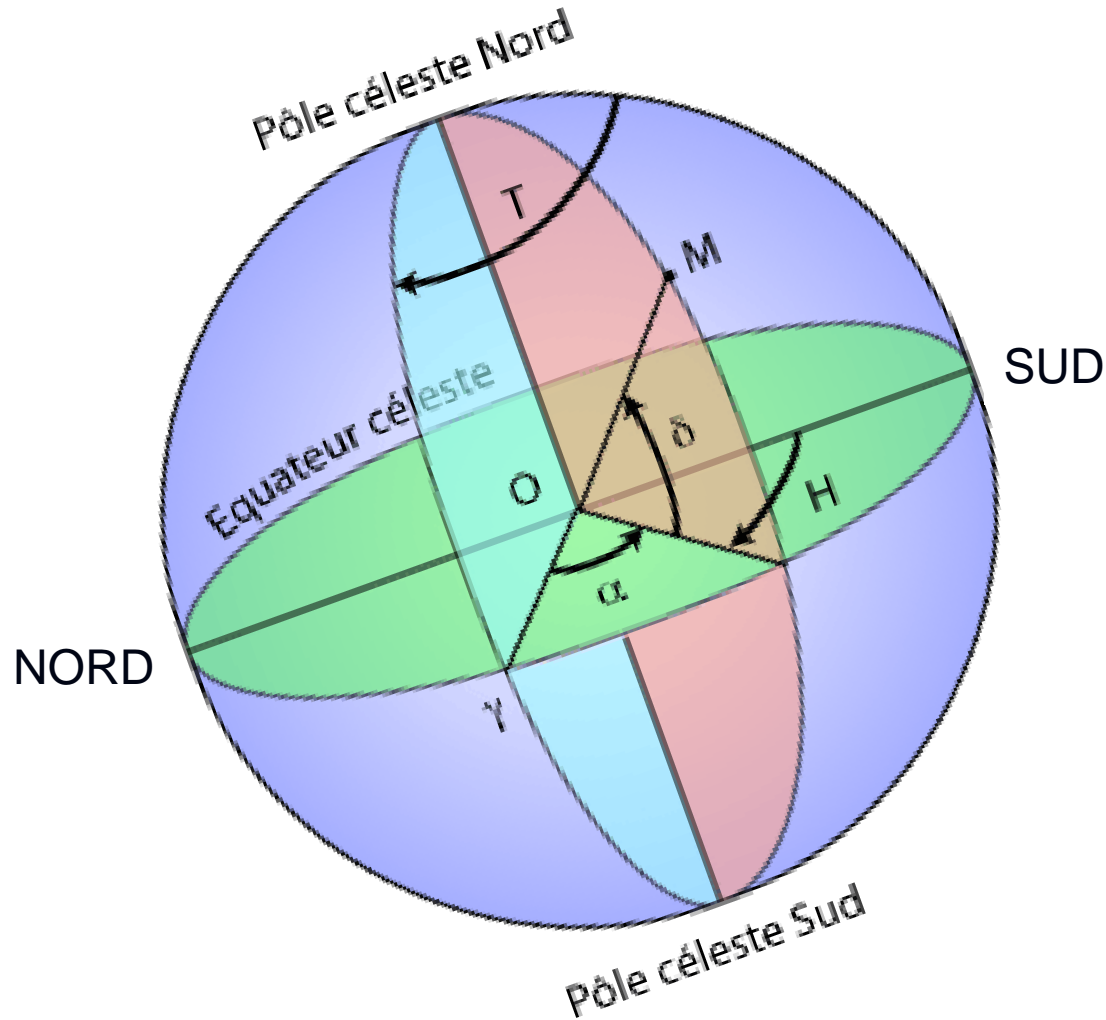


Trouver une origine



Utiliser le mouvement du Soleil

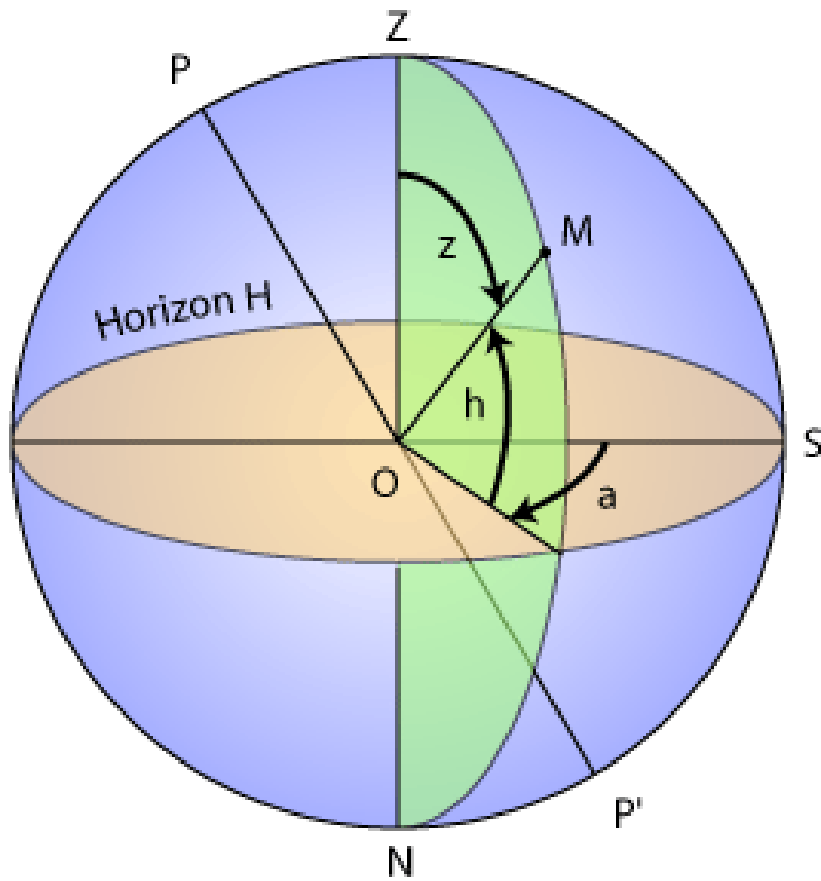
Sphère équatoriale locale



H (angle horaire) et T (temps sidéral local) varient au cours du temps

$$\mathbf{H = T - \alpha}$$

Le principe de l'instrument méridien

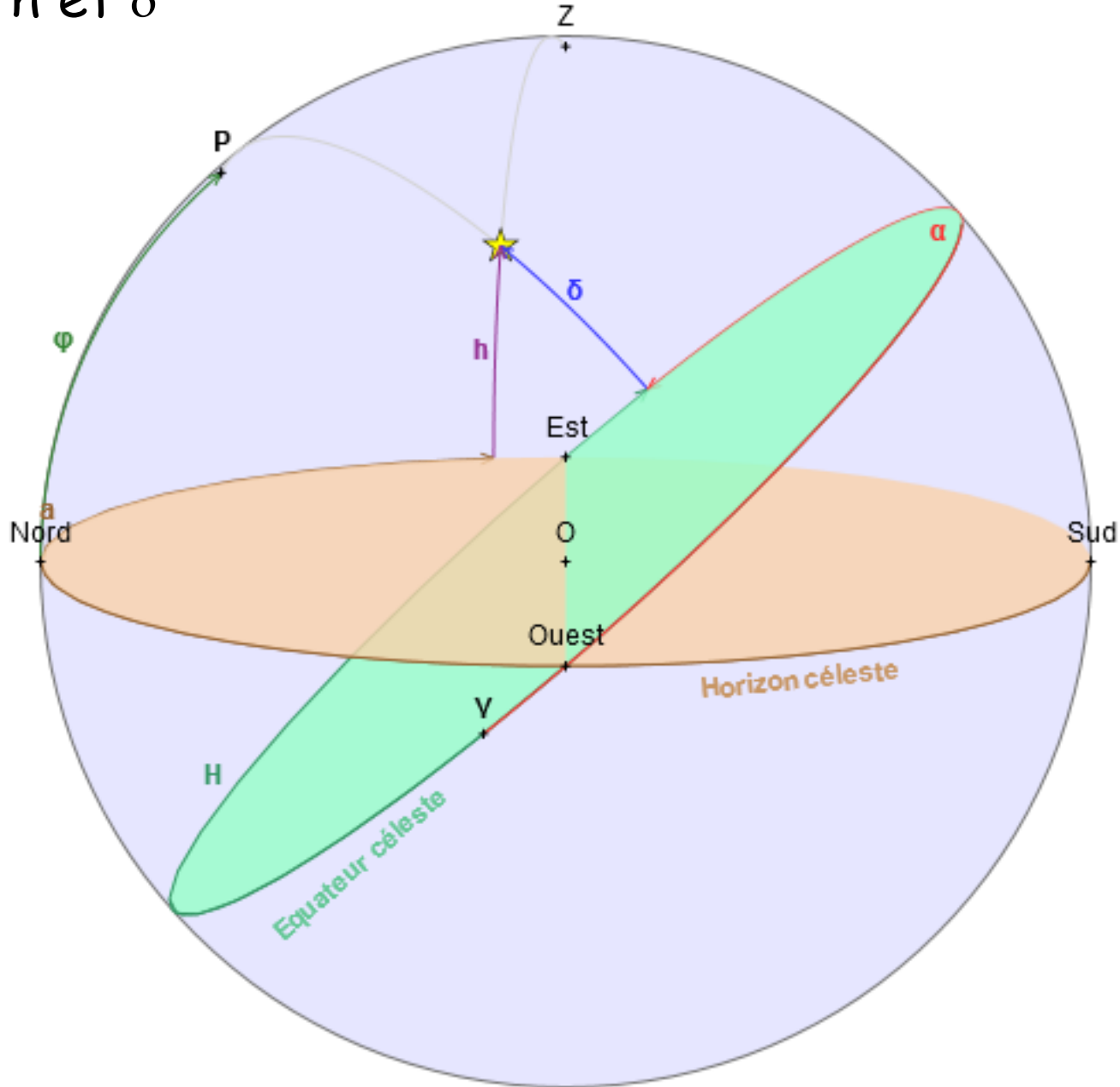


La sphère équatoriale locale

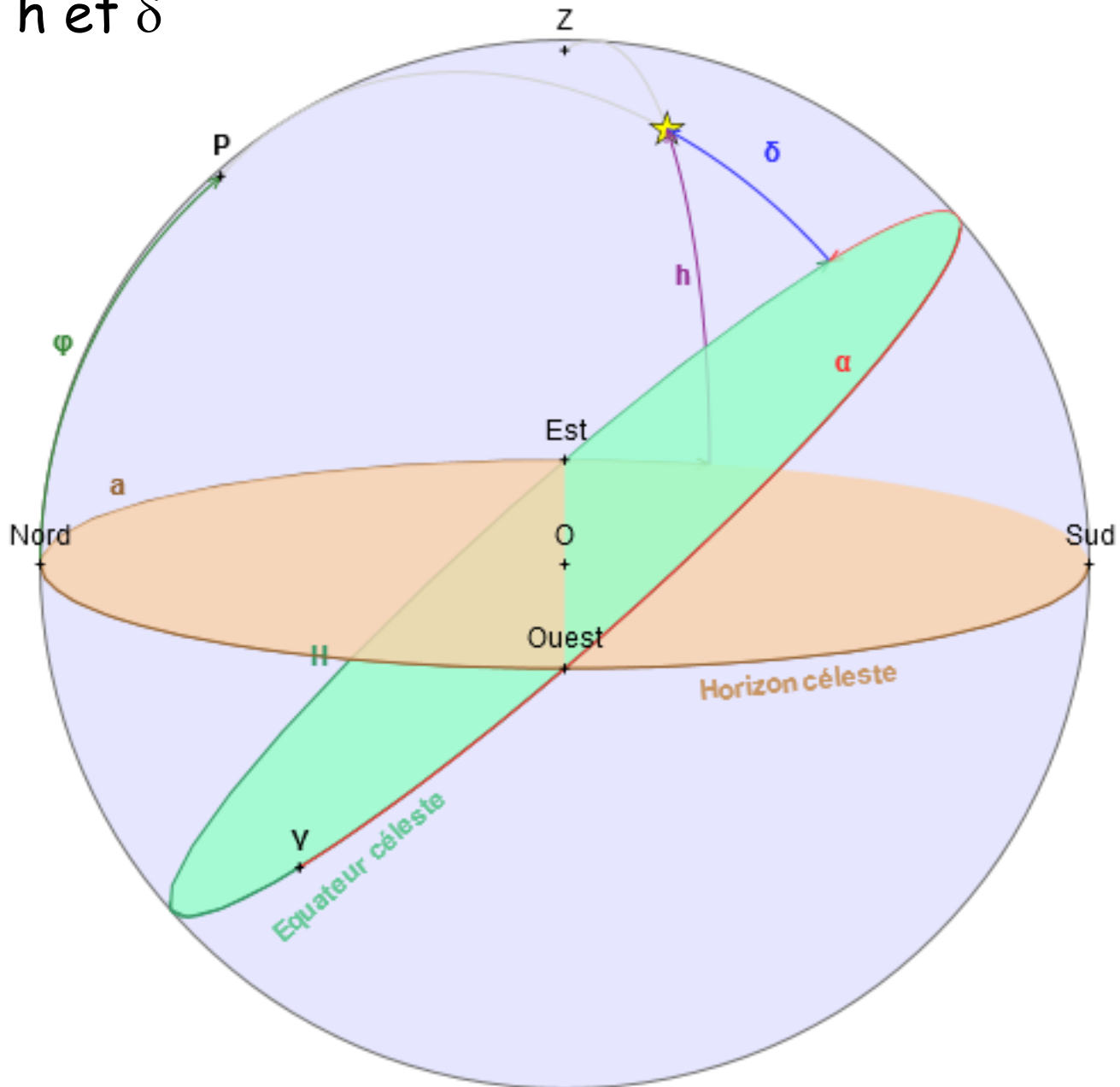
Une mesure simple dans le repère local au moment où l'astre « passe au méridien »:

- la précision dépend de l'instrumentation et de la connaissance du lieu d'observation (longitude, latitude)
- on mesure la hauteur sur l'horizon et l'instant du « passage »

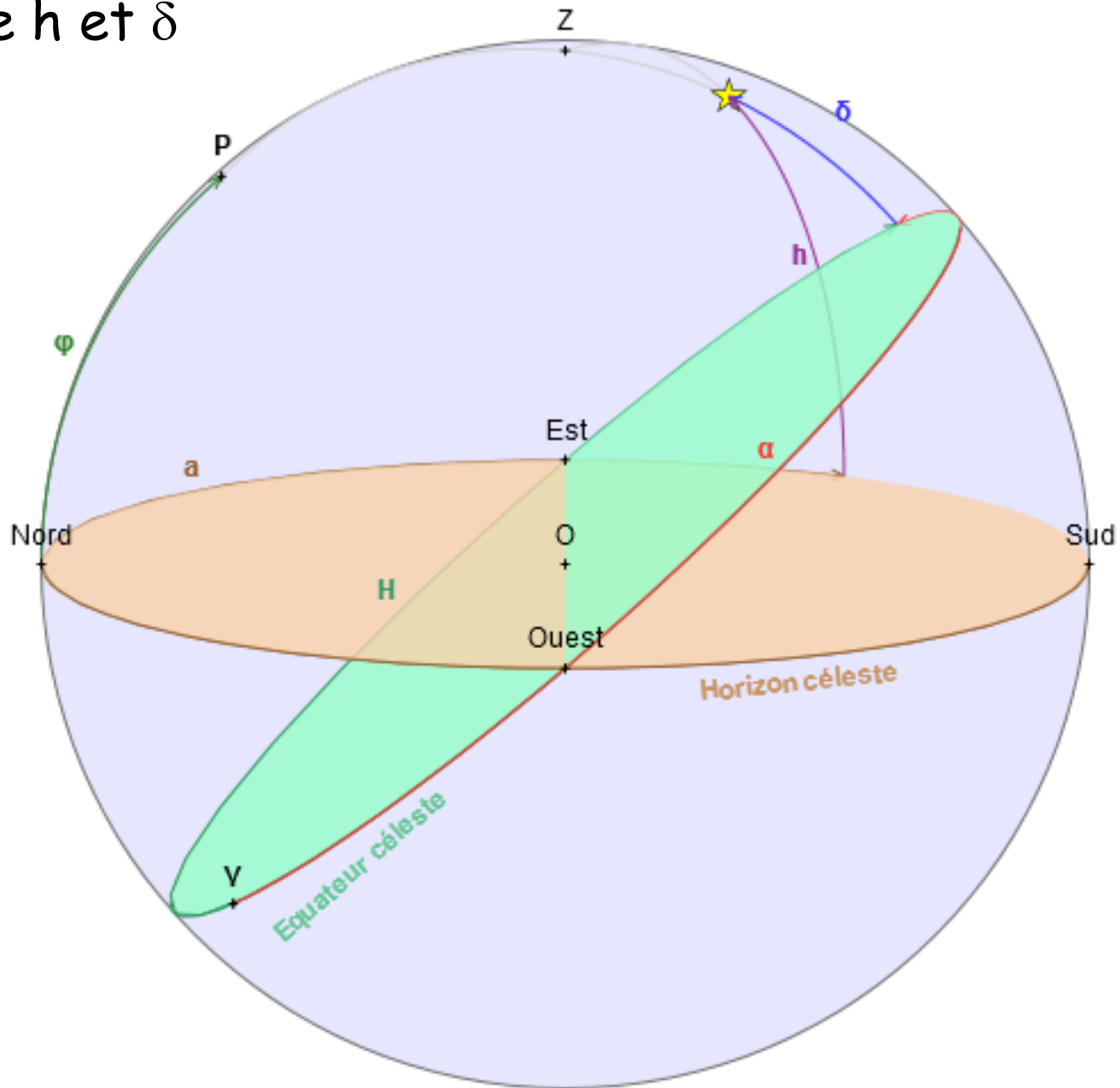
Observons la progression d'un astre dans le ciel et voyons le lien entre h et δ



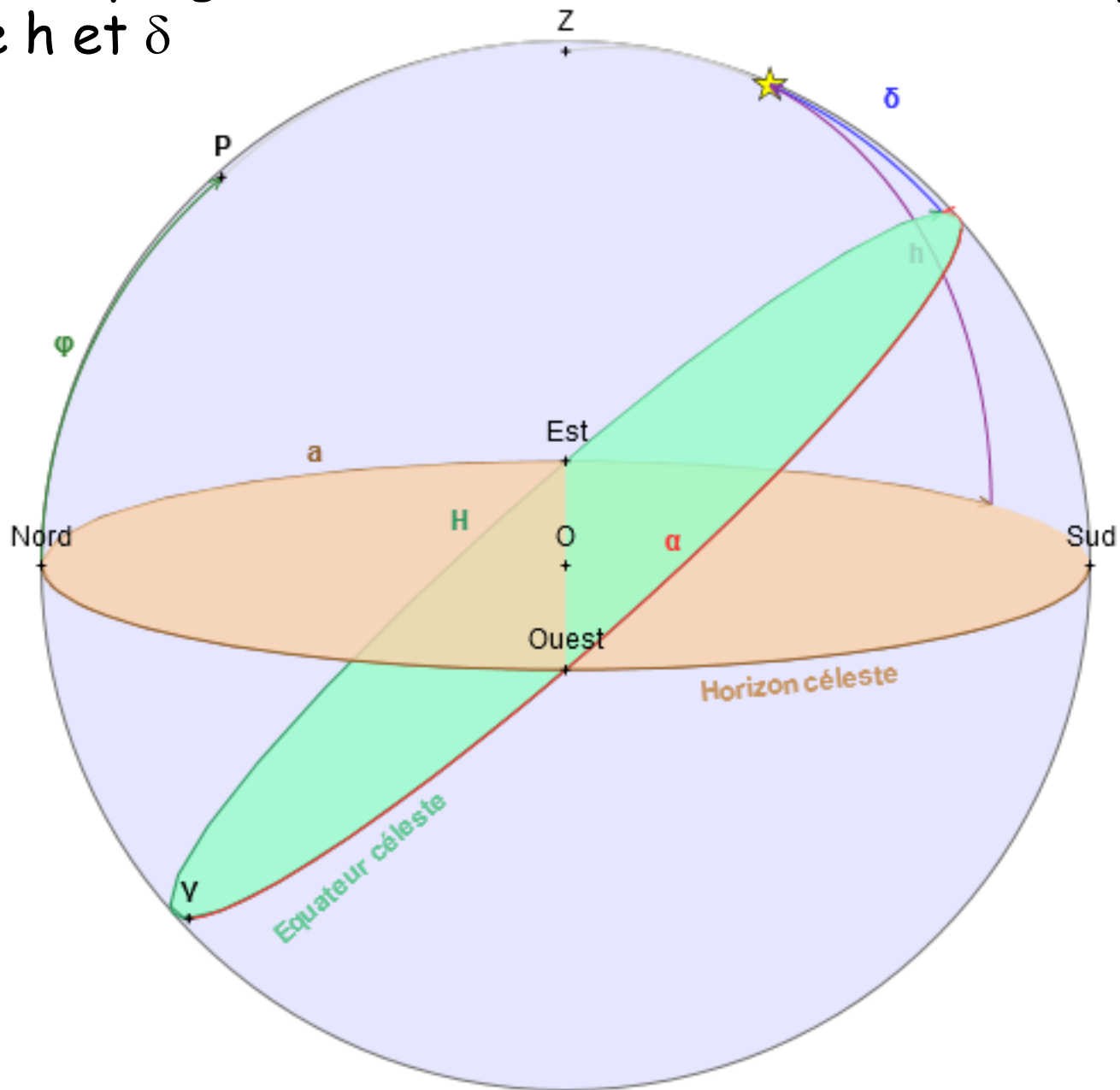
Observons la progression d'un astre dans le ciel et voyons le lien entre h et δ



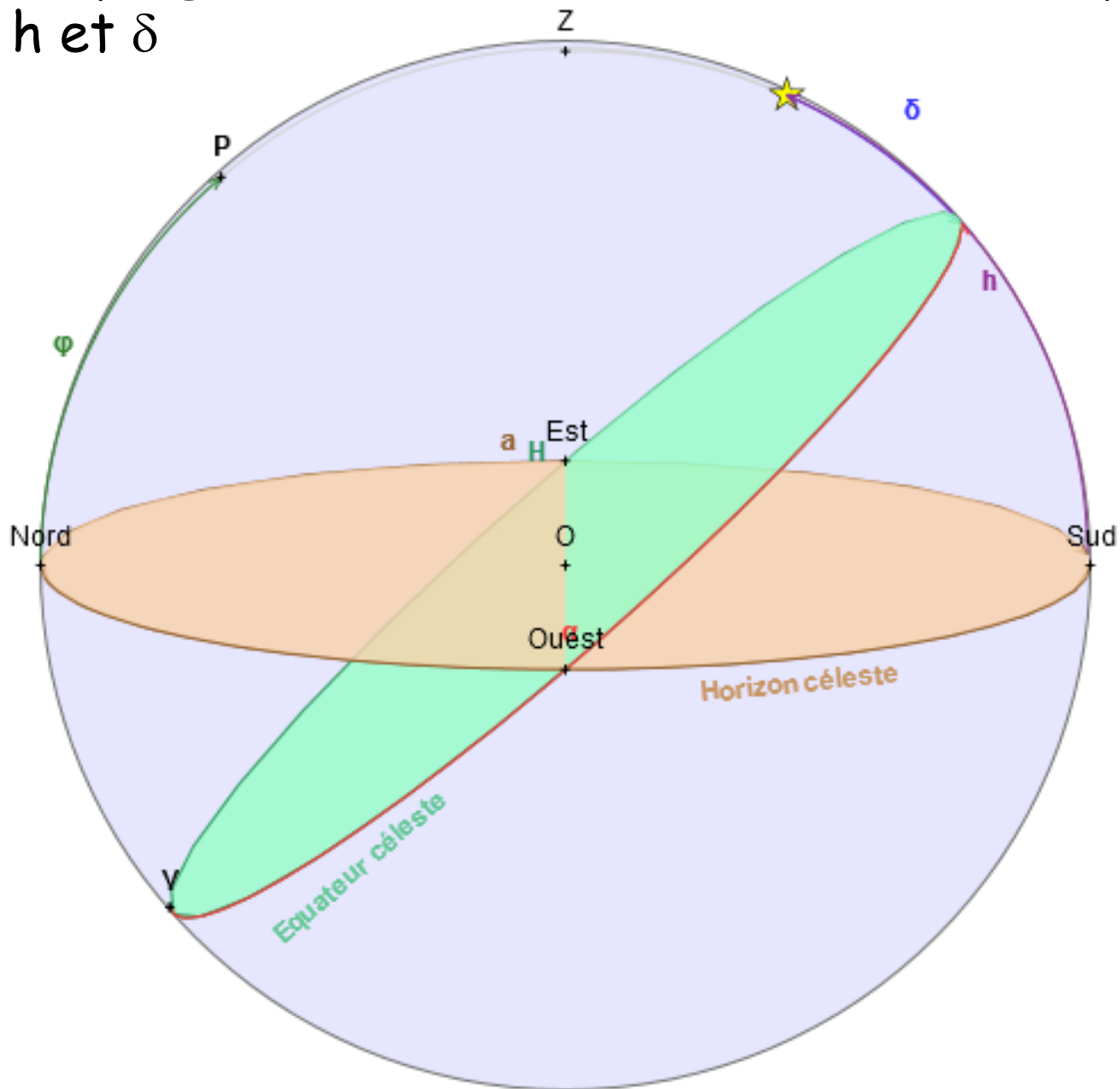
Observons la progression d'un astre dans le ciel et voyons le lien entre h et δ

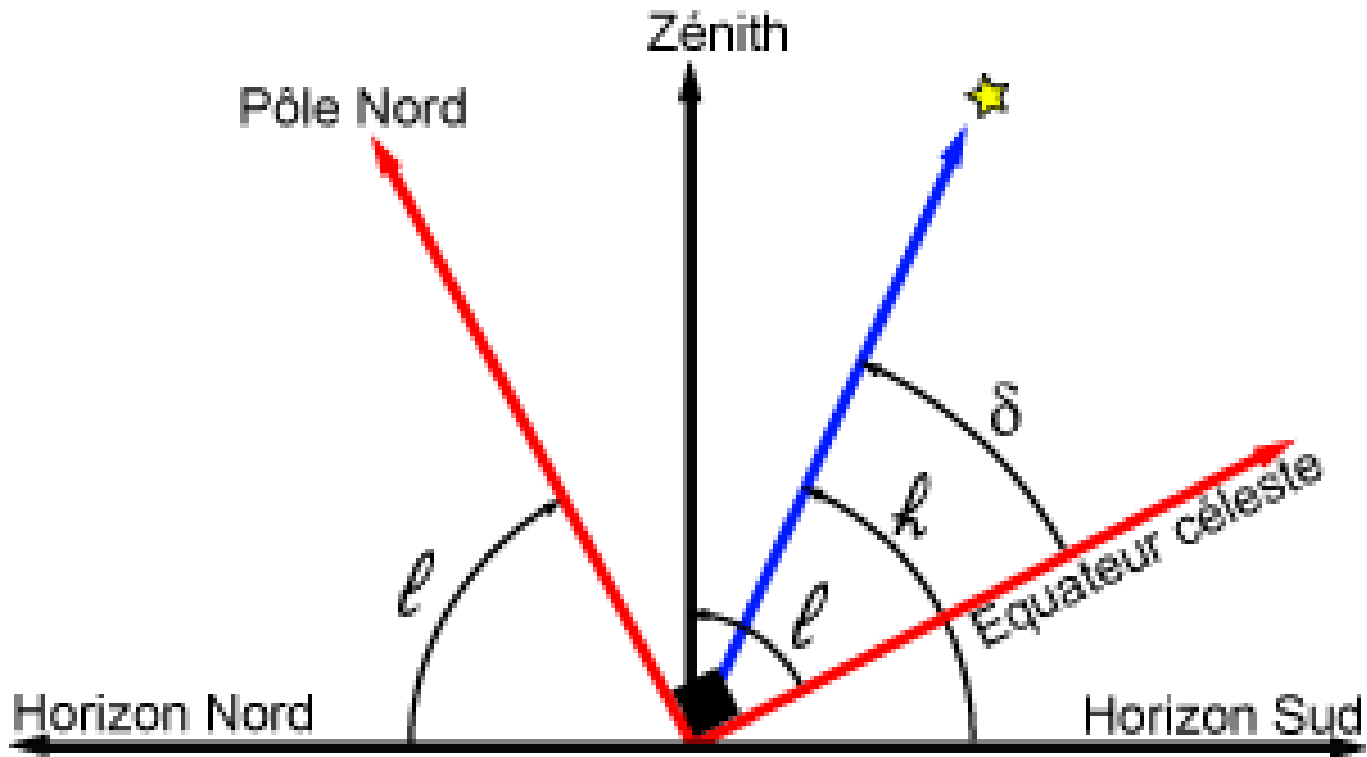


Observons la progression d'un astre dans le ciel et voyons le lien entre h et δ



Observons la progression d'un astre dans le ciel et voyons le lien entre h et δ





l latitude du lieu
 h hauteur sur l'horizon
 δ déclinaison de l'étoile

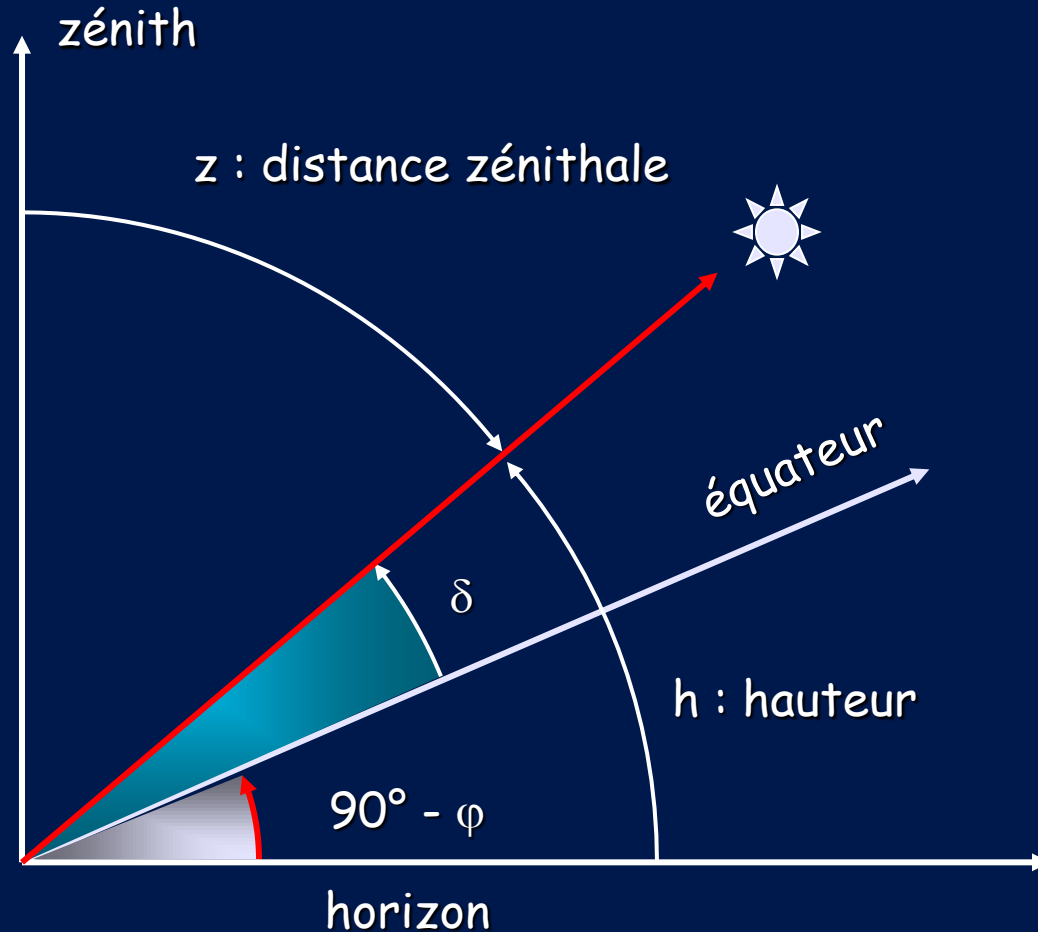
Si $h = +90^\circ$ $\delta = l$
 $\delta = h - 90^\circ + l$

Observer « au méridien »: $\alpha = T_{\text{sidéral local}}$

Hauteur au méridien

Pour un lieu de latitude φ .

Dans le plan du méridien.

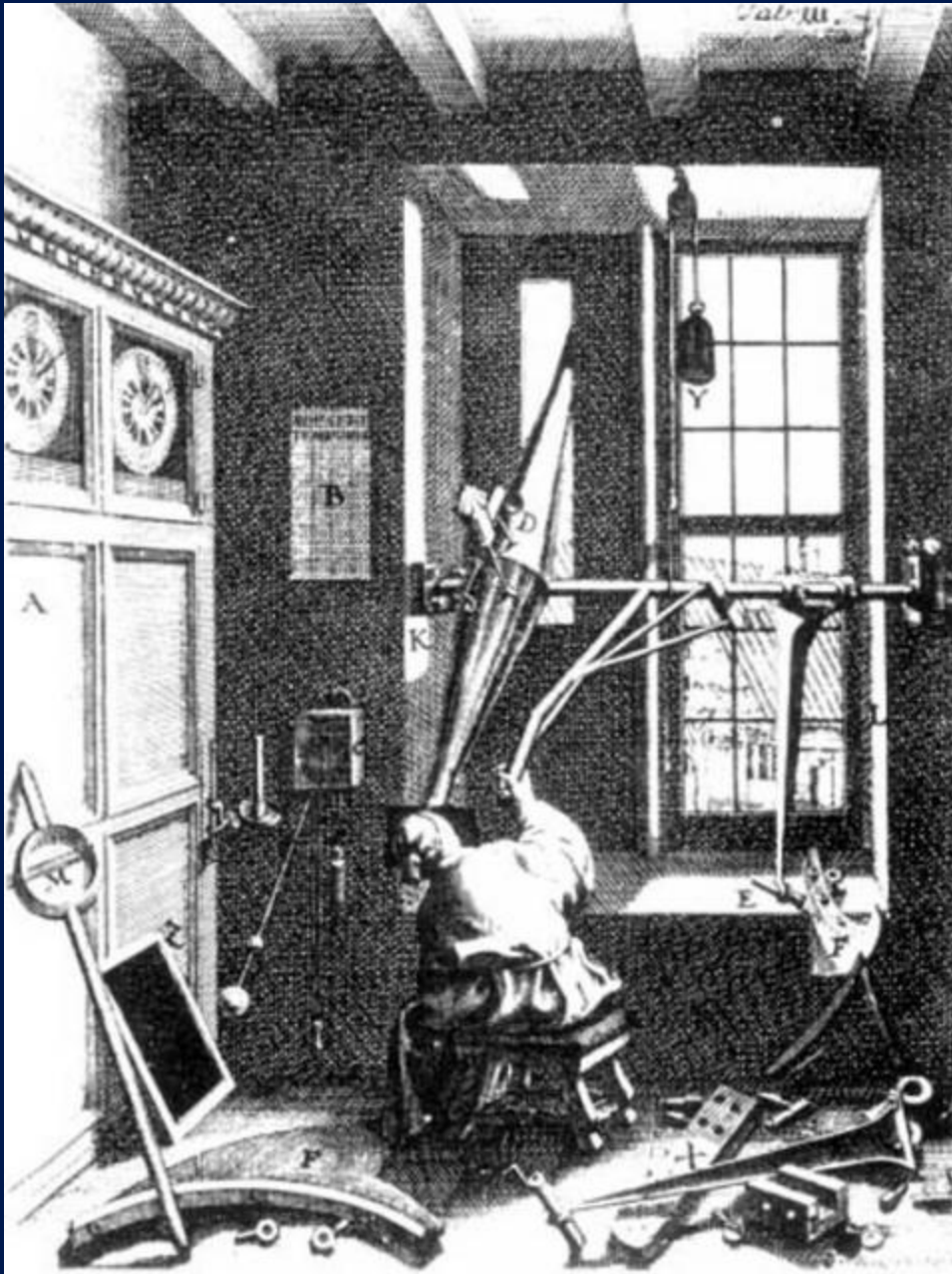


Pour Paris $\varphi = 48^{\circ}51'$

Solstice d'été $\delta \sim 23^{\circ} 26'$ $\Rightarrow h = 64^{\circ} 35'$

Solstice d'hiver $\delta \sim -23^{\circ} 26'$ $\Rightarrow h = 17^{\circ} 43'$

Equinoxes $\delta = 0^{\circ}$ $\Rightarrow h = 41^{\circ} 9'$



Le premier instrument méridien: Röemer en 1690 à Copenhague

- Observations absolues:
 - la précision dépend de l'instrumentation
 - on mesure la hauteur sur l'horizon et l'instant du « passage »

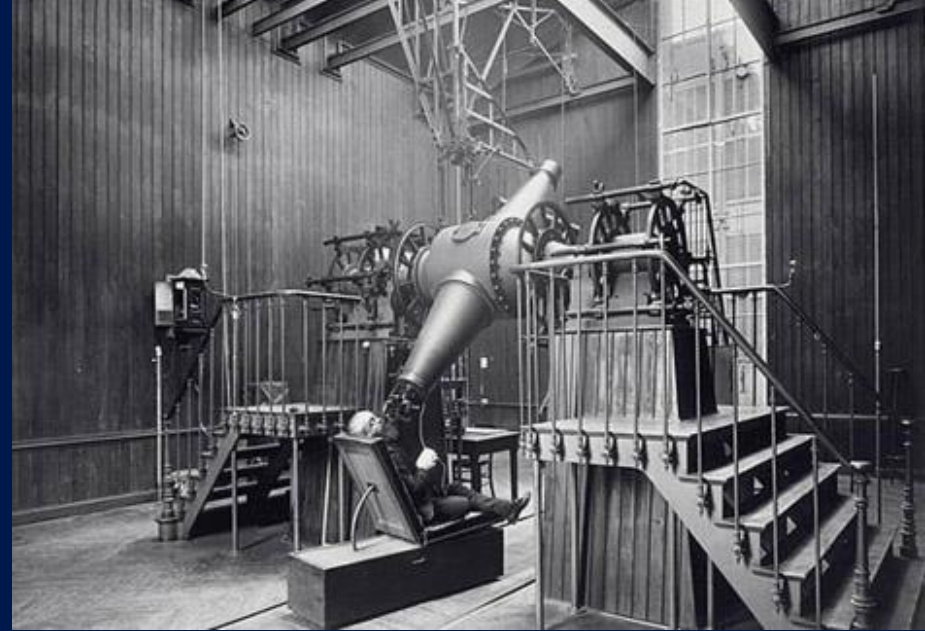
Les instruments méridiens

observatoire	date	constructeur	cercle	ouverture	distance focale	abri	état en 2003
Paris	1863	Secrétan	1 m	23,6 cm	3,85	salle méridienne	démonté
Paris	1877	Eichens	1 m	19 cm	2,32	abri isolé	en place
Marseille	1878	Eichens	1 m	18,8 cm	2,30	abri isolé	démonté
Lyon	1879	Eichens	80 cm	15 cm	2	abri isolé	démonté
Hendaye	1880	Eichens	70 cm	15 cm	2	abri accolé	en place
Strasbourg	1880	Repsold	69 cm	16 cm	1,88	salle méridienne	en place
Bordeaux	1881	Eichens	1 m	18,9 cm	2,32	abri isolé	fonctionne
Besançon	1885	Gautier	1 m	18,9 cm	2,37	abri isolé	en place
Nice	1887	Brunner	80 cm	20 cm	3,20	abri isolé	détruit
Alger	1888	Gautier	1 m	18,9 cm	2,40	abri isolé	en place
Toulouse	1890	Gautier	1 m	18,9 cm	2,30	abri isolé	en place



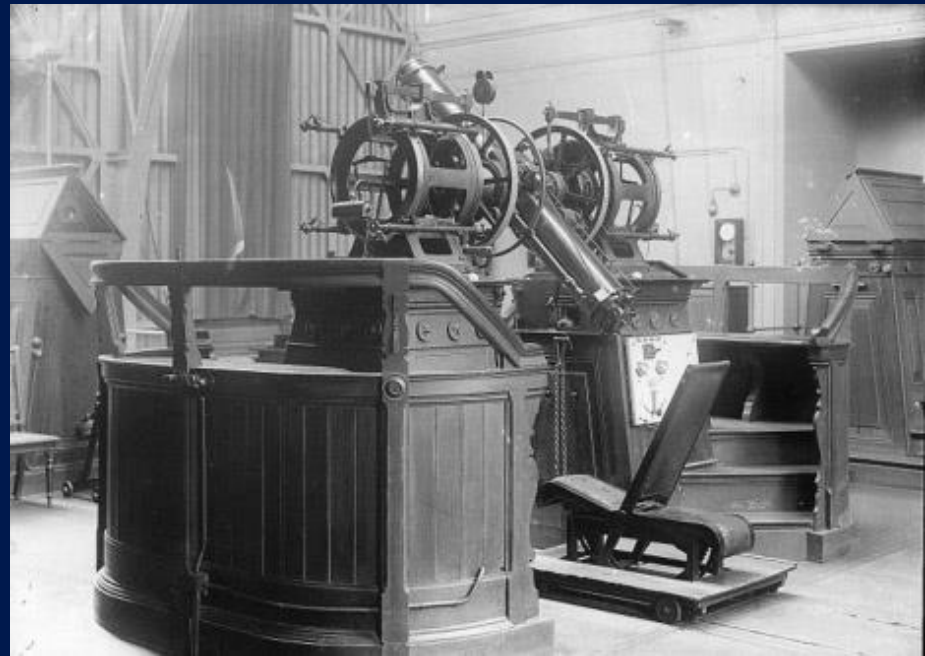
Besançon ↑

Abbadia ↓

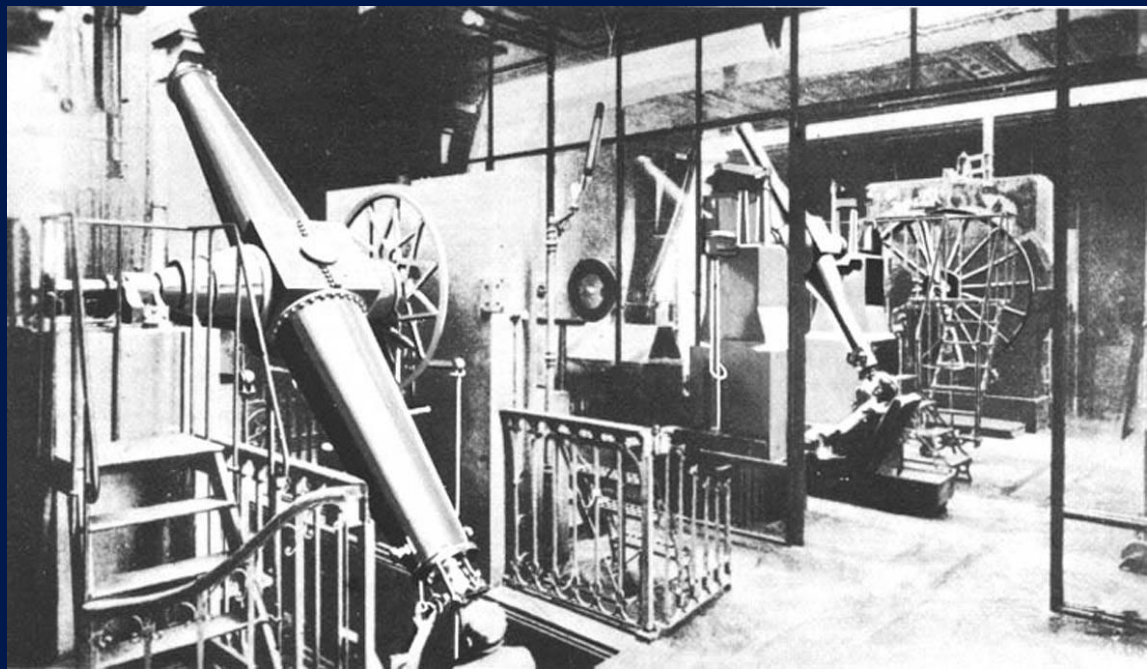


Nice ↑

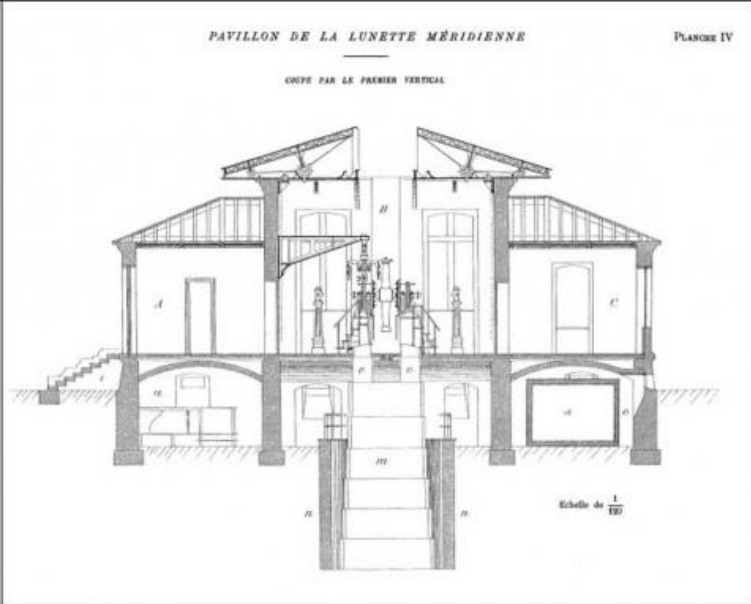
Strasbourg ↓



La salle méridienne de l'observatoire de Paris en 1920



Les bâtiments associés



Les instruments méridiens encore en fonctionnement

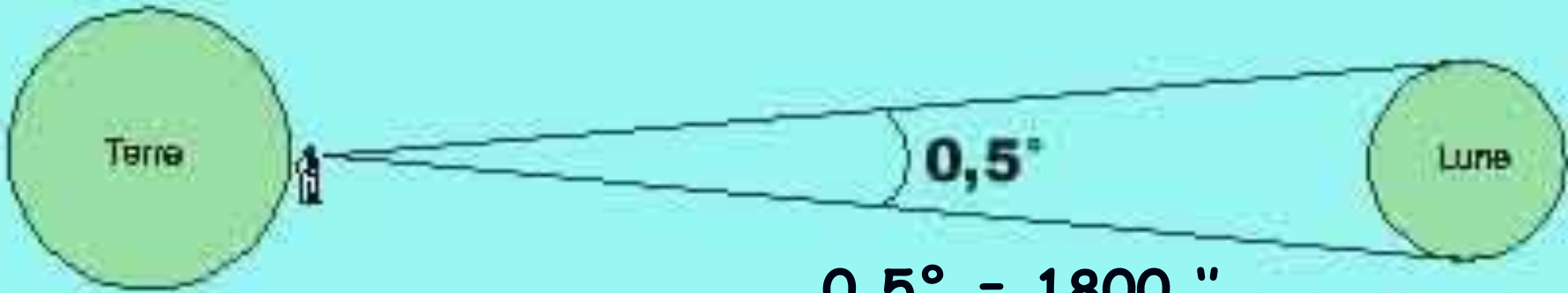


Les lunettes méridiennes de Bordeaux et de Flagstaff observent le système solaire pour les besoins de la navigation spatiale mais utilisent un autre principe que le passage au méridien

Les instruments méridiens aujourd'hui

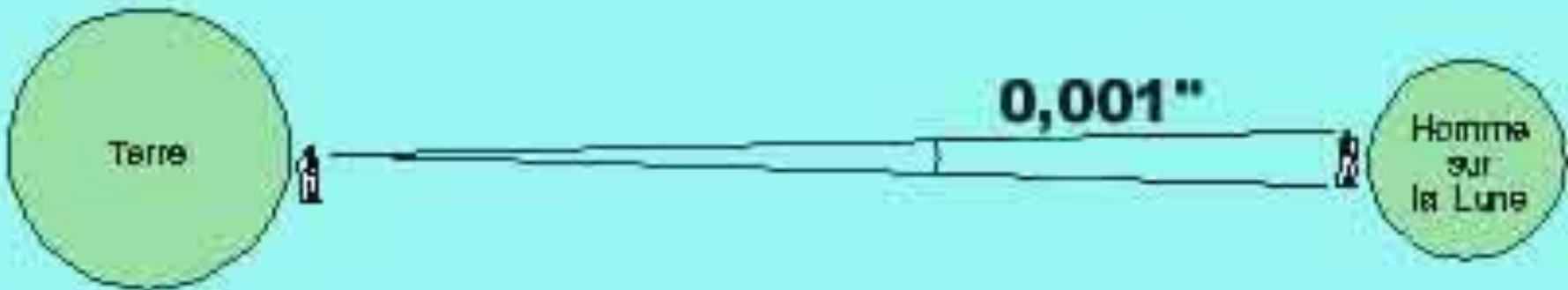
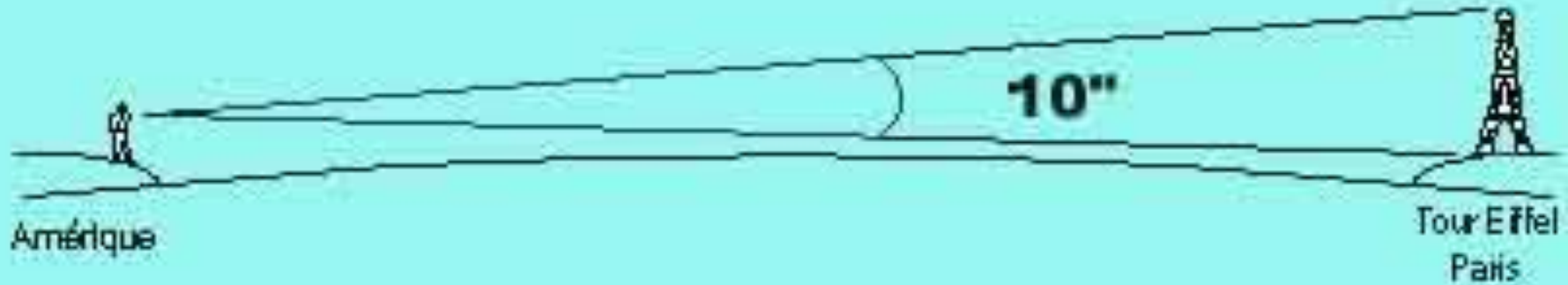
- Instruments automatiques
- Détecteurs CCD en mode balayage: mesure le passage d'une bande de ciel qui défile devant le détecteur
- On n'observe plus le passage d'un seul objet mais de tous les astres qui défilent devant le détecteur sont mesurés
- La précision augmente avec le nombre d'étoiles

La mesure des angles, précision, résolution



$$0,5^\circ = 1800''$$

Résolution de l'œil = 1' = 60''



Angle apparent + taille → distance

Résolution:

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

Il sera impossible de distinguer deux points dont la distance est inférieure à la résolution du télescope utilisé .

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 la stabilité du télescope et des possibilités de correction des distorsions dans les images.

Exemples:

Télescope de Schmidt: $0''.100$

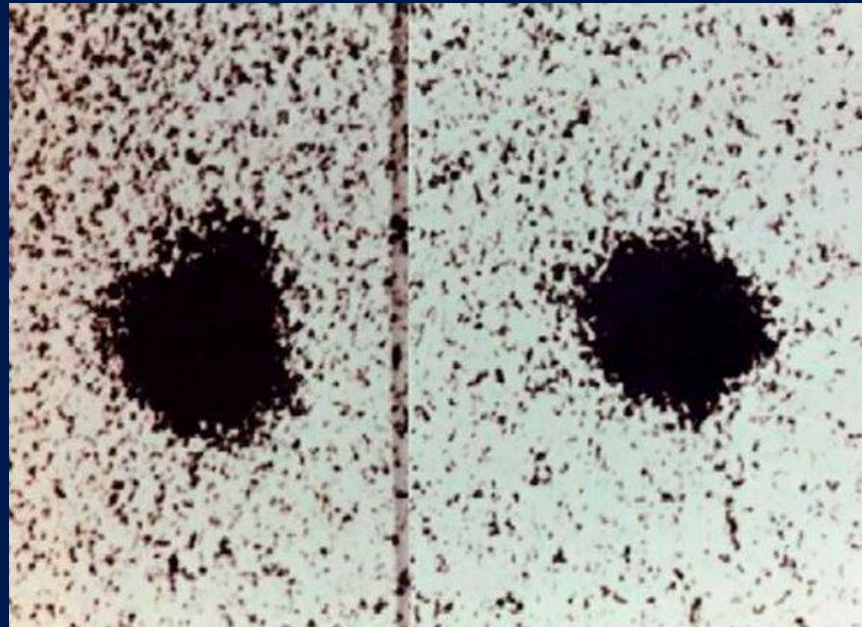
Télescope longue focale: $0''.010$

Hipparcos: $0''.001$

Gaia: $0''.000001$

Précision et résolution

- Pluton et Charon: mauvaise résolution (distance Pluton-Charon de l'ordre de 0,9 seconde de degré)



- La précision dépend du rattachement à un système de référence et à la répétabilité de la mesure

Historique de la précision de mesure

À l'œil nu:

- Hipparque (-150): 1000 secondes de degré (~15 minutes)
- Tycho Brahé (1600): 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

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

Les outils de l'astrométrie: plusieurs techniques, la mesure d'une quantité ou la datation d'un phénomène

- Comment mesurer la position d'un objet:
 - Mesurer un angle sur le ciel (télescope)
 - Mesurer une distance (radar)
 - Mesurer une vitesse (effet Doppler)
 - Observer un phénomène donnant une configuration géométrique particulière à un instant bien défini (télescope)
- Dans le premier cas, la précision est en angle géocentrique sur le ciel, limitée par l'instrumentation
- Dans les deuxième et troisième cas, on mesure une vitesse
- Dans le dernier cas, la précision est en km dans l'espace et n'est pas limitée par l'instrumentation
- Dans tous les cas, la précision dépend du rapport signal/bruit

Mesures angulaires, deux méthodes de positionnement: absolu ou relatif

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

Observer un champ: le rattachement

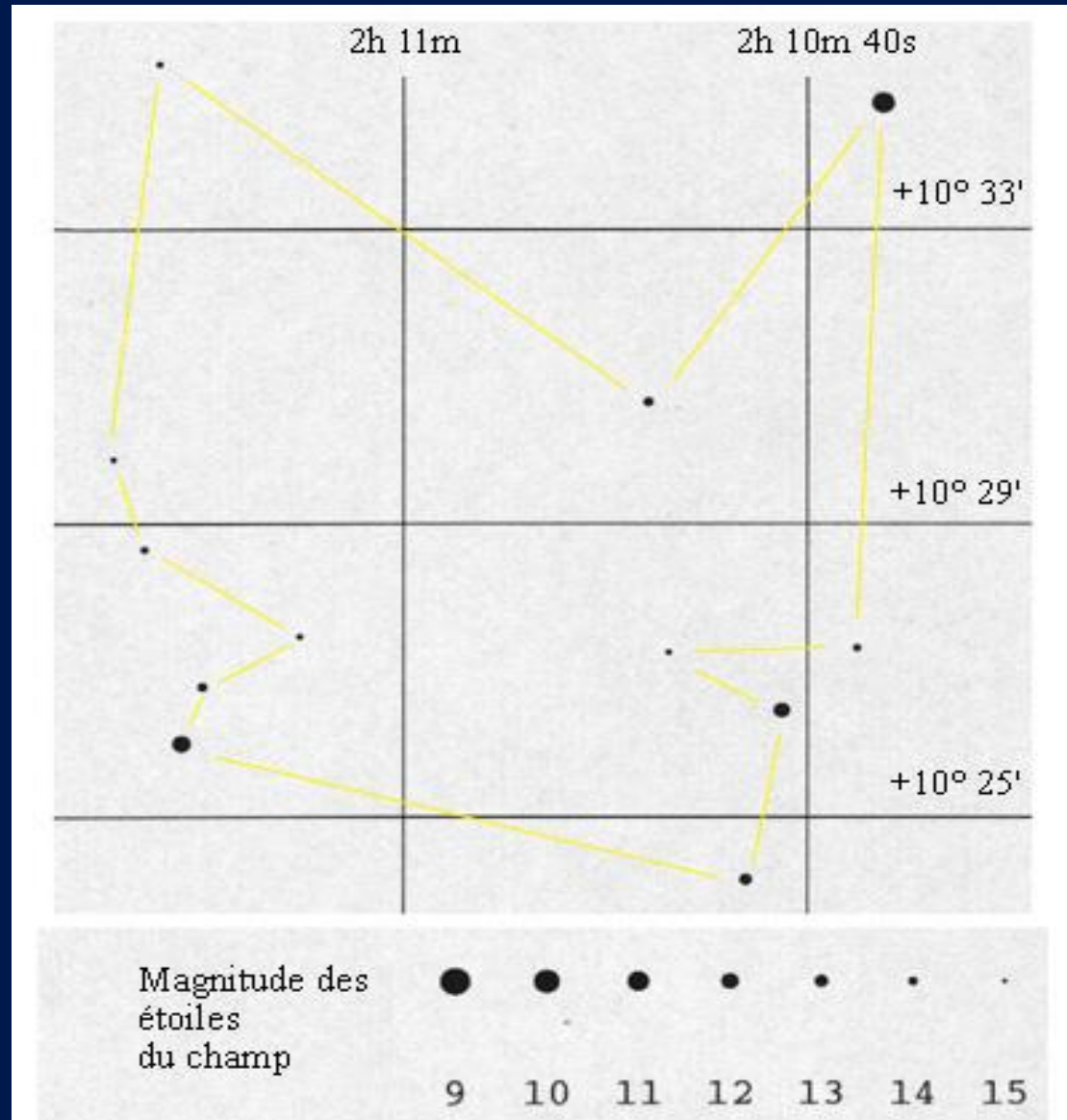


Un champ est défini par sa taille et sa magnitude limite qui dépendent du télescope utilisé

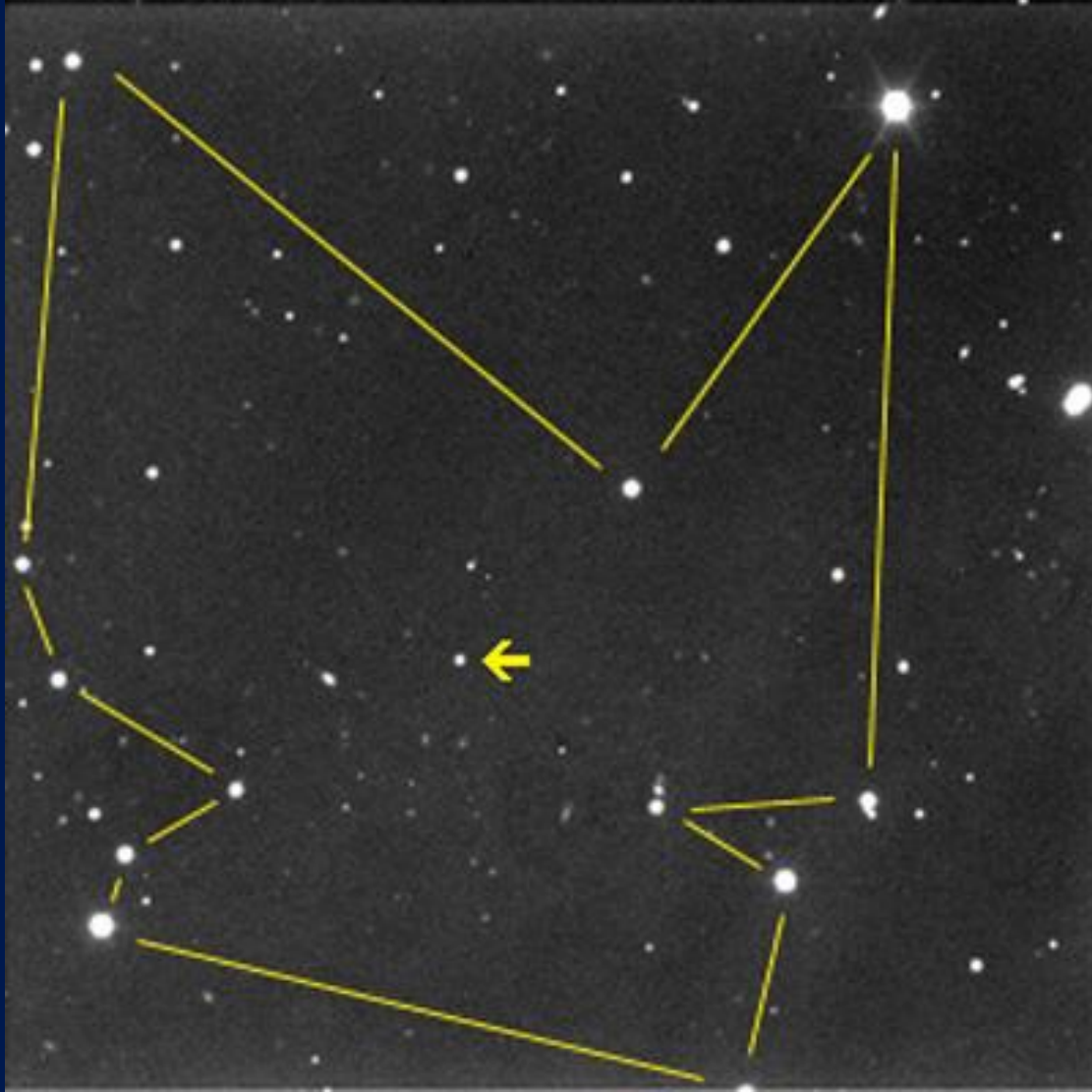
Observer un champ: le rattachement



Taille 12'x12' sur la sphère céleste: étoiles jusqu'à la magnitude 20



Etoiles du « Guide Star Catalogue » du champ observé



Repérage des étoiles cataloguées → étalonnage du champ

Le rattachement

- La projection gnomonique

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

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

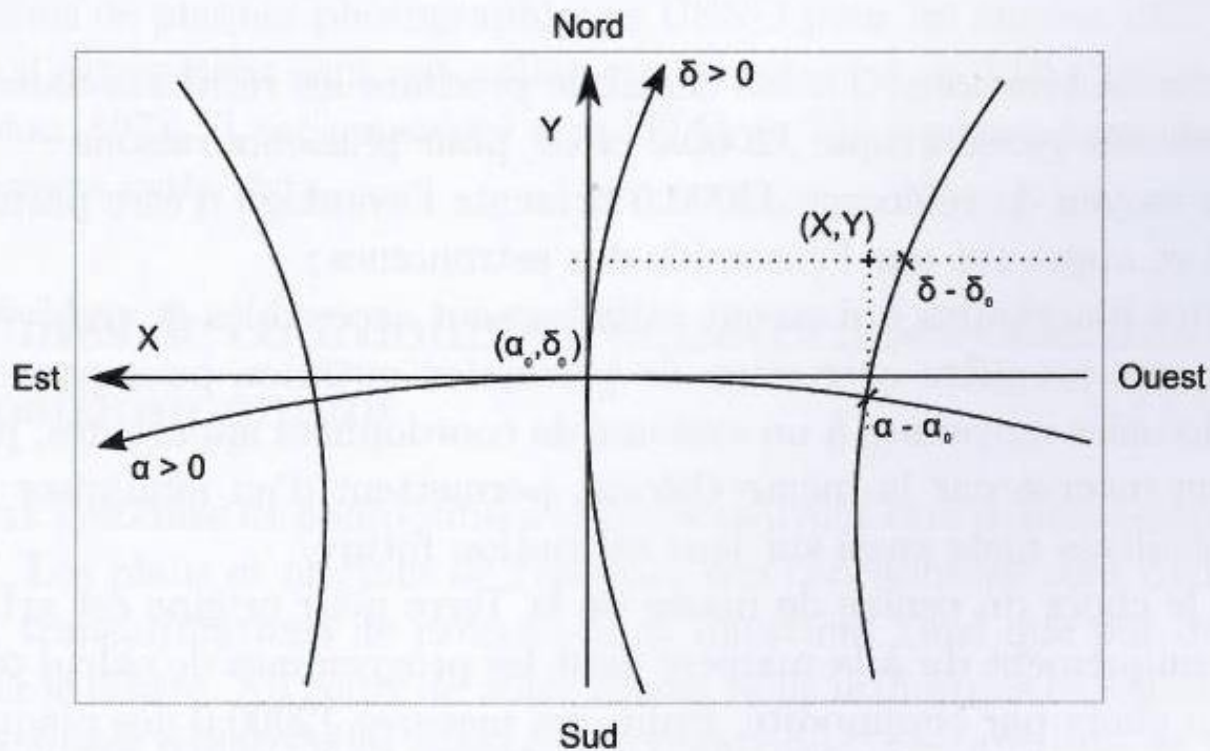
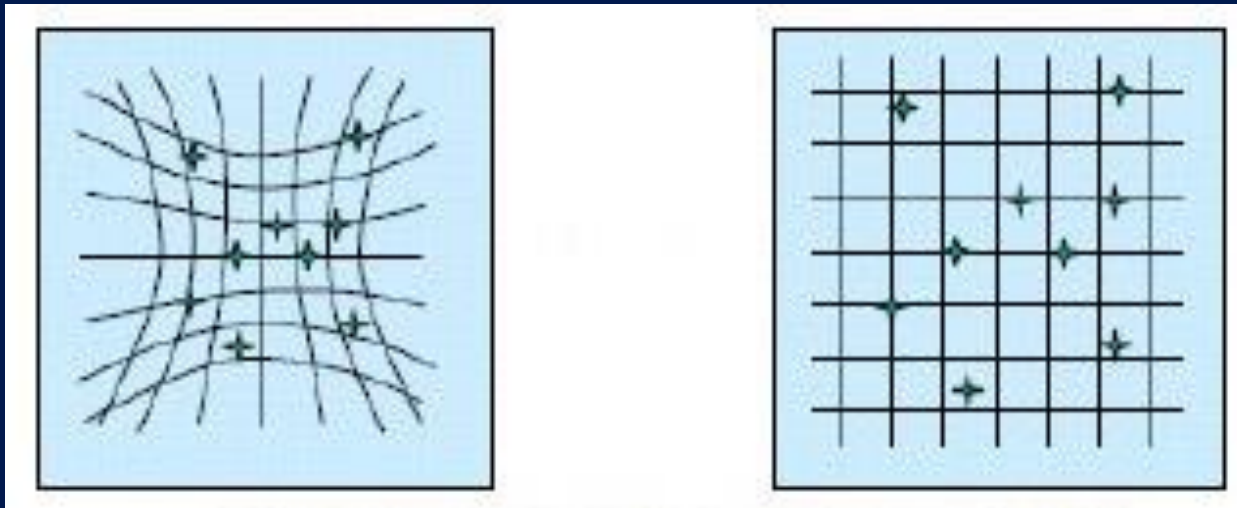


Figure 2.1 – Représentation tangentielle (plane) d'un champ sphérique.

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):

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

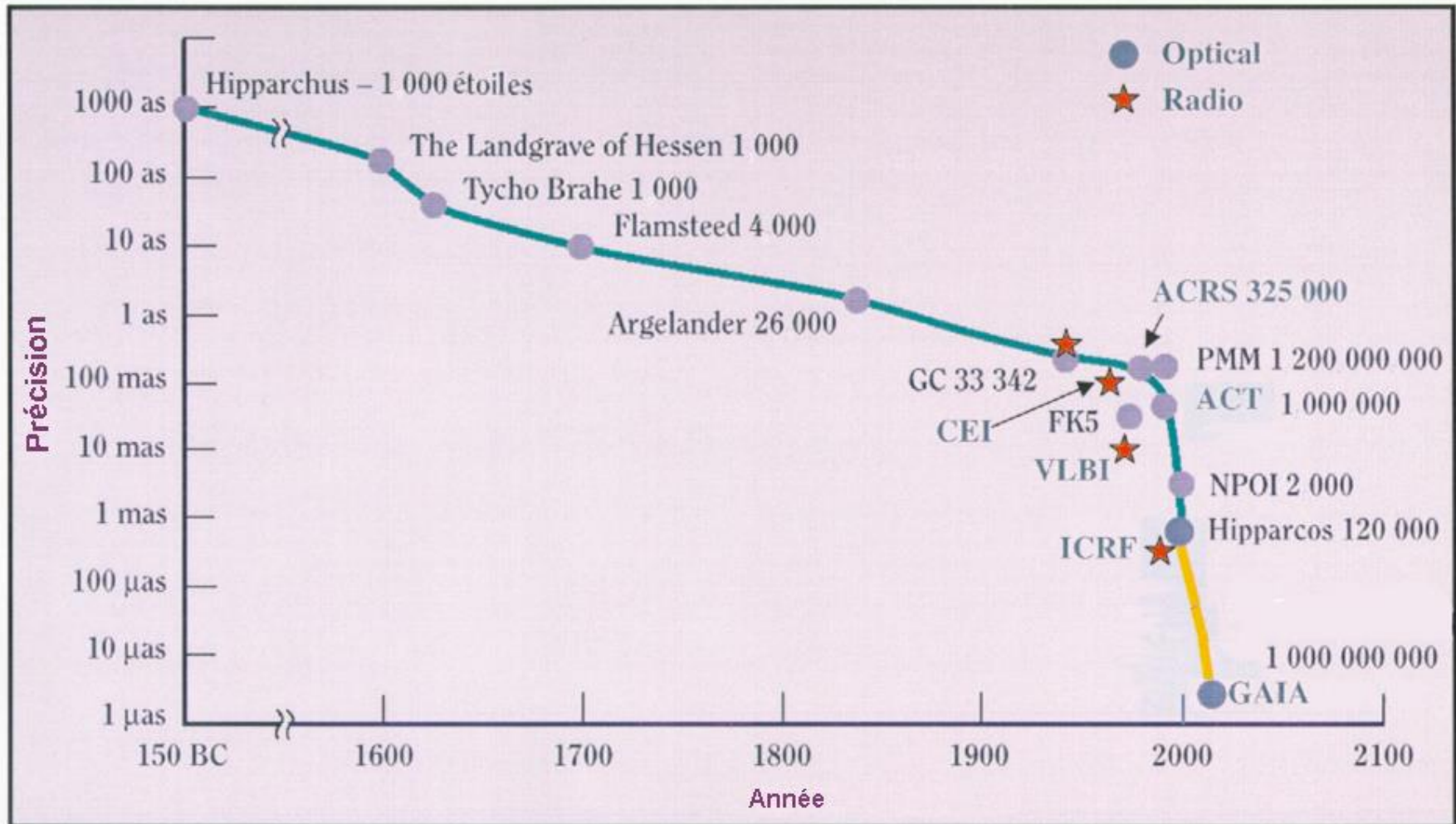
$$Y = -\sin \theta x + \cos \theta y$$

Les distorsions du champ sont toutes dans:

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

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

Les catalogues d'étoiles: nos outils pour la calibration astrométrique



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 billion	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 billion				compilation des meilleures données
2006	Bordeaux	2 970 674	15.4	50 → 70	1.5→6 mas/an	+11° > δ > +18°
2003	2MASS	470 000 000	16	60 → 100		Infrarouge K
2015	GAIA	1 billion	20	< 0.01 mas		obs. spatiales

Les buts de l'astrométrie: les systèmes de référence

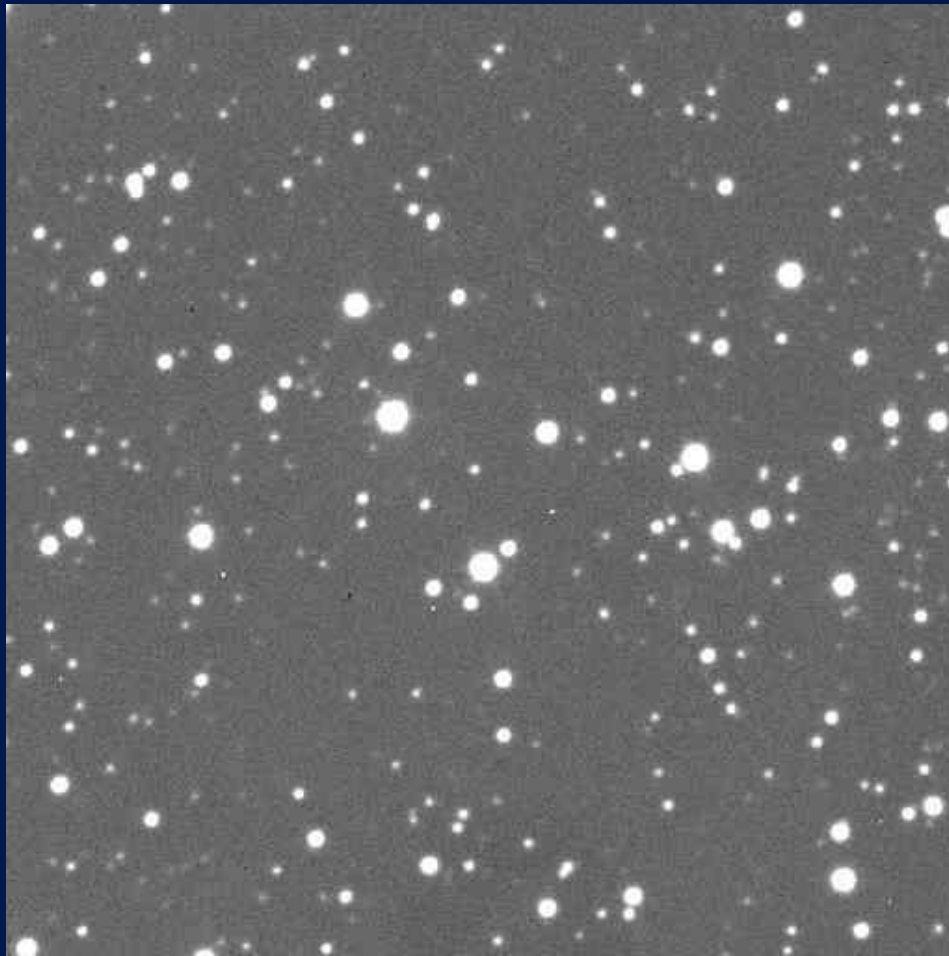
- Catalogues d'étoiles et systèmes de référence
- Parallaxe, distance des étoiles
- Mouvement propre des étoiles
- Dynamique galactique, groupe local
- Cosmologie, rotation des galaxies
- Étoiles doubles, paramètres orbitaux
- Mécanique céleste des corps du système solaire

Les buts de l'astrométrie: la dynamique des corps du système solaire

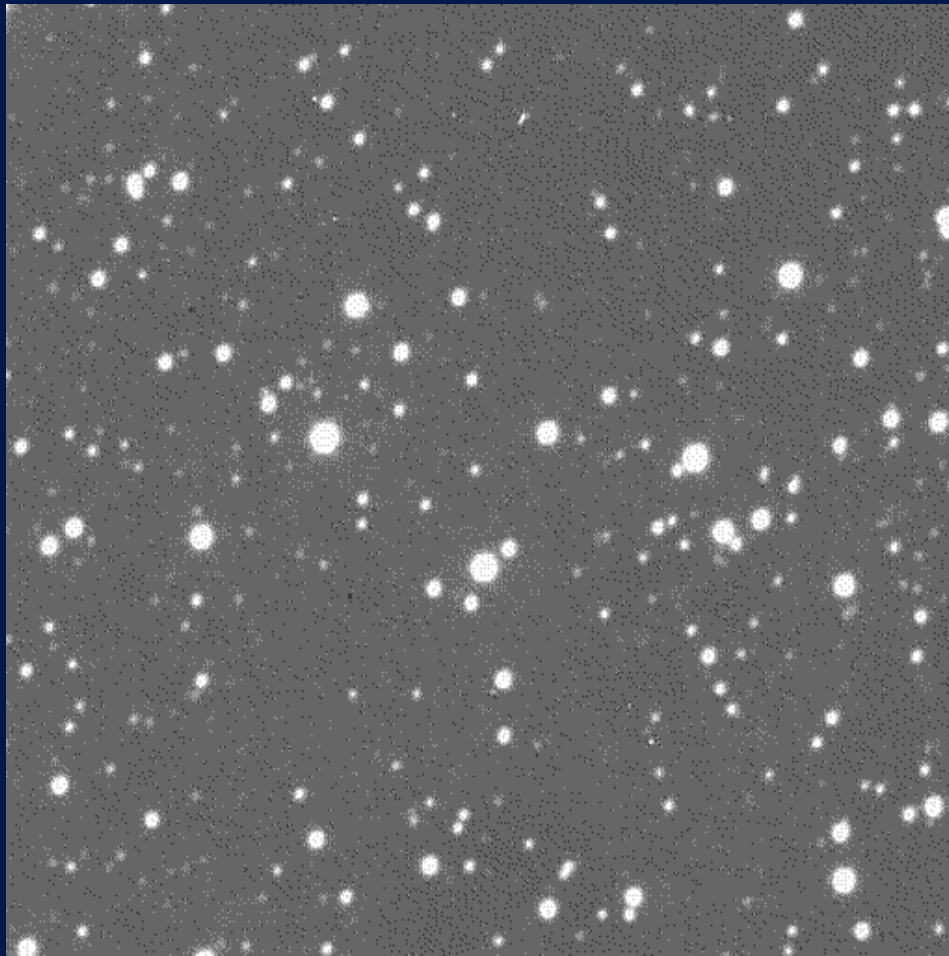
- Navigation des sondes spatiales (éphémérides)
- Dynamique, stabilité, évolution, échelle du système solaire
- Surveillance des astéroïdes géocroiseurs (éphémérides)
- Observations du sol et de l'espace (éphémérides)
- Physique des surfaces et de l'intérieur des corps du système solaire
- Gravitation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

- Planètes extra solaires: vitesses radiales et transits

Le suivi astrométrique des astéroïdes



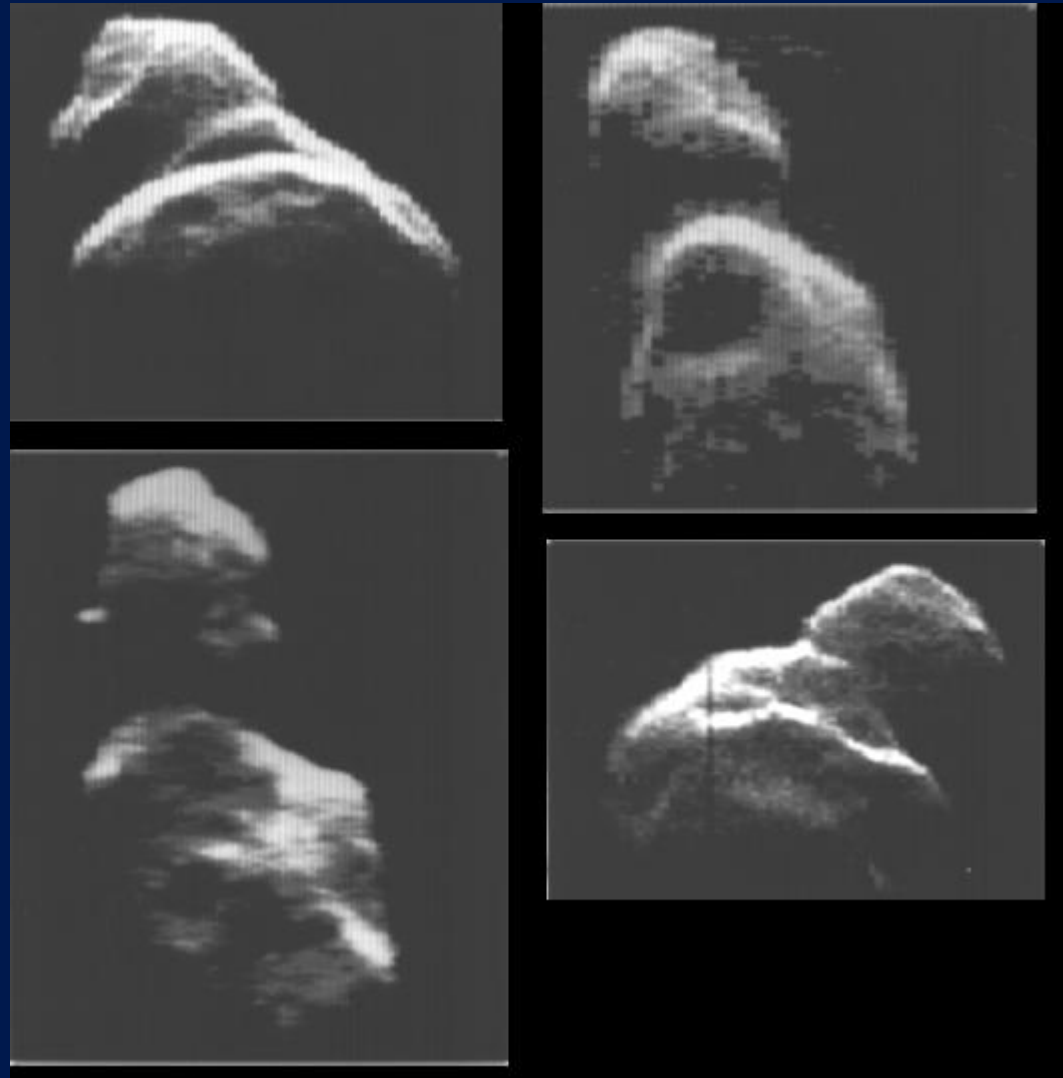
Le suivi astrométrique des astéroïdes



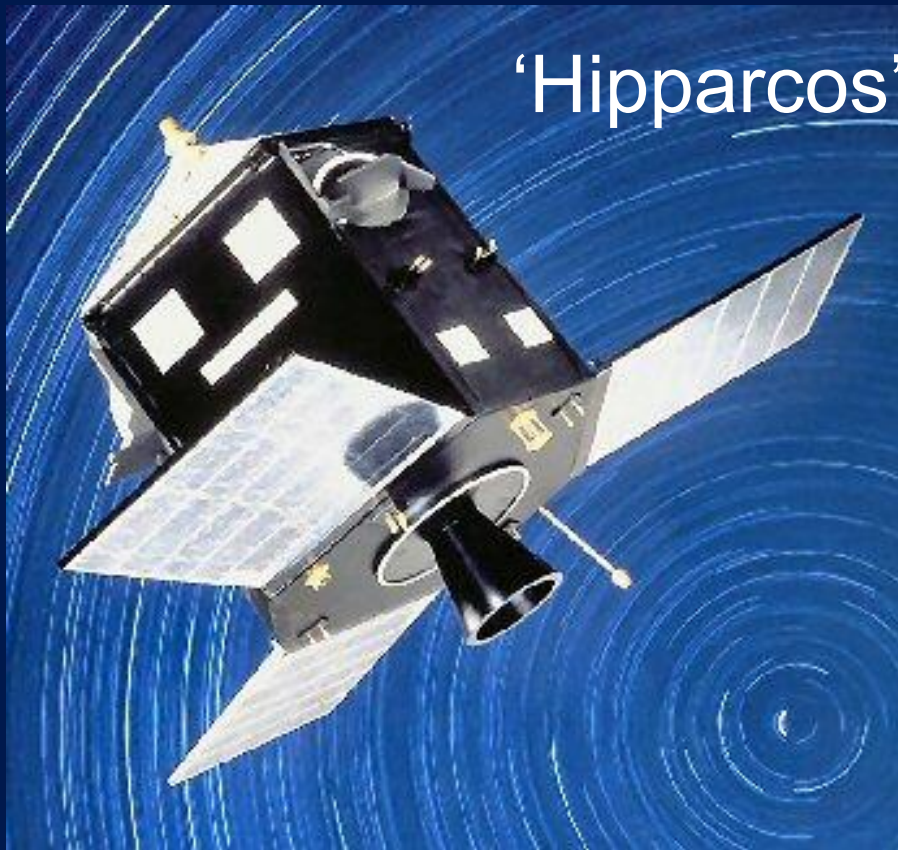
L'astrométrie au service de la mécanique céleste

Les géocroiseurs: le radar, une mesure de distance

Toutatis



L'astrométrie dans l'espace: Hipparcos, "précurseur" de Gaia



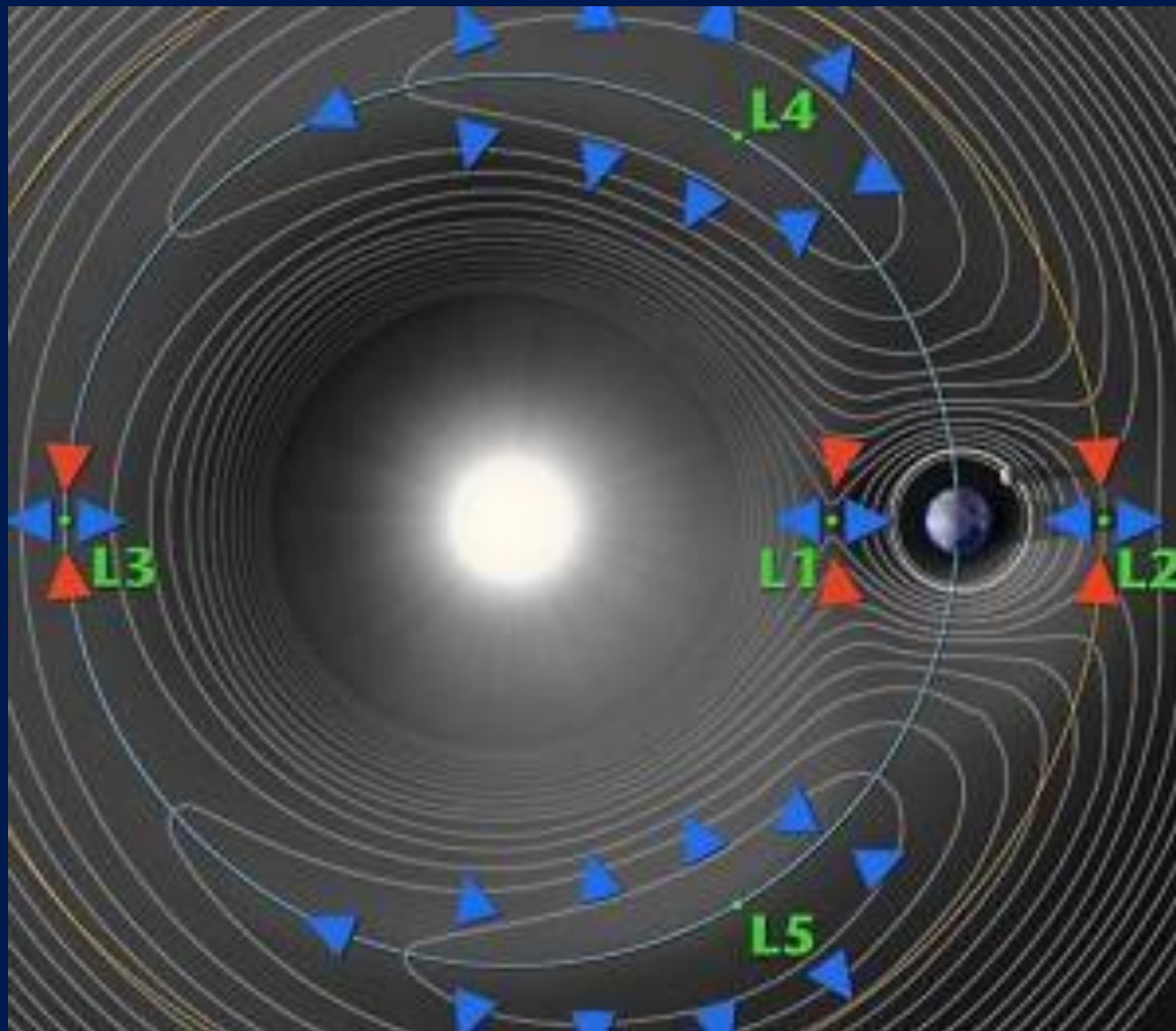
Gaia: un nouveau satellite astrométrique

Le but astrométrique de 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.

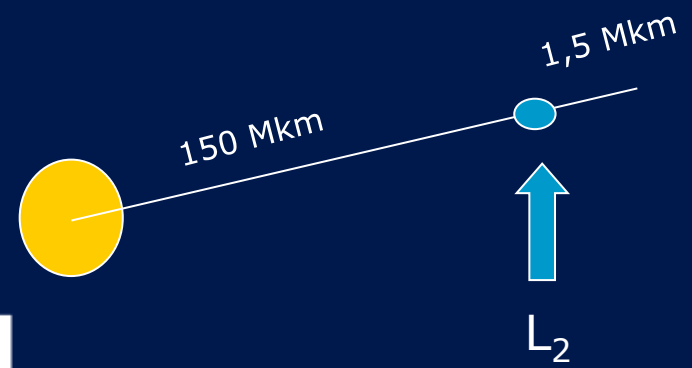
Les parallaxes pourront être calculées pour un milliard étoiles avec une bonne précision jusqu'à 10 000 parsec.

Contrairement aux catalogues précédents, Gaia ne va pas partir d'un catalogue existant (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...).

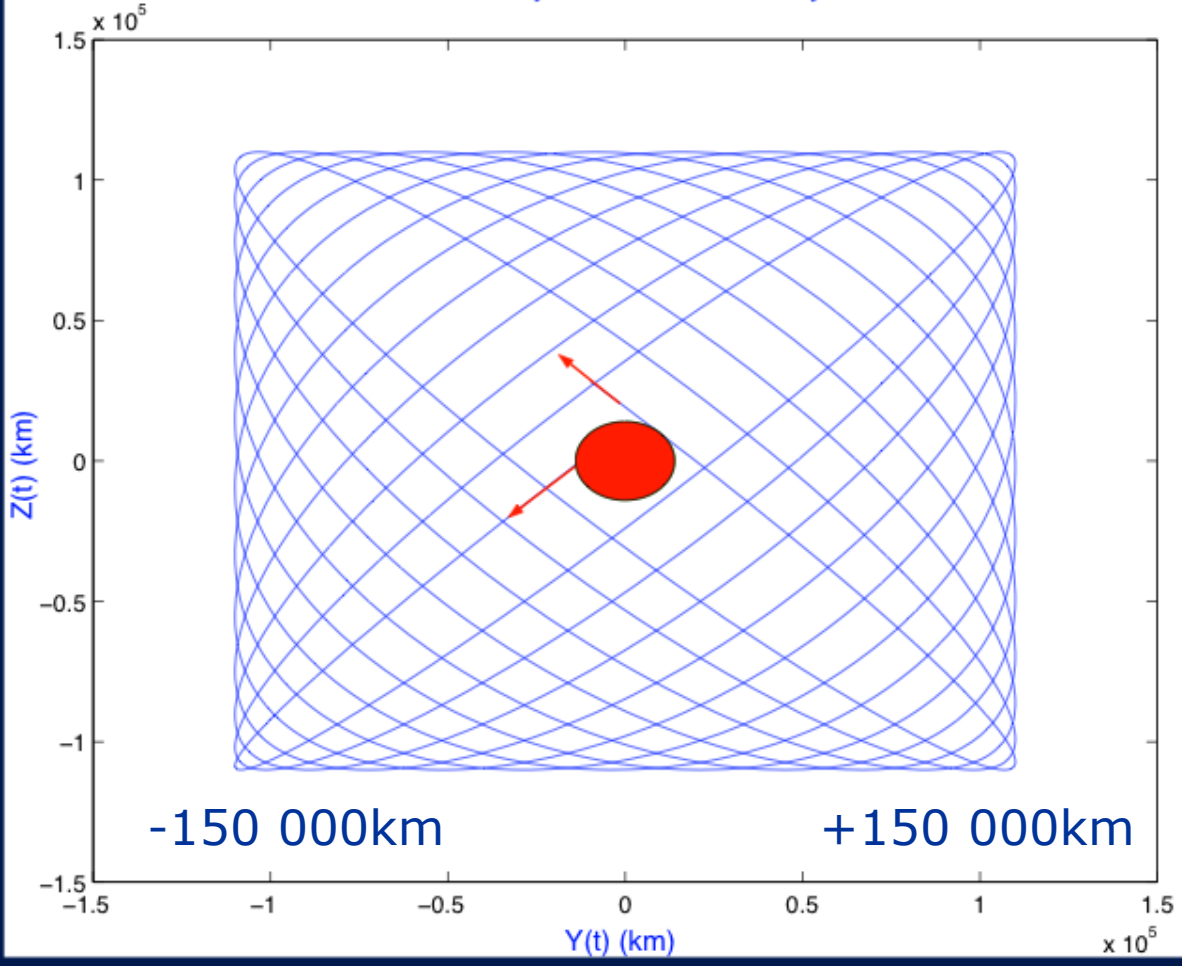
Les « points de Lagrange » de l'orbite terrestre



Gaia placé au point de Lagrange L2



GAIA Lissajous orbit over 6.3 years



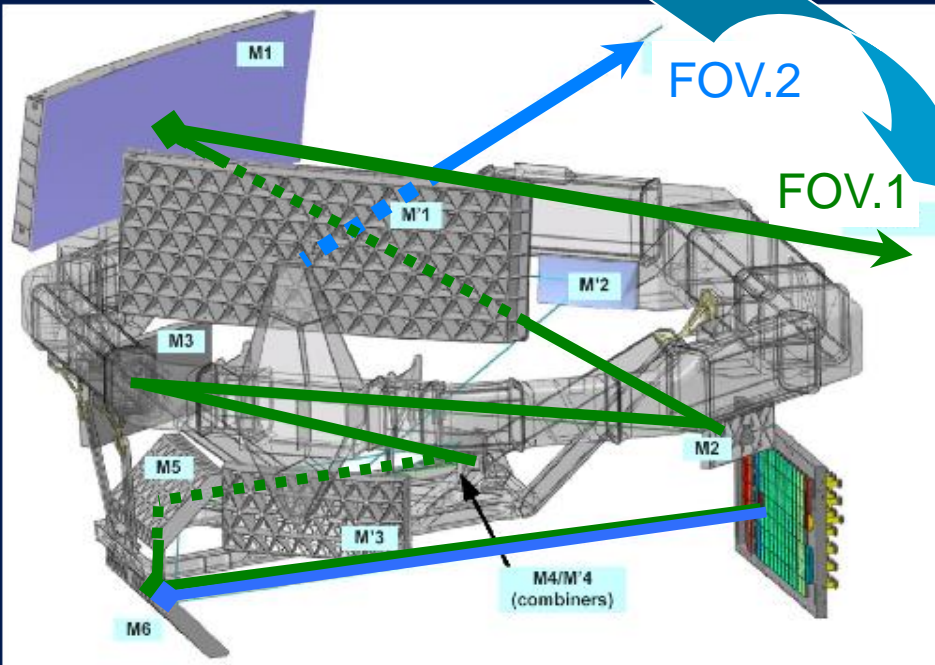
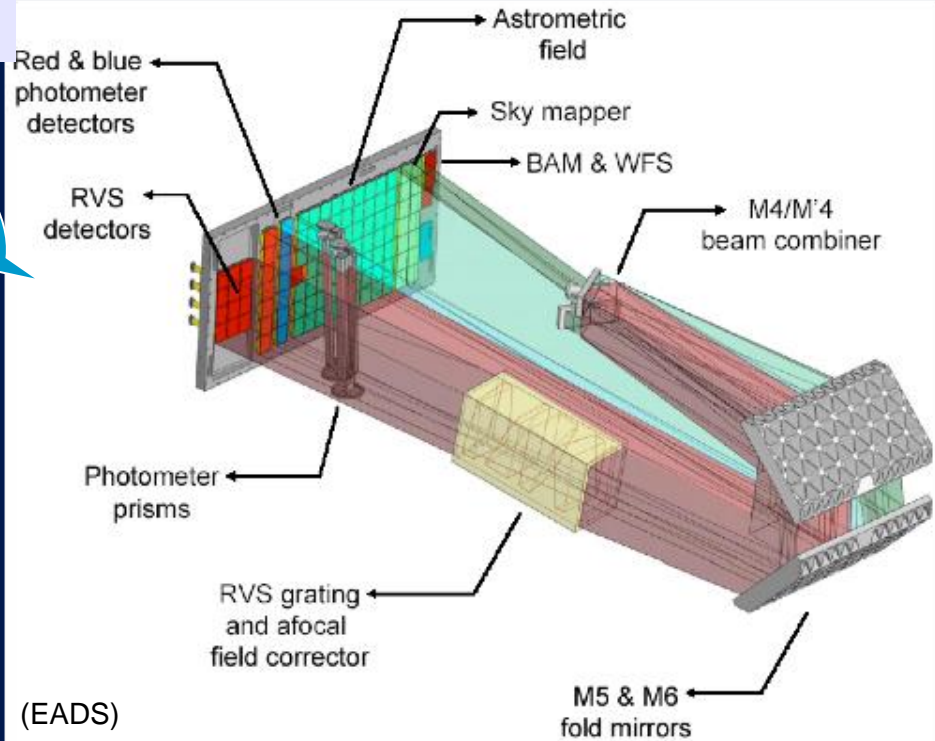
- L2 sur orbite de Lissajous:
- stabilité
 - ~pas d'éclipses
 - ~pas d'effets thermiques

Une optique complexe

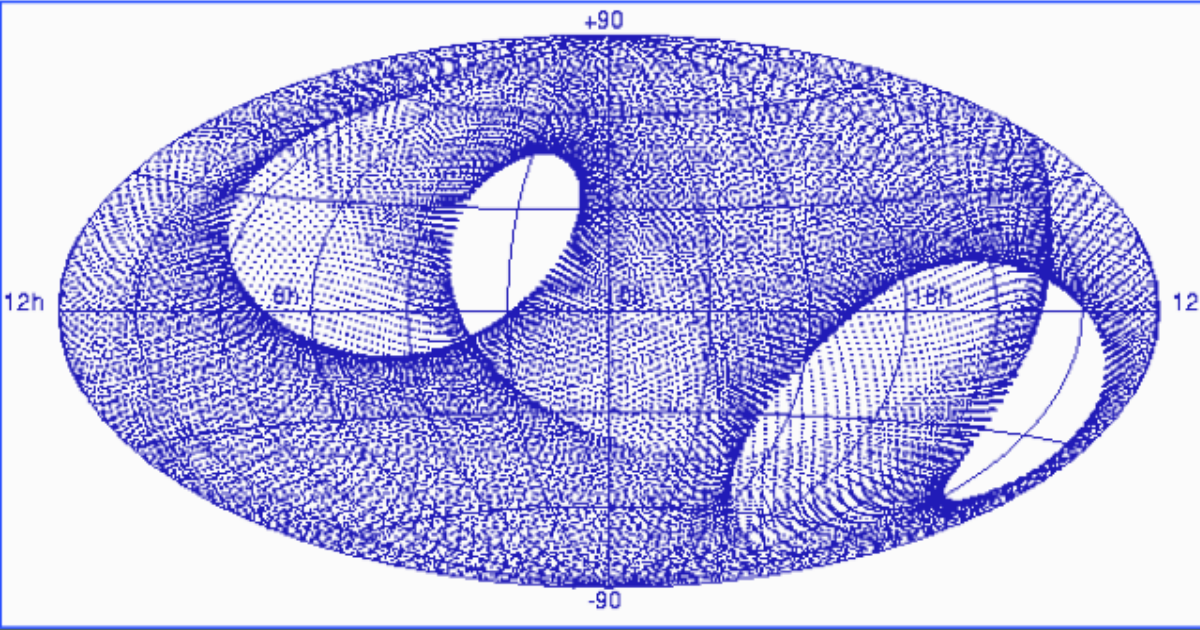
Basic angle
(FOV1, FOV2)

FOV.2

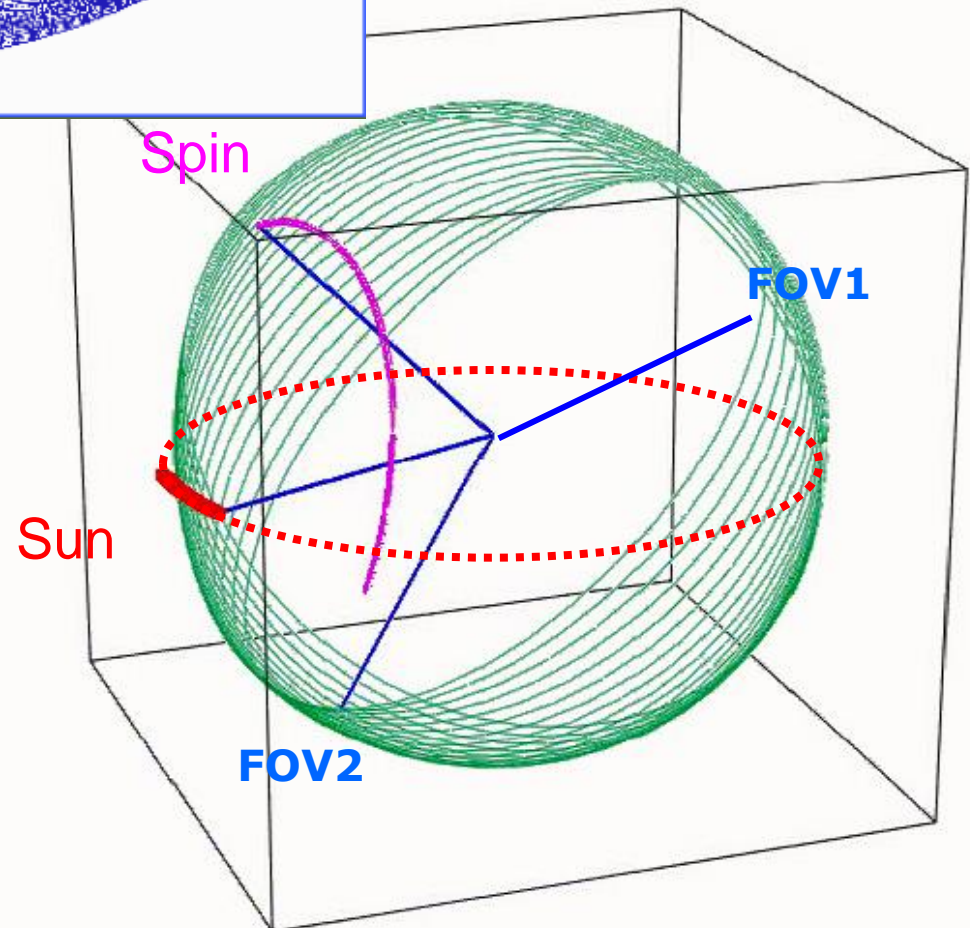
FOV.1



La loi de balayage du ciel

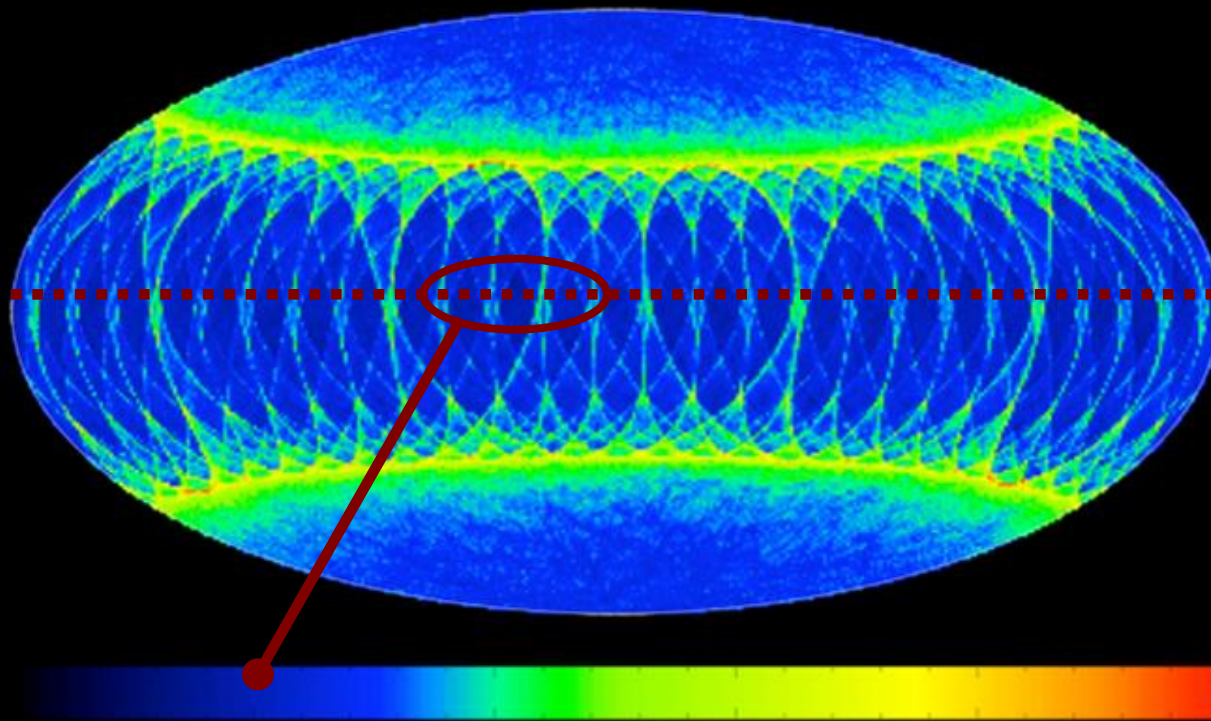


- ❑ Ciel complet en 6 mois
 - ❑ Durée 5 ans
 - ❑ Balayage non uniforme
- ➔ éclipse désavantagée



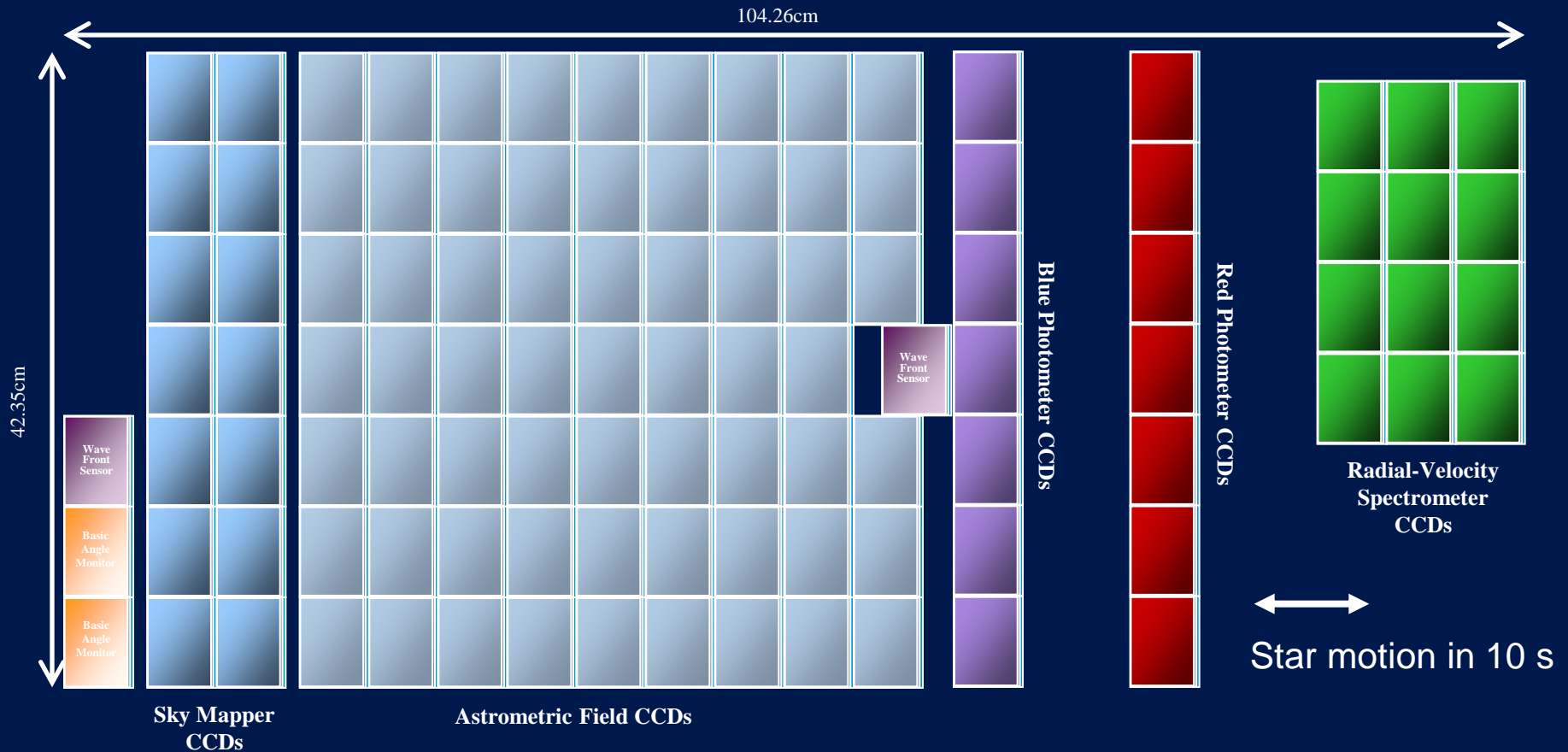
Un balayage régulier du ciel

Coordonnées écliptiques.



- Ciel complet en 6 mois
- durée 5 ans
- Balayage non uniforme
-> écliptique désavantagée

Dans le plan focal: des récepteurs CCD



Total field:

- active area: 0.75 deg²
- CCDs: 14 + 62 + 14 + 12
- 4500 x 1966 pixels (TDI)
- pixel size = 10 μm x 30 μm
= 59 x 177 mas

Sky mapper:

- detects all objects to 20 mag
- rejects cosmic-ray events
- FoV discrimination

Astrometry:

- total detection noise: 6 e⁻

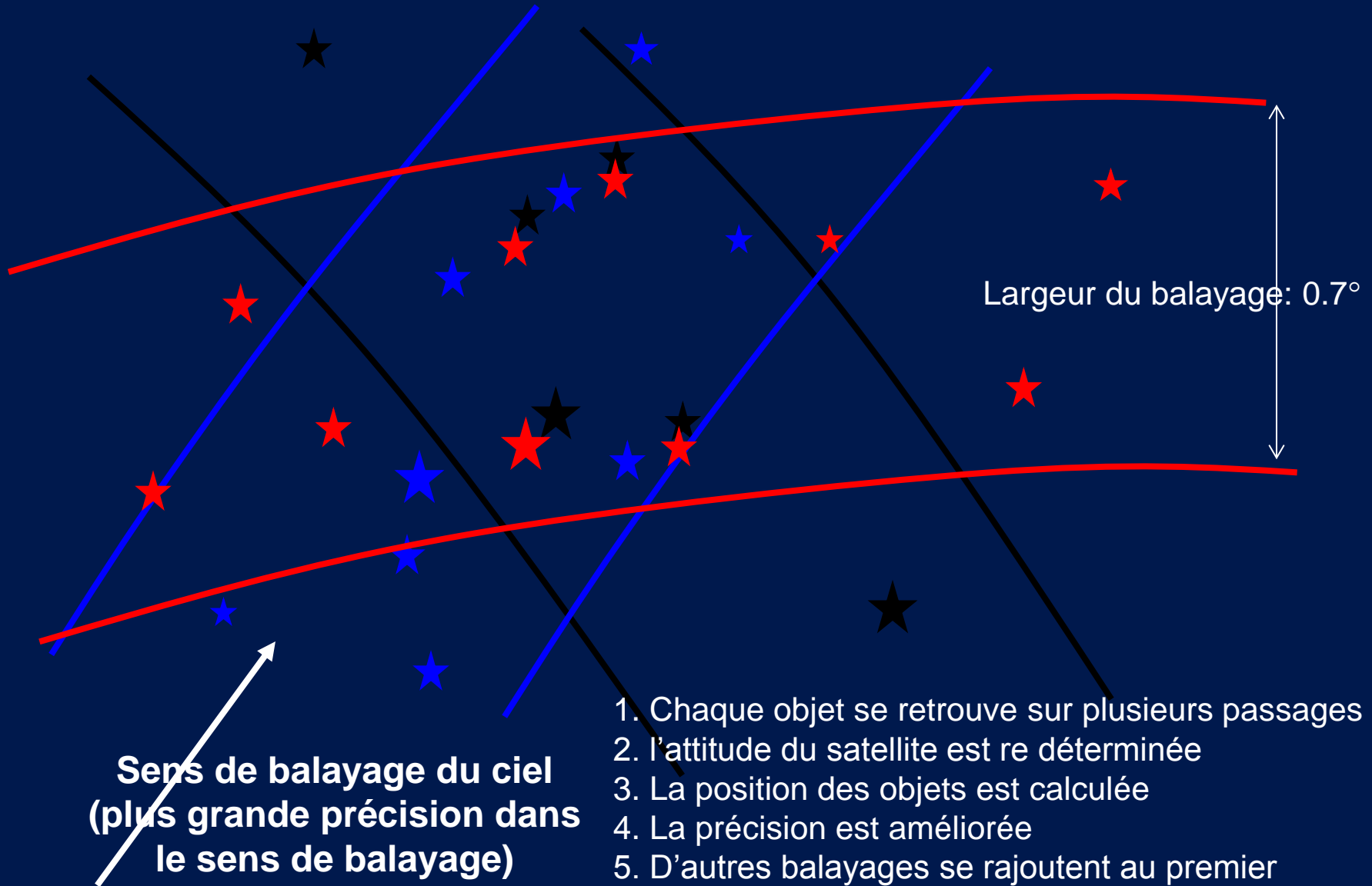
Photometry:

- two-channel photometer
- blue and red CCDs

Spectroscopy:

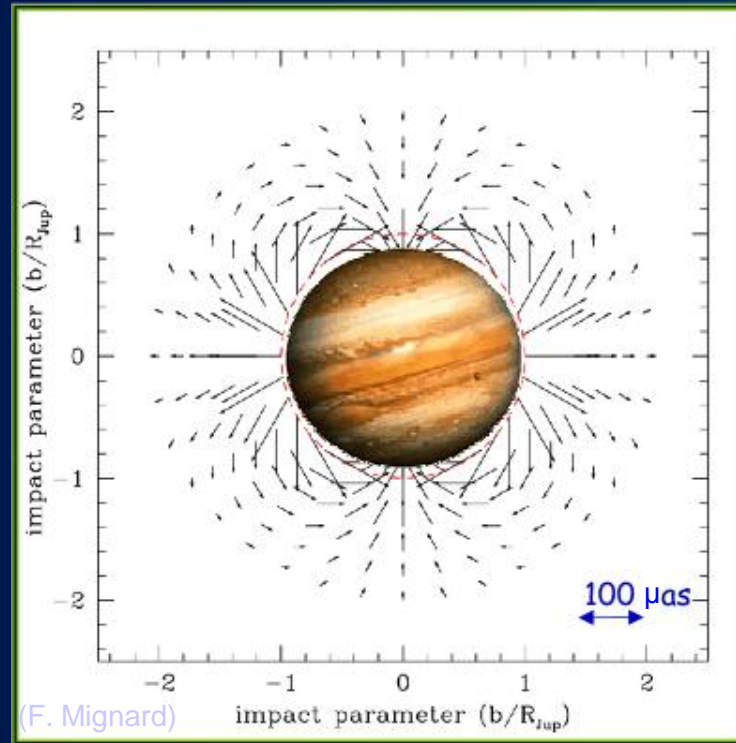
- high-resolution spectra
- red CCDs

Les principes de “réduction”



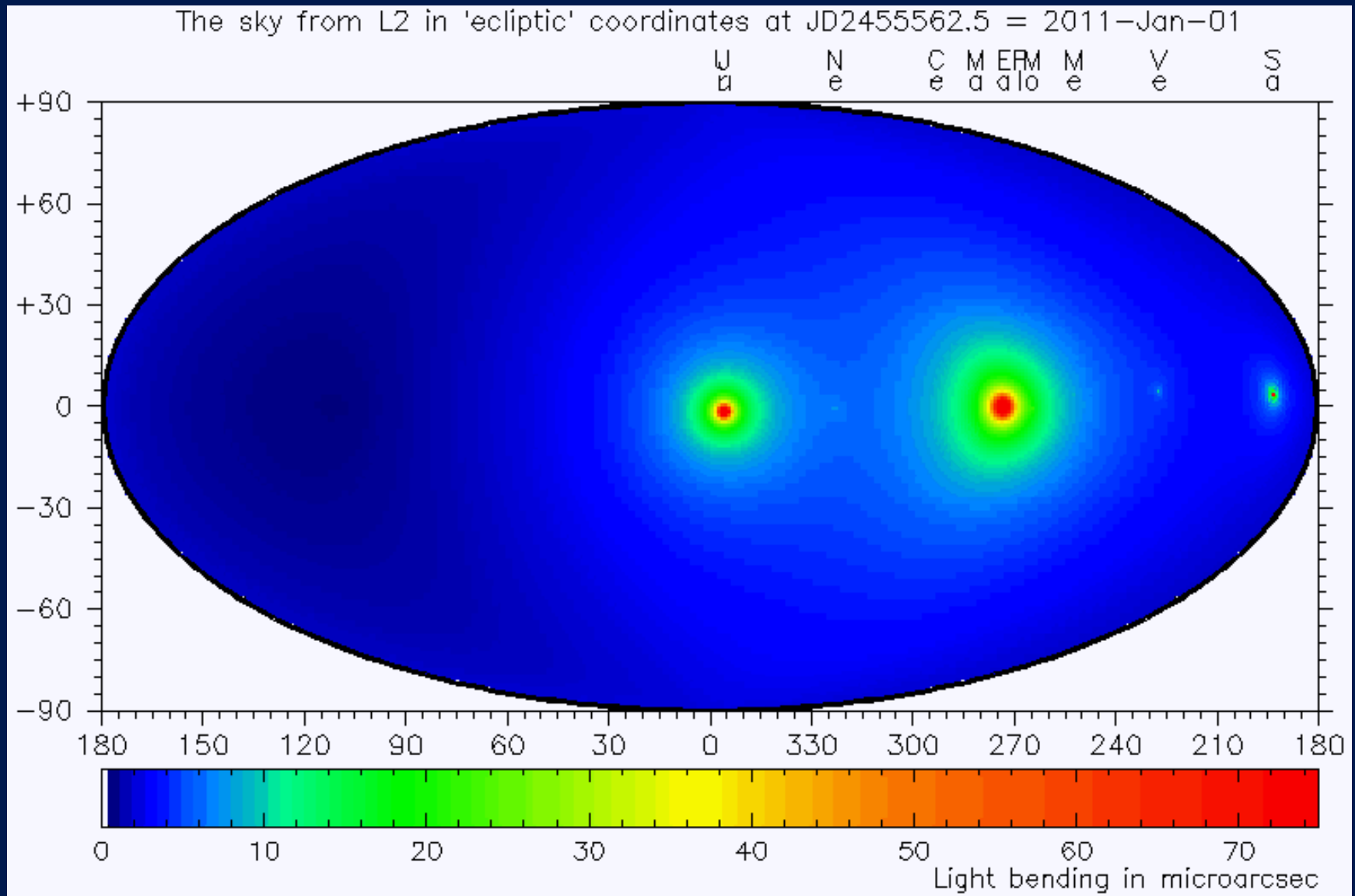
	Hipparcos	Gaia
Epoque	1991.25	≈2013.5
Récepteur	photomètre	CCD
Ouverture	Ø=0.29m	1.45x0.5m
Catalogue d'entrée	oui	non
Magnitude limite (V)	12.5	20
Densité	3* /deg ² (TYC2=50)	25000 * /deg ²
Vitesses radiales	non	10km/s (V=16.5)
Photométrie	0.015 (V=9)	0.001 (V=15)
Astrométrie	1 mas (V=9)	7 μas (V=10) 10-25 μas (V=15) 300 μas (V=20) (~100-1000 μas Asteroides)

Des tests de la relativité générale



La déflexion de la lumière près de Jupiter

La déflexion relativiste de la lumière



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)

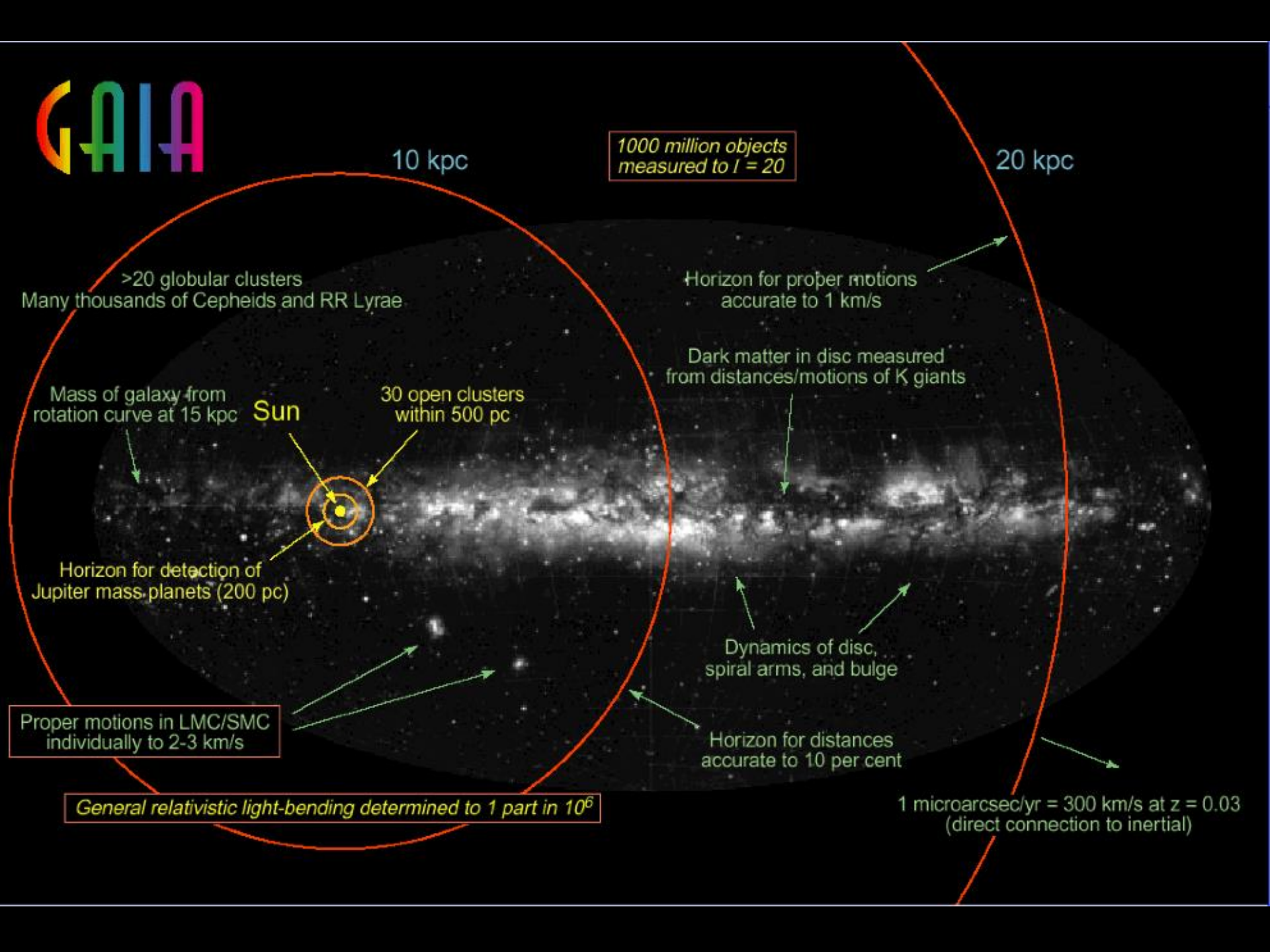
Dynamics of disc, spiral arms, and bulge

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)



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 (dans le cadre d'« observatoire virtuel ») afin d'être ré-étudiées avec les techniques nouvelles