

L'astrométrie

Cours de J.E. Arlot
SAPCB – juin 2023

L'astrométrie:

c'est la mesure de position et de distance des astres

Comment mesurer le ciel? La voûte céleste est sphérique, on ne peut mesurer que des angles (comme les longitudes et latitudes sur Terre) mais pas des distances.

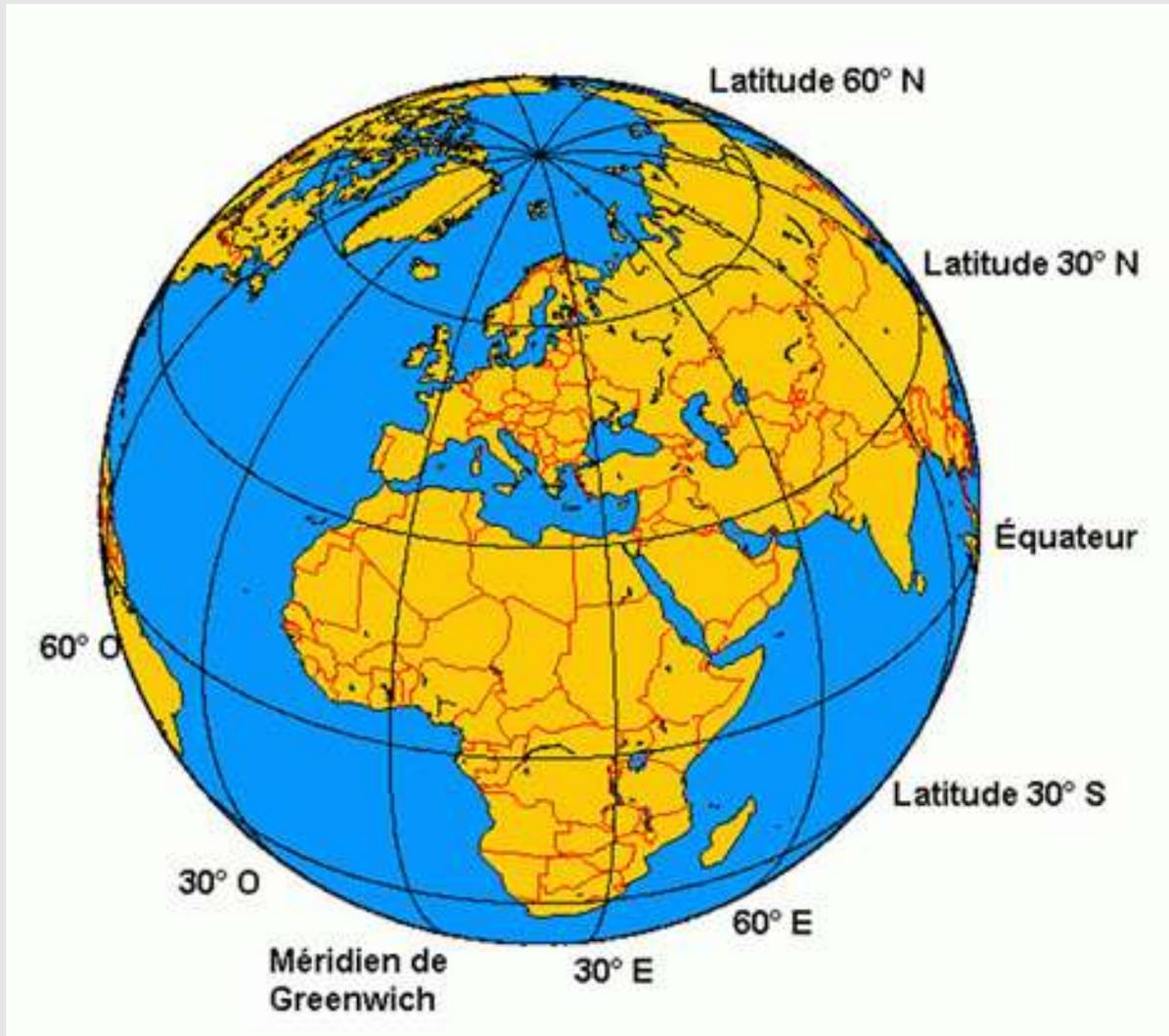
Il nous faut un système de référence et un repère pour mesurer positions et mouvements des astres.

Que mesurer? Et comment?

- Les étoiles « fixes » se déplacent lentement avec des mouvements complexes
- Les planètes se déplacent rapidement
- La Terre, sur laquelle nous sommes fixés, se déplace dans l'espace, tourne et oscille autour de son axe.

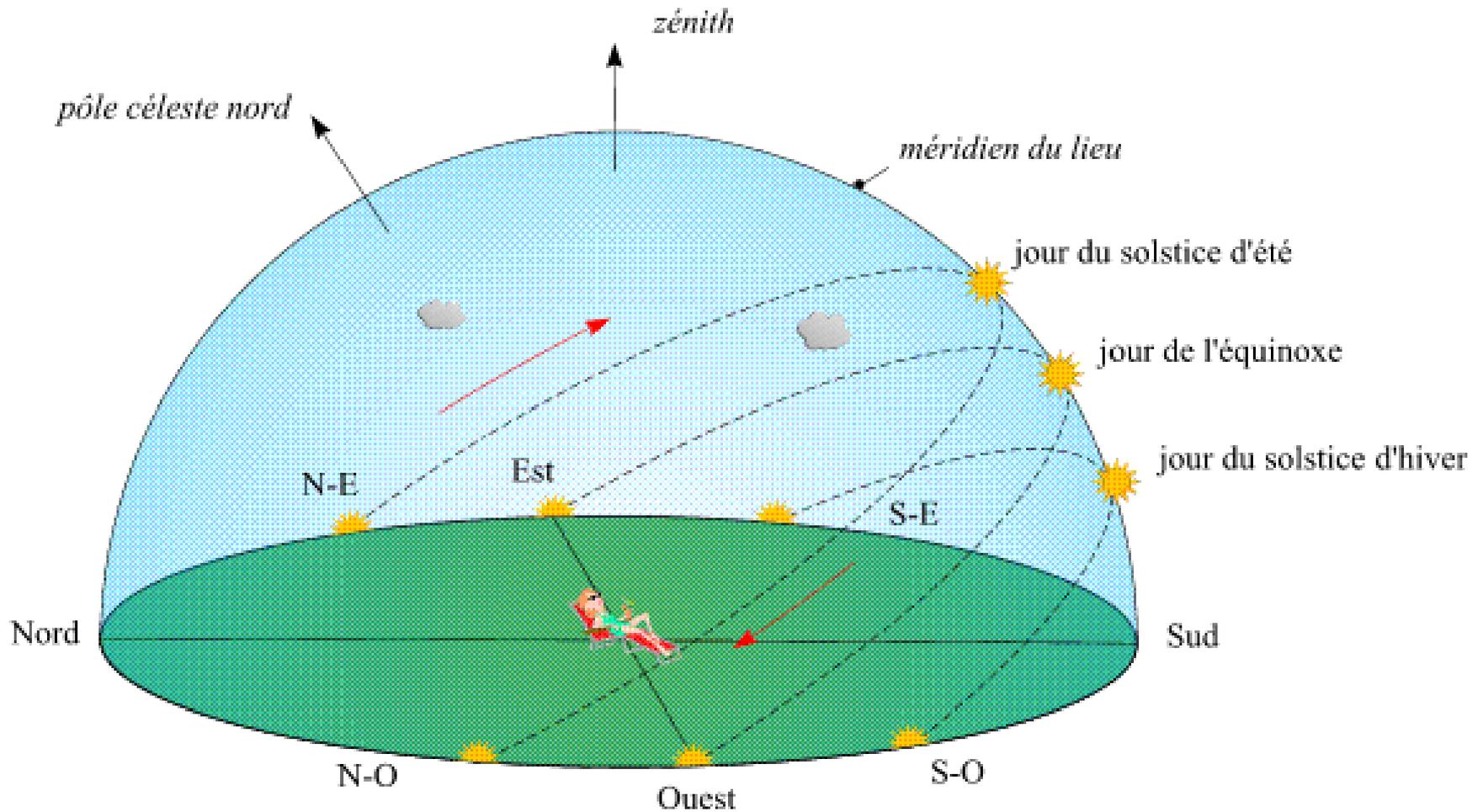
Mesurer des angles

rappel: les coordonnées géographiques



un système permettant de se localiser sur Terre

Le mouvement apparent du Soleil, de la Lune et des étoiles



Complicque les mesures mais montre des directions fixes

Mesures angulaires, deux méthodes de positionnement: absolu ou relatif

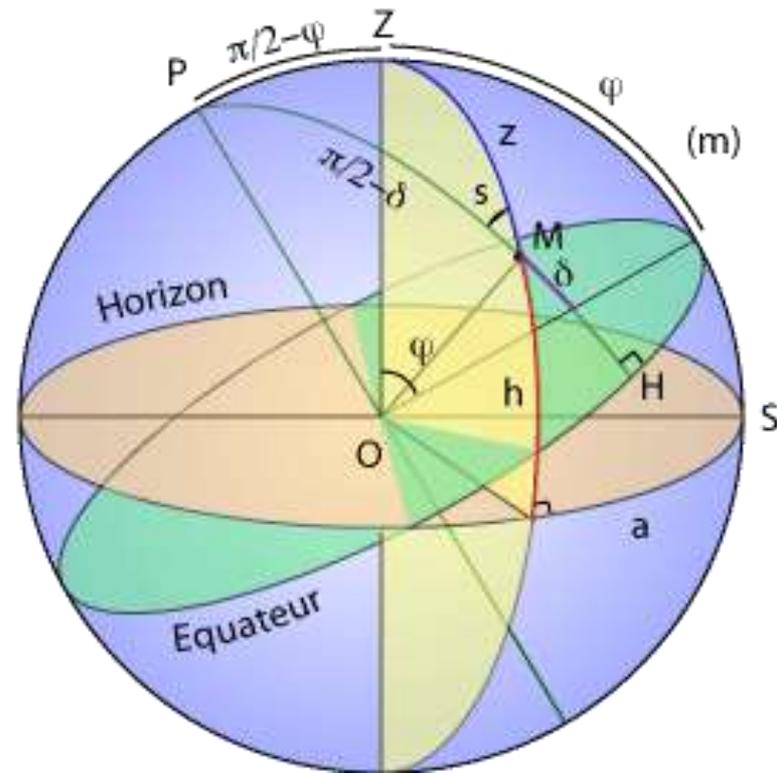
- Comment mesurer la position d'un objet:
 - Par rapport au référentiel de l'observateur (méridien)
 - Par rattachement à des astres proches connus (imagerie)
- Dans les deux cas, il faut se ramener à un référentiel commun espace-temps pour tous les observateurs

Mesurons le ciel

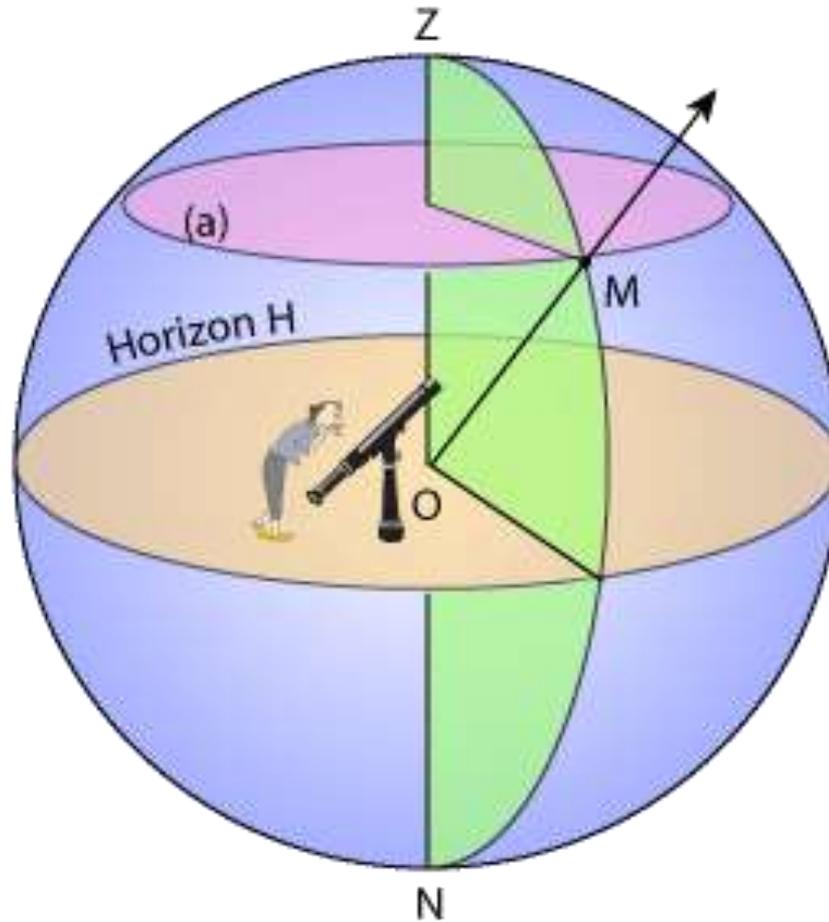
- La géométrie et la géodésie mesurent la Terre; l'astrométrie mesure le ciel

Elle permet:

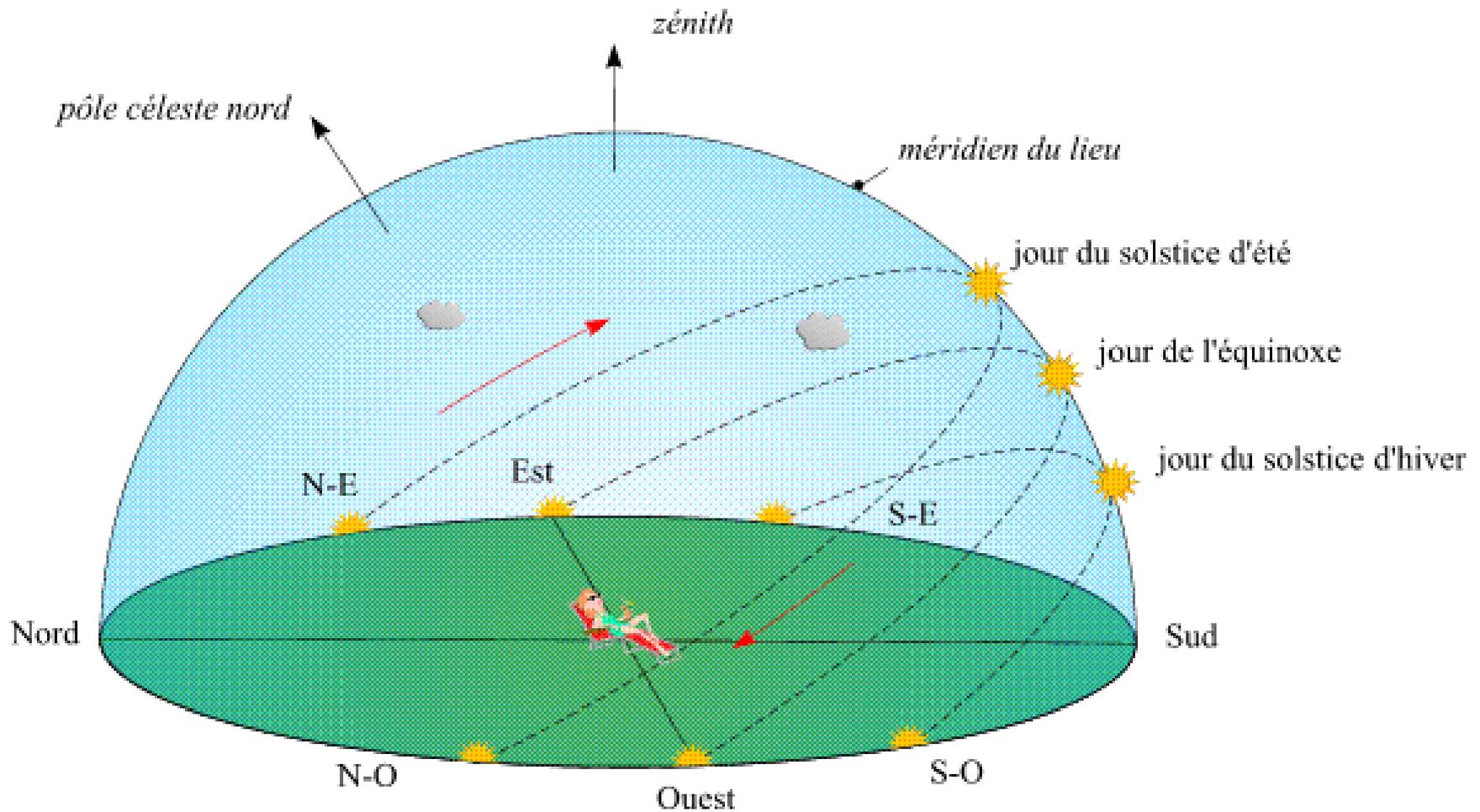
- de se repérer sur Terre, de se repérer dans le ciel
- de comprendre le mouvement des astres dans le système solaire et dans l'univers
- de tester nos modèles et nos représentations de l'univers en surveillant les mouvements des astres



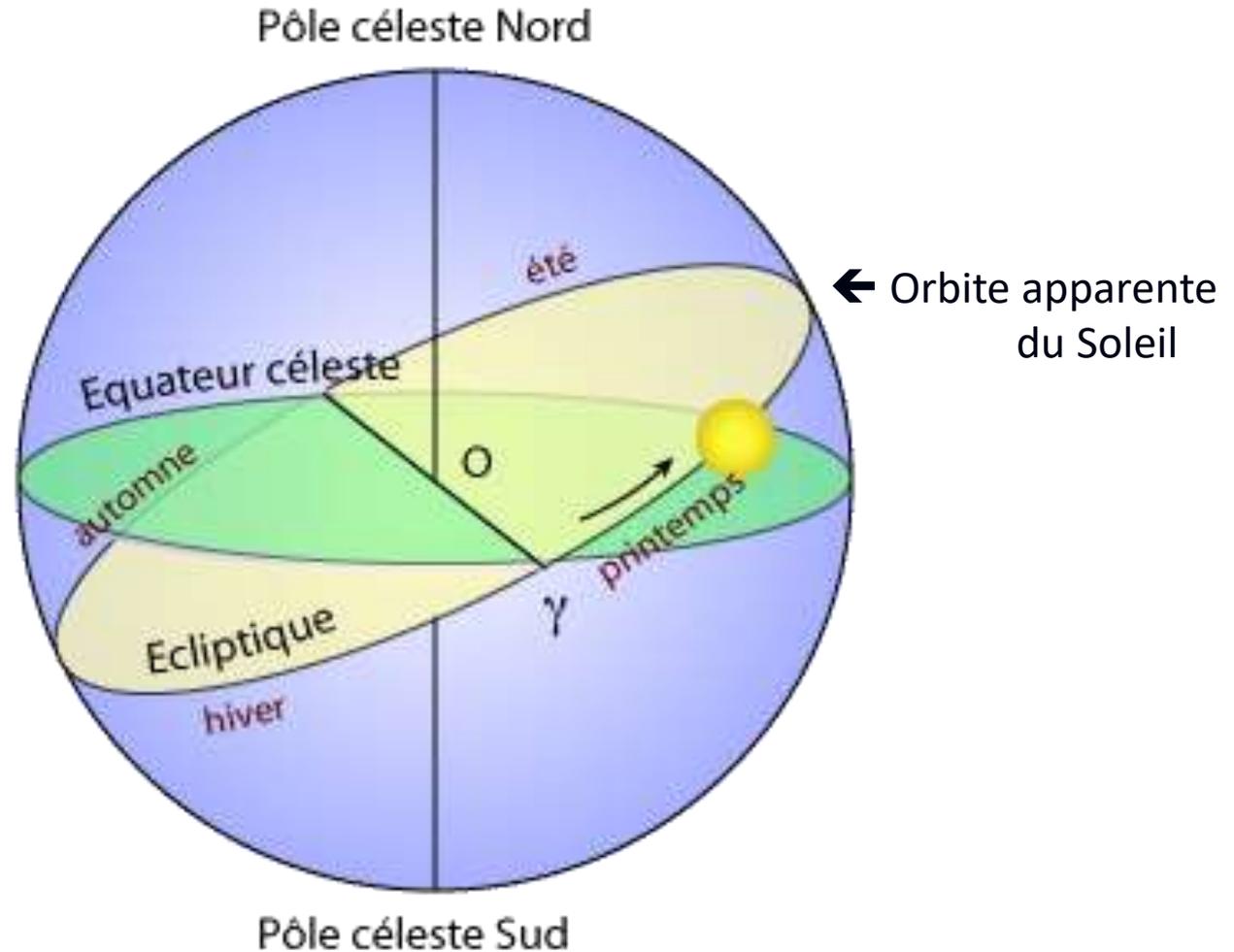
Un système pour se repérer



Le mouvement apparent du Soleil et des étoiles

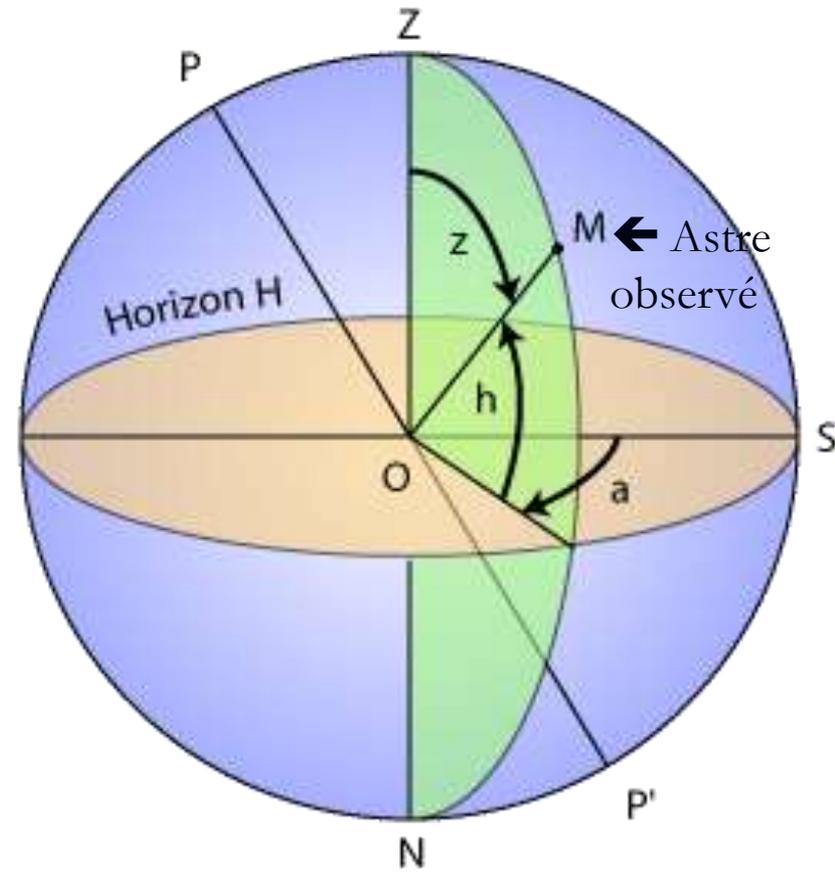
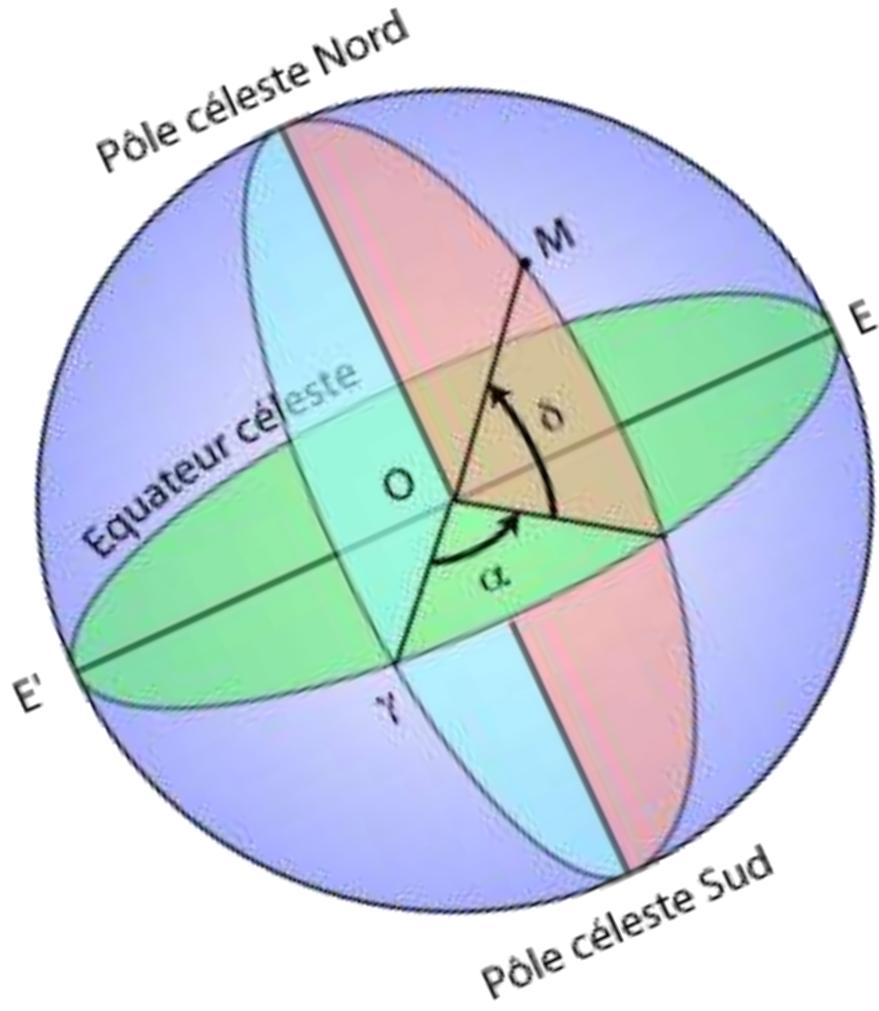


Les repères: trouver des origines

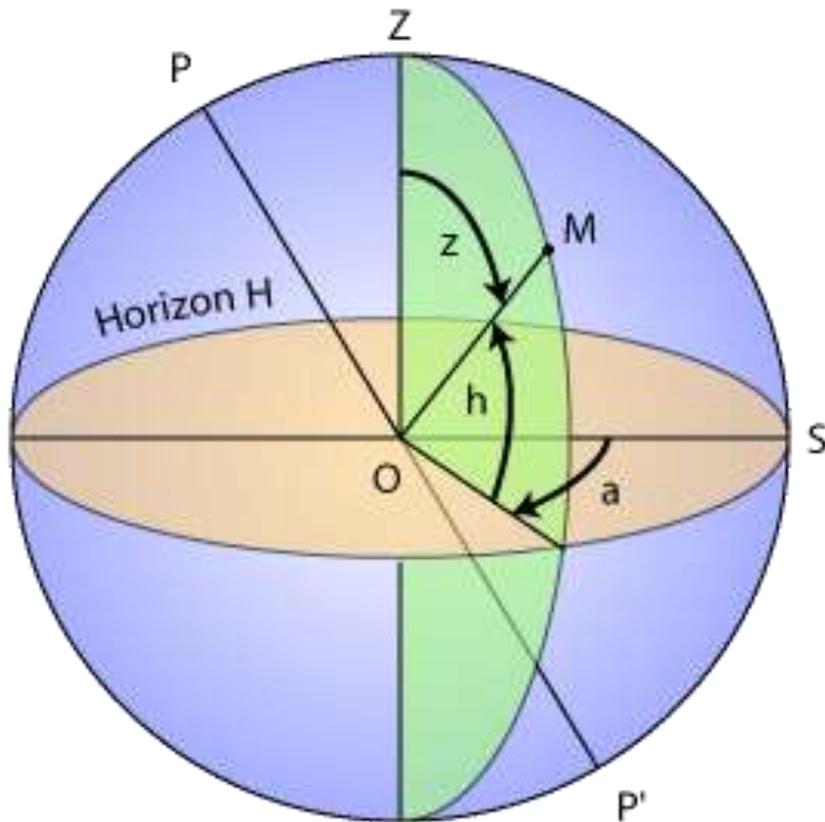


- Le point vernal est l'origine des ascensions droites.

Un système commun pour tous



Le principe de l'instrument méridien



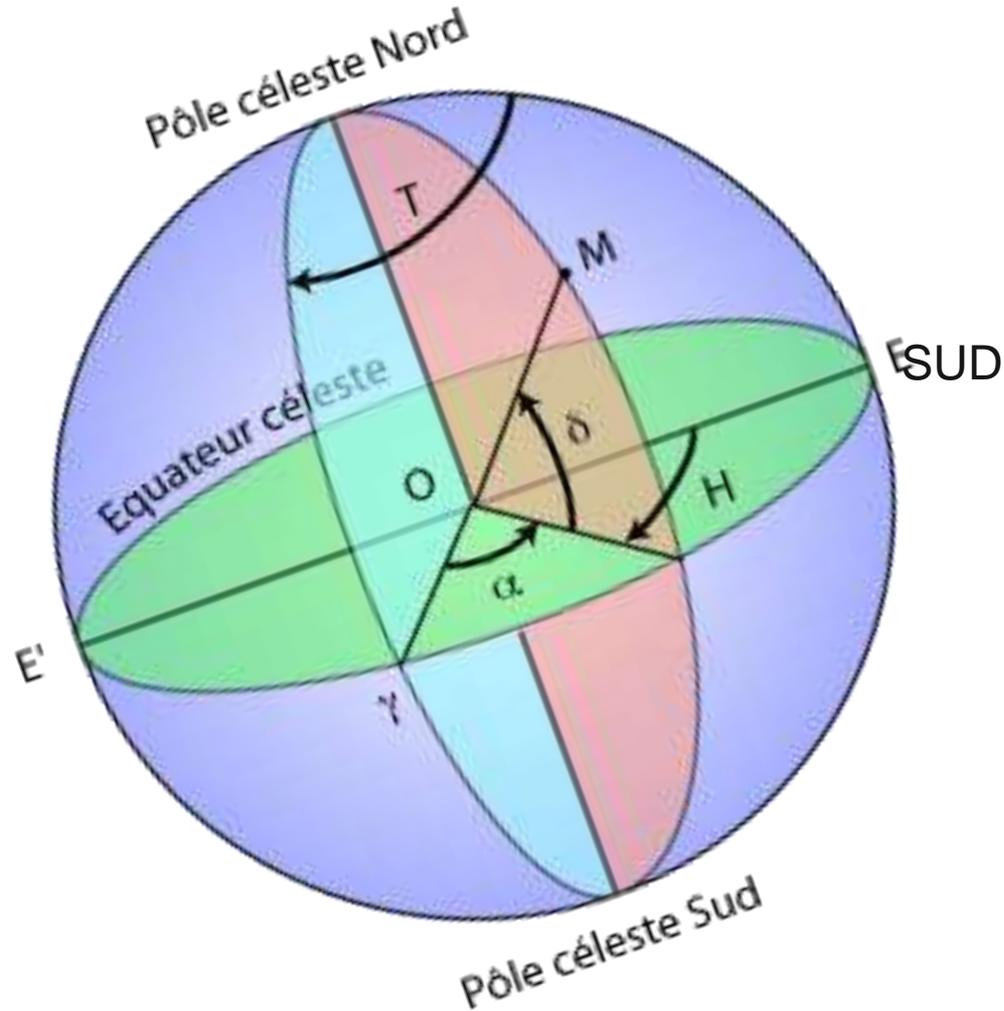
La sphère équatoriale locale

L'astre M se déplace sur la sphère céleste du fait de la rotation de la Terre. Donc a n'est pas constant mais augmente avec cette rotation.

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 »

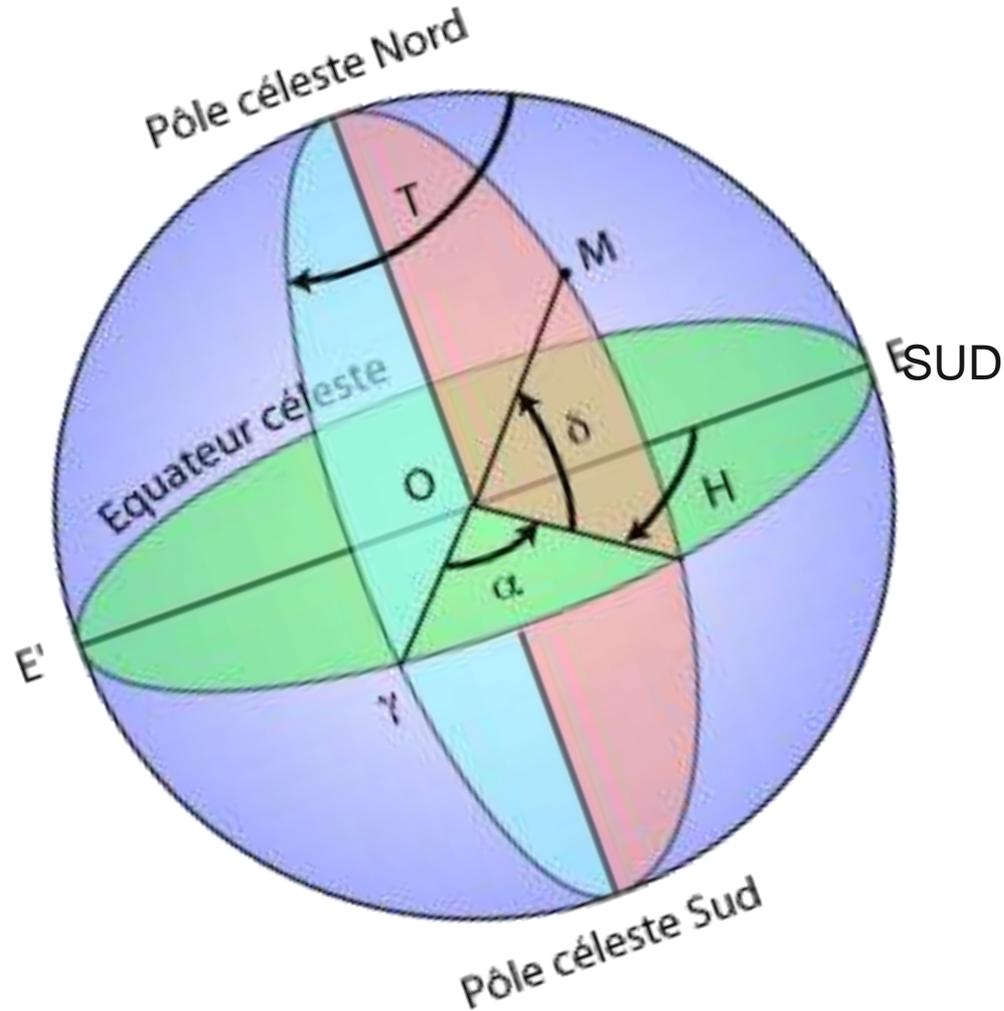
Sphère équatoriale locale



T temps sidéral local:

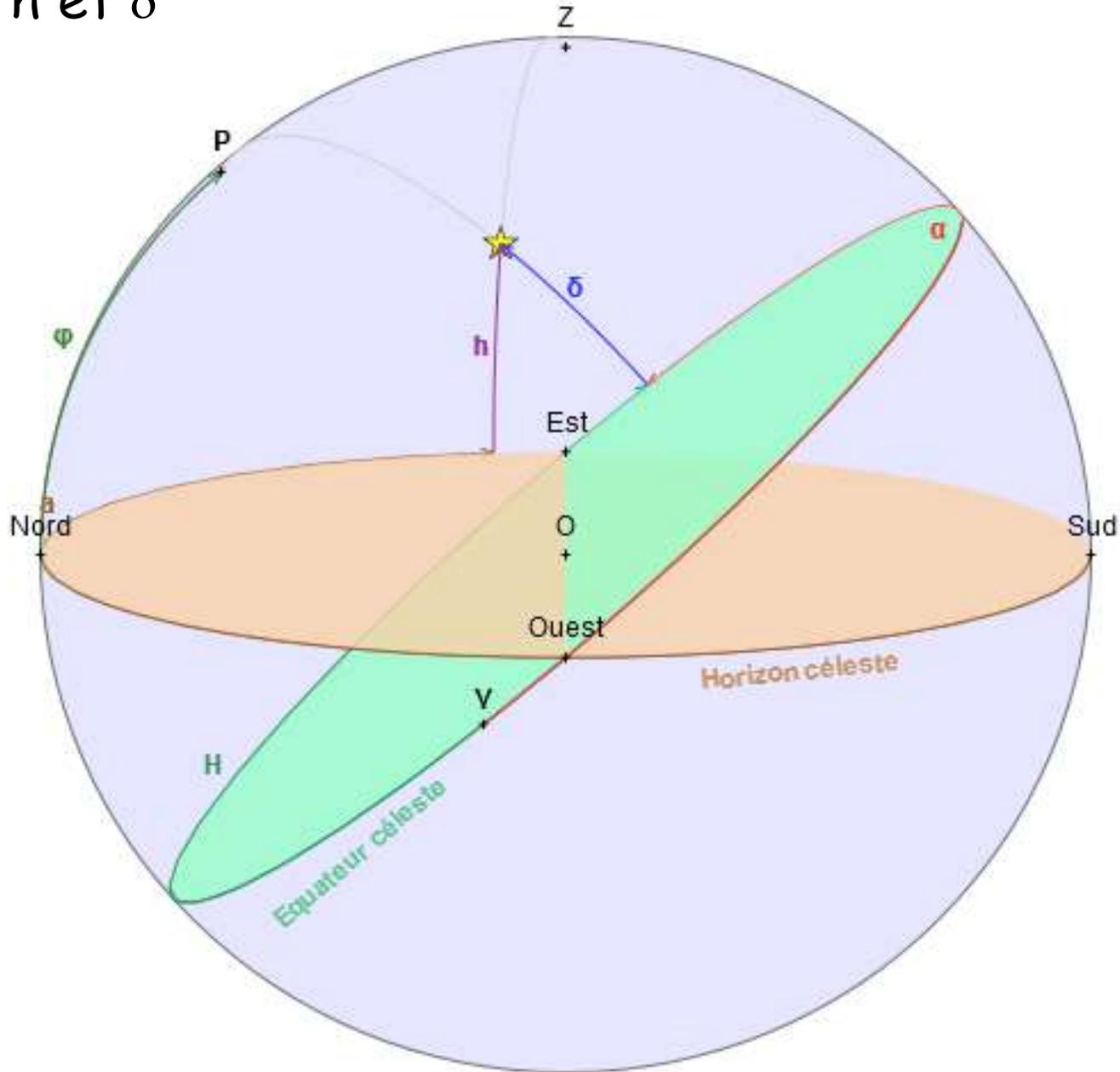
donne la position du point vernal γ par rapport à la direction du Sud
et varie au cours du temps du fait de la rotation de la Terre

Sphère équatoriale locale

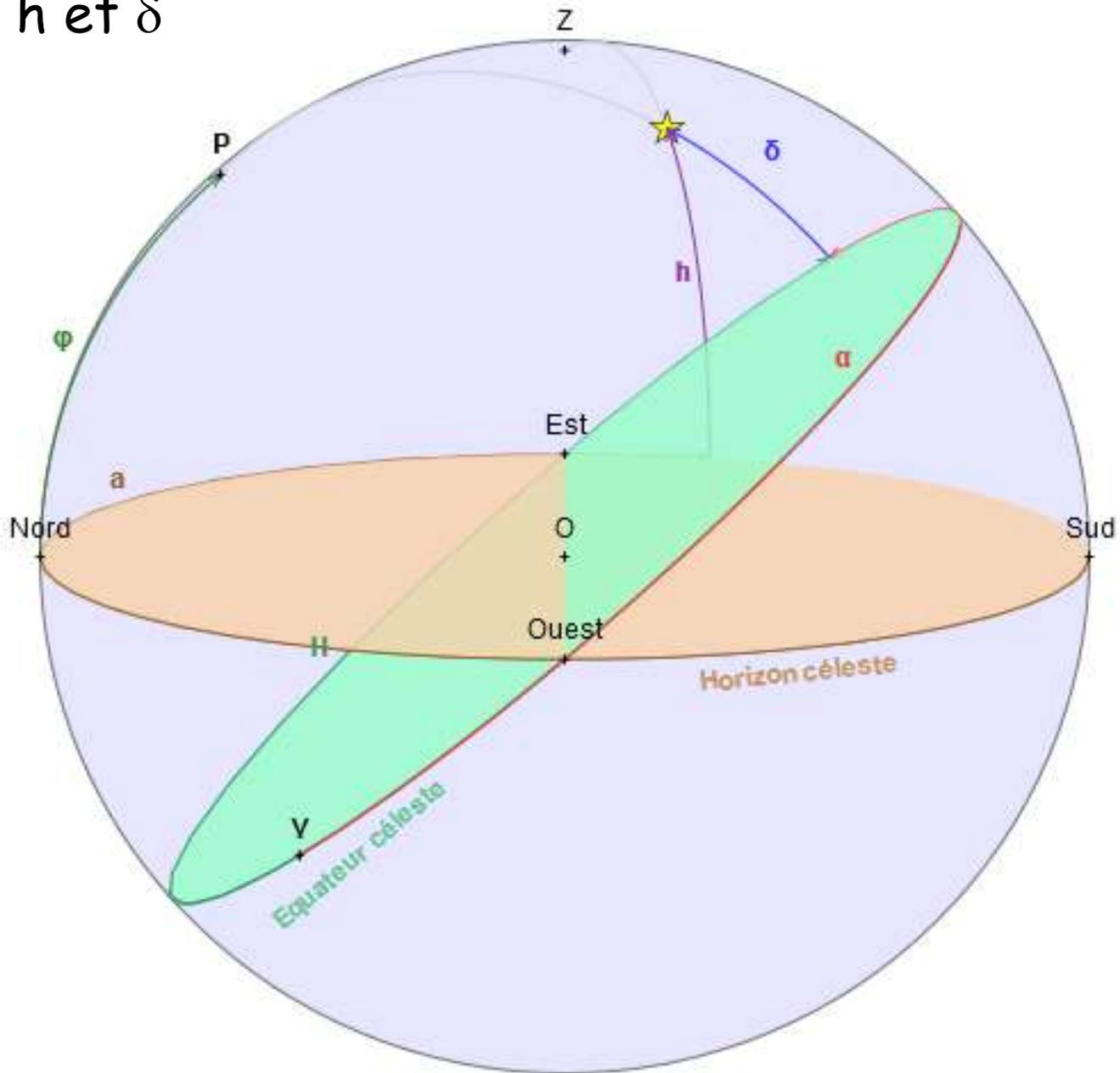


H (angle horaire) et T (temps sidéral local ou angle horaire du point γ)
varient au cours du temps **$H = T - \alpha$**

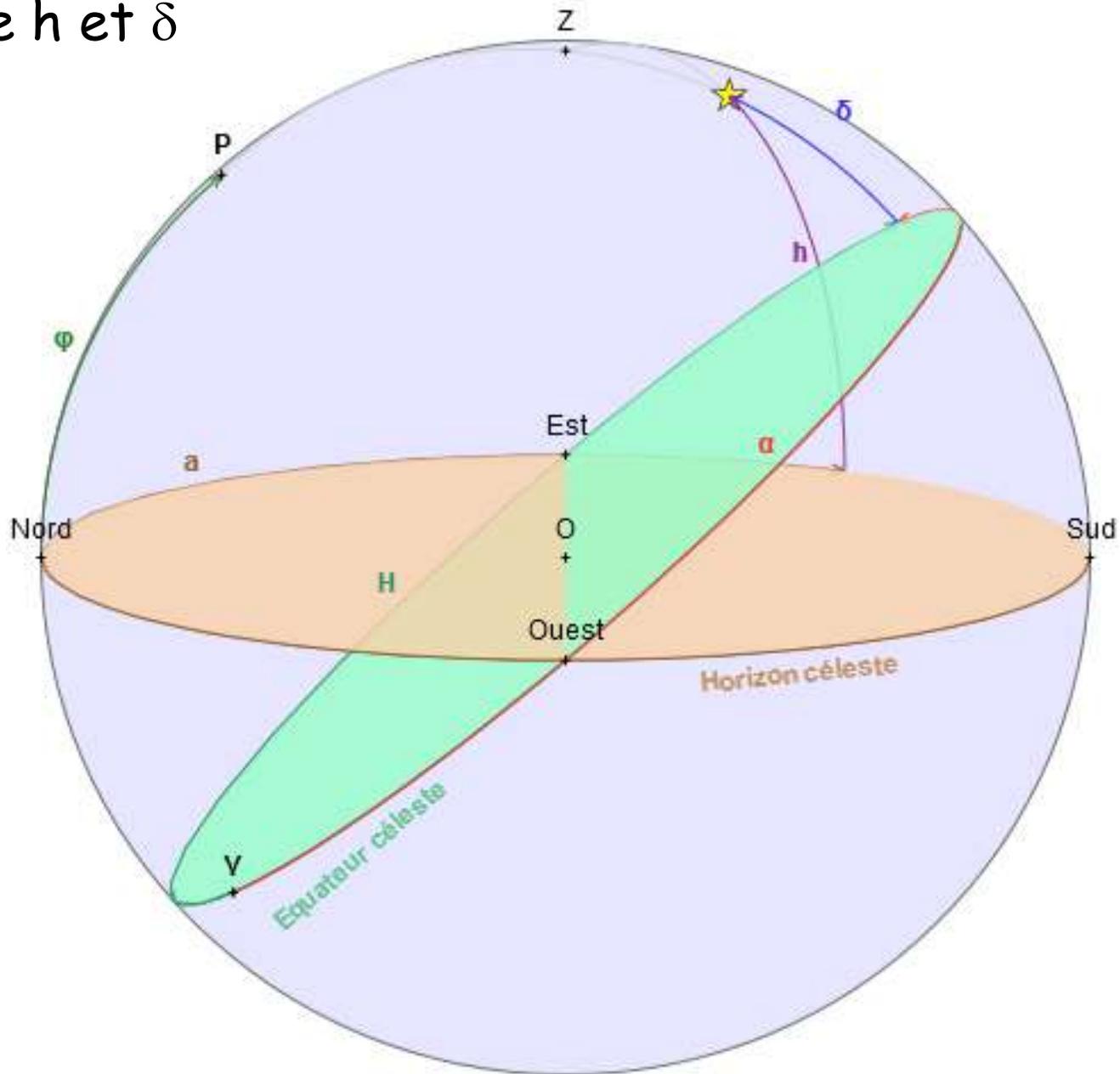
Observons la progression d'un astre dans le ciel et voyons le lien entre h et δ



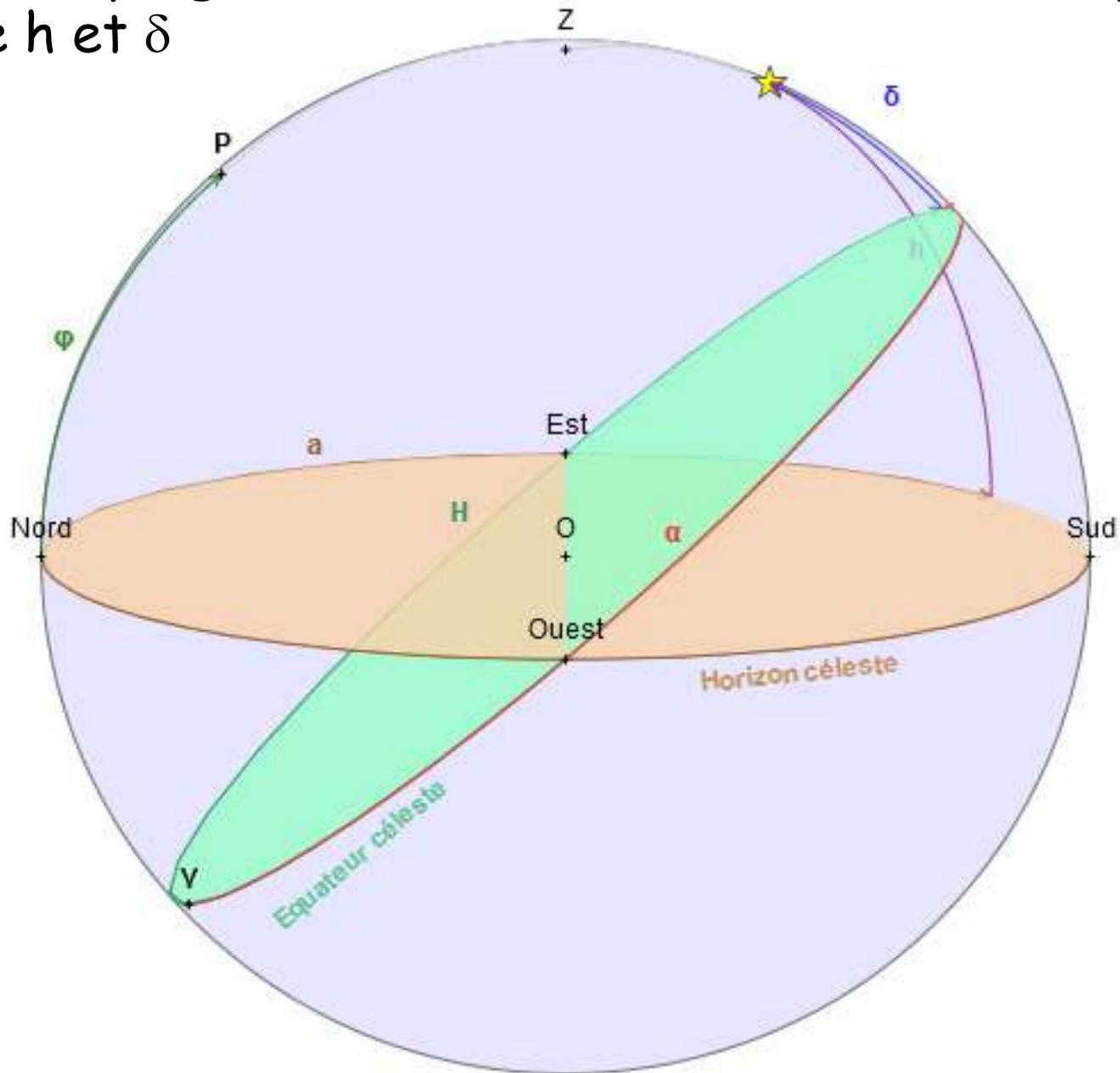
Observons la progression d'un astre dans le ciel et voyons le lien entre h et δ



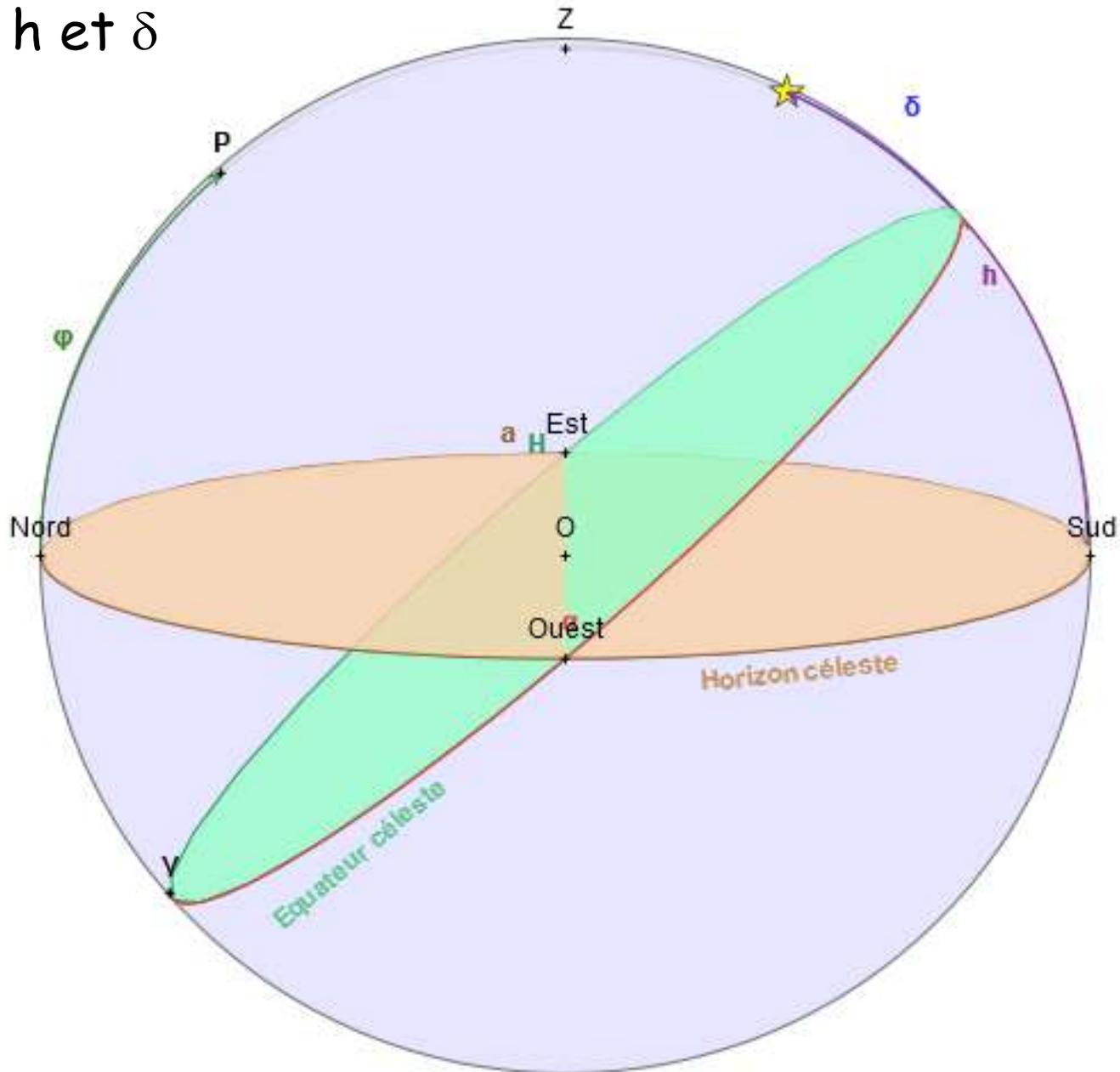
Observons la progression d'un astre dans le ciel et voyons le lien entre h et δ



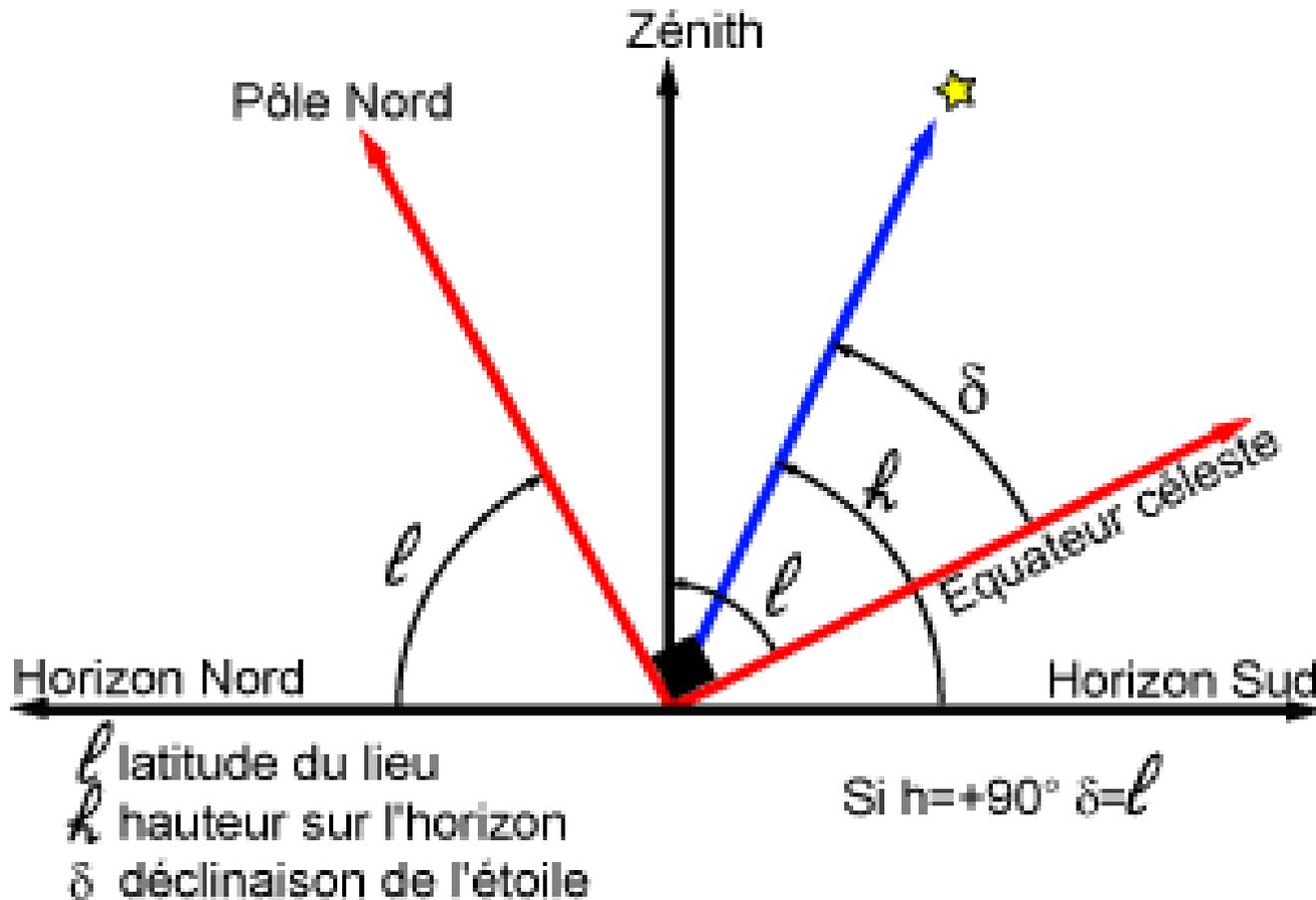
Observons la progression d'un astre dans le ciel et voyons le lien entre h et δ



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



Utiliser une configuration particulière des astres dans le plan méridien Nord-Sud

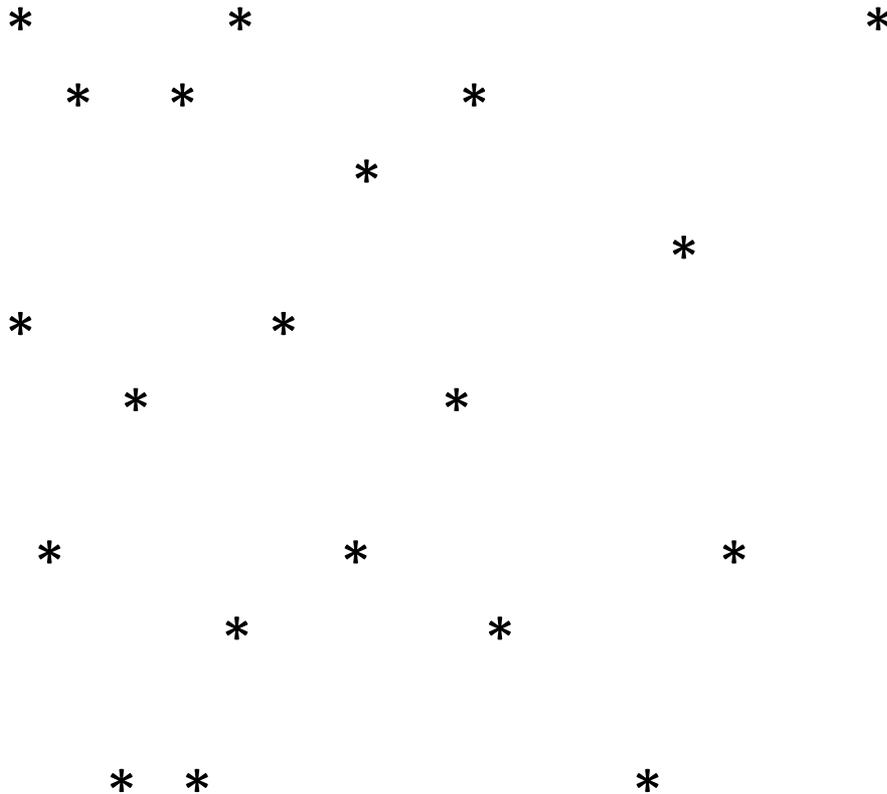


- Mesurer la hauteur h au dessus de l'horizon: $\delta = h - 90^\circ + \ell$
- Noter l'instant du passage: $H = \text{TSL} - \alpha \rightarrow \alpha = \text{TSL}$

L'observation

- On mesure la hauteur h de l'objet
 - déclinaison $\delta = h - 90^\circ + \textit{latitude du lieu}$
- On note l'instant de passage au méridien (vérifier que la cible est bien centrée et que le méridien est au centre)
 - ascension droite = temps sidéral local = temps sidéral de Greenwich à 0h + heure en UT convertie en TS + *longitude du lieu*

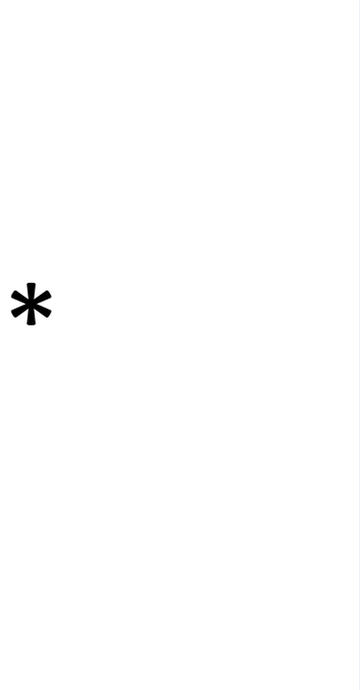
L'observation du temps de passage



← On pointe sur la hauteur de l'étoile à mesurer

→ le ciel défile →

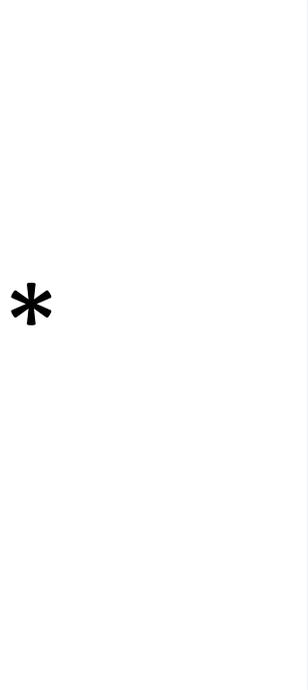
L'observation du temps de passage



*

On note l'instant du passage au méridien,
concrétisé par une ligne (on peut utiliser plus de
lignes pour plus de mesures et plus de précision)

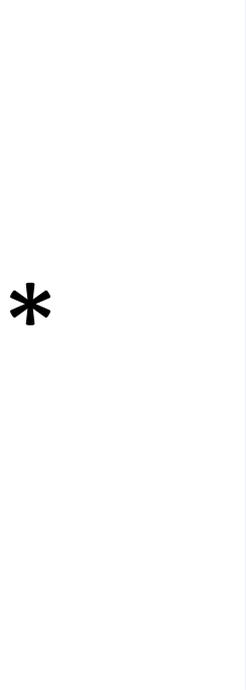
L'observation du temps de passage



*

On note l'instant du passage au méridien,
concrétisé par une ligne (on peut utiliser plus de
lignes pour plus de mesures et plus de précision)

L'observation du temps de passage



*

On note l'instant du passage au méridien,
concrétisé par une ligne (on peut utiliser plus de
lignes pour plus de mesures et plus de précision)

L'observation du temps de passage



*

On note l'instant du passage au méridien,
concrétisé par une ligne (on peut utiliser plus de
lignes pour plus de mesures et plus de précision)

L'observation du temps de passage



A vertical blue line is drawn on the page. To its left, centered vertically, is a black asterisk (*).

On note l'instant du passage au méridien,
concrétisé par une ligne (on peut utiliser plus de
lignes pour plus de mesures et plus de précision)

L'observation du temps de passage



*

On note l'instant du passage au méridien,
concrétisé par une ligne (on peut utiliser plus de
lignes pour plus de mesures et plus de précision)

L'observation du temps de passage



On note l'instant du passage au méridien,
concrétisé par une ligne (on peut utiliser plus de
lignes pour plus de mesures et plus de précision)

L'observation du temps de passage



On note l'instant du passage au méridien,
concrétisé par une ligne (on peut utiliser plus de
lignes pour plus de mesures et plus de précision)

L'observation du temps de passage

- On note l'instant de passage au méridien
→ ascension droite = temps sidéral local = temps sidéral de Greenwich à 0h + heure en UT
convertie en TS + *longitude du lieu*
- On dispose d'une horloge en temps sidéral local pour éviter les calculs

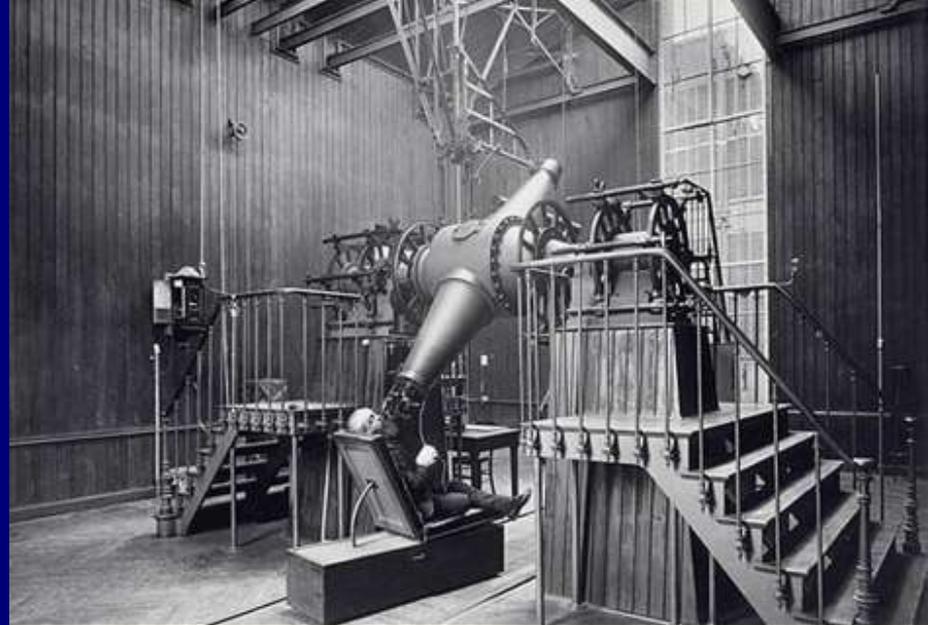
Les instruments méridiens

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



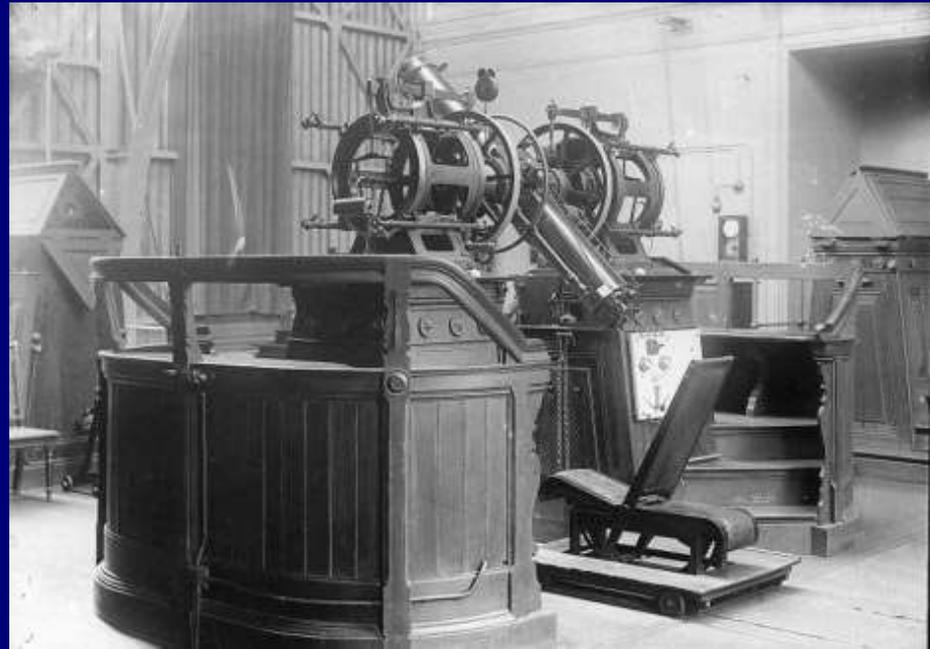
Besançon ↑

Abbadia ↓

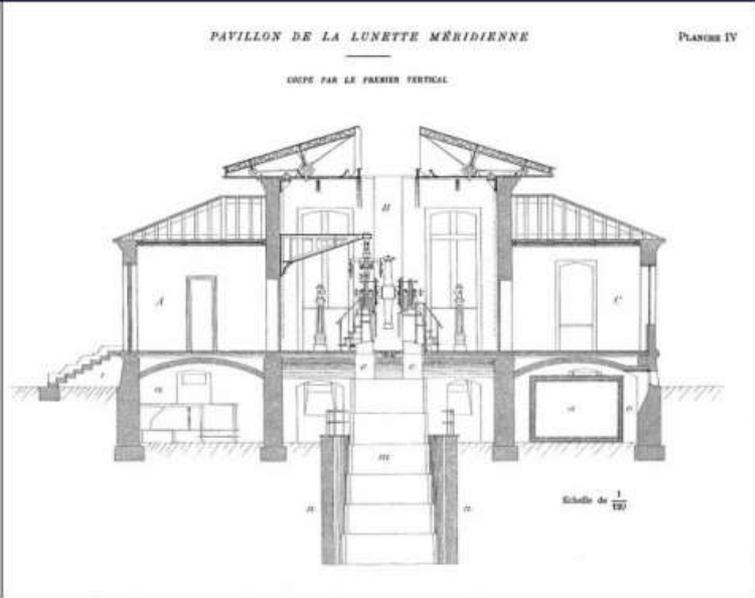


Nice ↑

Strasbourg ↓



Les bâtiments associés



Les instruments méridiens qui ont fonctionné jusqu'en 2018

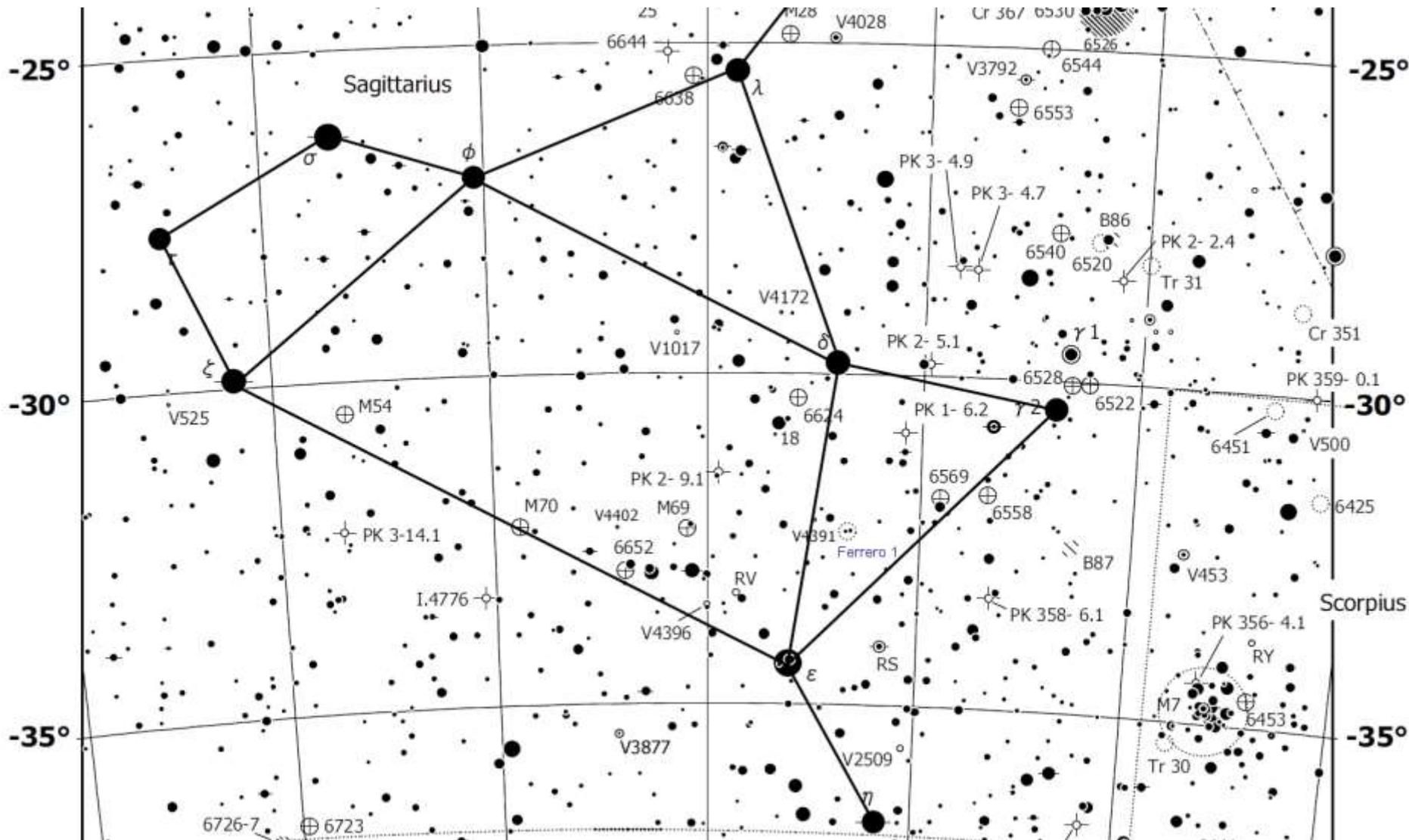


Les lunettes méridiennes de Bordeaux et de Flagstaff observaient le système solaire pour les besoins de la navigation spatiale

Les instruments méridiens

- Ces instruments ont servi à construire les premiers catalogues d'étoiles de référence
- La photographie a pris le relais
- On a alors procédé par rattachement des astres inconnus aux étoiles de référence connues.

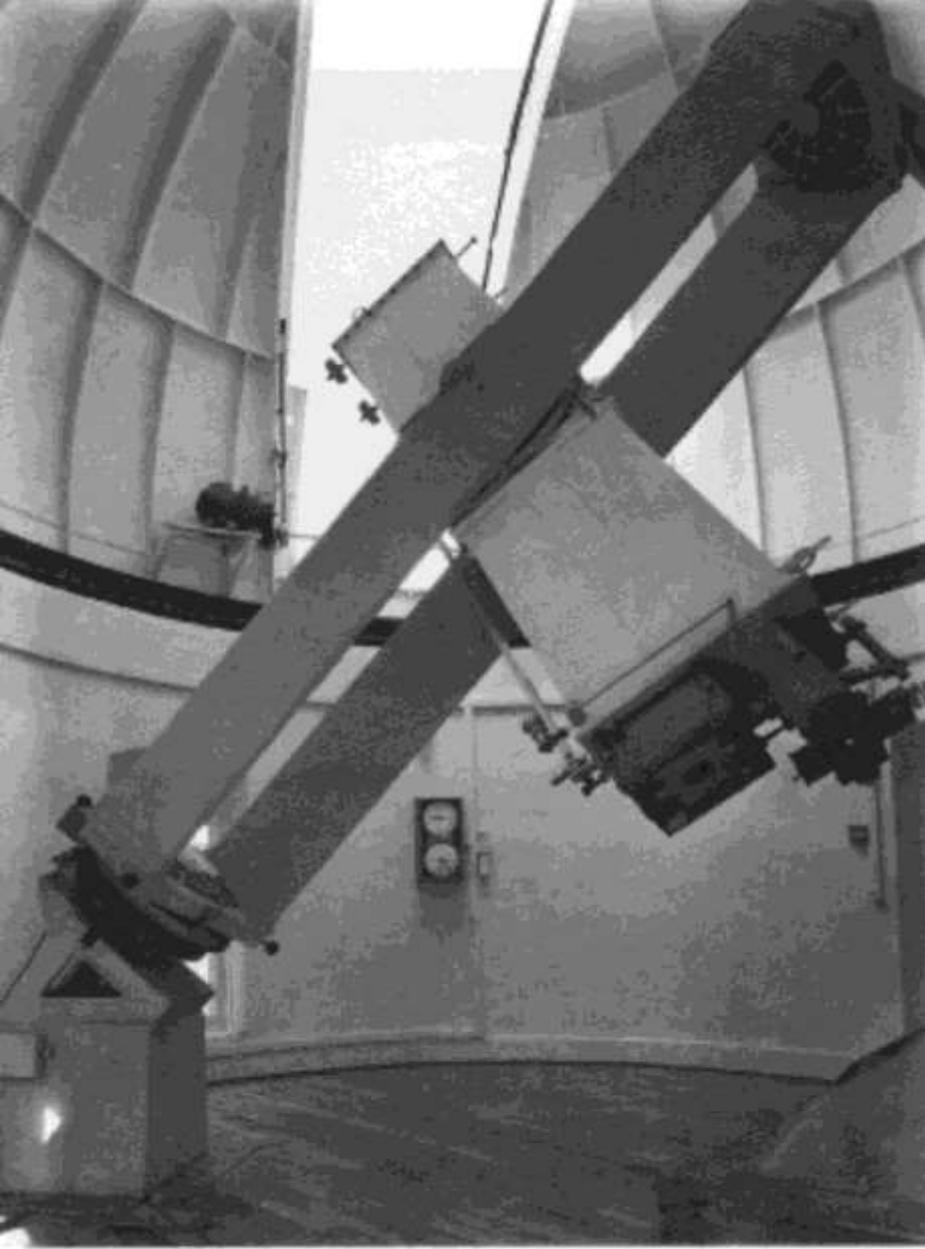
Une carte du ciel pour aider l'observateur



N°	NOM de l'étoile	GRANDEUR	SPECTRE	ASCENSION DROITE		PRÉCES- SION ANNUELLE	MOUVEMENT PROPRE	DECLINAISON	PRÉCES- SION ANNUELLE	MOUVEMENT PROPRE
				h m s	s					
2850	1 Lézard	4,58	Ko	22 20 31,774	+ 2,3577	+0,0007	-31 50 34,33	+18,483	+0,198	
2860	1 Verseau (1)	3,79	F2	22 24 52,140	+ 2,0796	+0,0078	- 0 24 54,67	+18,354	+0,003	
2864	4 Céphée	(12)	G6	22 26 18,503	+ 2,2208	+0,0016	+58 1 14,57	+18,395	+0,001	
2875	6 Verseau	4,33	B8	22 31 24,003	+ 2,0773	+0,0057	- 0 30 51,23	+18,565	+0,052	
2885	1 Poisson austr.	4,23	B8	22 36 23,077	+ 2,3503	+0,0008	-27 26 45,24	+18,723	+0,031	
2887	7 Pégase	3,64	B8	22 37 37,371	+ 2,0803	+0,0034	-10 25 44,14	+18,762	+0,044	
2890	3 Grue	3,26	M1	22 38 4,603	+ 2,5794	+0,0133	-47 17 16,49	+18,777	+0,026	
2898	5 Octant (*)	4,34	F6	22 38 16,768	+ 2,3043	+0,0030	-51 47 9,68	+18,781	+0,002	
2903	6 Pégase	3,19	G6	22 39 23,493	+ 2,2680	+0,0010	+20 49 4,71	+18,818	+0,022	
2911	7 Verseau	4,24	K5	22 45 34,029	+ 2,1792	+0,0006	-13 59 57,67	+18,990	+0,023	
2910	3058 Bradley (*)	4,97	Ko	22 47 49,093	+ 2,1785	+0,0077	-82 44 43,31	+19,050	+0,054	
2912	4 Verseau	3,84	M2	22 48 13,890	+ 2,1363	+0,0003	- 7 59 27,63	+19,056	+0,003	
2916	8 Verseau	3,59	A1	22 50 33,921	+ 2,1886	+0,0034	-16 13 50,49	+19,132	+0,019	
2921	2 Pois. austr. (*)	3,59	A3	22 53 23,960	+ 2,2041	+0,0030	-30 1 50,80	+19,169	+0,179	
2925	3058 Bradley (*)	4,96	Ko	22 55 5,028	+ 2,1448	+0,0041	-83 56 1,23	+19,178	+0,054	
2936	3 Pégase	3,64	M2	23 0 2,343	+ 2,2840	+0,0046	+27 39 53,20	+19,264	+0,119	
2937	2 Pégase (*)	3,57	A6	23 0 55,123	+ 2,2838	+0,0050	+14 27 26,15	+19,282	+0,019	
2947	05 Verseau	3,80	K5	23 5 20,584	+ 2,1971	+0,0033	-21 35 26,15	+19,288	+0,011	
2952	1 Grue	4,29	Ko	23 6 0,334	+ 2,3091	+0,0031	-45 29 50,95	+19,390	+0,011	
2964	7 Poissons	3,85	Ko	23 13 10,387	+ 2,2691	+0,0003	+ 2 51 40,82	+19,407	+0,019	
2966	1 Sculpteur	4,50	Ko	23 14 40,117	+ 2,1038	+0,0003	-32 57 6,37	+19,502	+0,003	
2971	2 Octant (*)	3,56	Ko	23 17 0,076	+ 2,2850	+0,0089	-87 34 20,21	+19,595	+0,003	
2975	6 Verseau	4,20	Ko	23 18 55,676	+ 2,1622	+0,0009	-20 31 16,27	+19,721	+0,009	
2980	4 Pégase	4,57	G6	23 21 22,014	+ 2,2781	+0,0134	+22 58 37,68	+19,794	+0,010	
2984	2 Poissons	4,64	A19	23 22 59,110	+ 2,0798	+0,0006	+ 0 50 2,20	+19,794	+0,003	
2995	821 E.B.A.C. (*)	5,68	F6	23 27 42,388	+ 2,3231	+0,0045	+86 52 28,10	+19,820	+0,010	
2999	3 Sculpteur	4,46	B9	23 28 50,790	+ 2,2134	+0,0071	-28 14 40,33	+19,820	+0,006	
3003	7 Pégase	5,21	K2	23 30 7,739	+ 2,0688	+0,0025	+30 54 1,04	+19,874	+0,009	
3015	1 Andromède	4,28	B8	23 34 21,284	+ 2,0743	+0,0025	+42 30 30,07	+19,918	+0,000	
3017	1 Poissons	4,28	G6	23 35 59,330	+ 2,0690	+0,0016	+ 5 12 31,76	+19,935	+0,036	
3019	1 Céphée	3,43	Ko	23 36 10,314	+ 2,1634	+0,0073	+27 12 9,38	+19,950	+0,107	
3021	2 Andromède	4,33	A6	23 36 36,696	+ 2,1941	+0,0078	+43 51 26,63	+19,950	+0,001	
3025	02 Verseau	4,52	A9	23 38 43,818	+ 2,2060	+0,0043	-14 58 11,59	+19,959	+0,003	
3034	3 Sculpteur	4,64	A9	23 41 55,009	+ 2,1207	+0,0009	-28 33 23,67	+20,001	+0,123	
3041	7 Octant (*)	5,16	G5	23 47 38,026	+ 2,1663	+0,0076	-82 26 48,40	+20,010	+0,019	
3043	2 Pégase	5,23	M2	23 48 34,073	+ 2,2001	+0,0015	+18 41 31,28	+20,008	+0,039	
3045	2 Cassiopée	4,85	F89	23 50 31,615	+ 2,1976	+0,0035	+57 4 15,66	+20,028	+0,003	
3048	1 Céphée (*)	6,42	A6	23 52 48,202	+ 2,1489	+0,0096	+82 45 44,34	+20,055	+0,009	
3049	7 Octant (*)	5,68	Ko	23 53 21,819	+ 2,1706	+0,0191	-82 35 53,19	+20,080	+0,007	
3050	2 Pégase	4,75	M1	23 53 49,883	+ 2,2663	+0,0030	+24 44 47,71	+20,087	+0,004	
3057	06 Poissons	4,23	F5	23 55 21,376	+ 2,2696	+0,0003	+ 6 36 13,53	+20,091	+0,106	
3061	30 Poissons	4,96	M1	23 58 0,176	+ 2,0713	+0,0039	- 6 26 31,16	+20,094	+0,007	
3063	2 Baleine	5,74	A6	23 59 47,786	+ 2,0733	+0,0013	-17 43 53,63	+20,095	+0,013	

Un catalogue d'étoiles publiés par la Connaissance des temps en 1923 pour servir de référence

(1) Étoile double, pr. $\delta = 47^{\circ} 4,59$. (2) Var. sec. : $\alpha = -0^{\circ},60$; $\delta = +0^{\circ},31$. (3) Var. sec. : $\alpha = -0^{\circ},55$; $\delta = -0^{\circ},02$. (4) Fomalhaut. (5) Var. sec. : $\alpha = -0^{\circ},34$; $\delta = -0^{\circ},03$. (6) Markab. (7) Var. sec. : $\alpha = -0^{\circ},30$; $\delta = -0^{\circ},26$. (8) Var. sec. : $\alpha = -0^{\circ},60$; $\delta = -0^{\circ},01$. (9) Var. sec. : $\alpha = -0^{\circ},30$; $\delta = -0^{\circ},02$. (10) Var. sec. : $\alpha = +0^{\circ},19$; $\delta = 0^{\circ},00$. (11) Var. sec. : $\alpha = -0^{\circ},71$; $\delta = -0^{\circ},01$. (12) Variable : $M = 2,7$; $m = 4,9$.



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 projet « de la Carte du ciel »:

photographier l'ensemble du ciel

- un défi impossible au XIXème siècle
- mais réussi au XXème siècle (projet du Digitized Sky Survey) grâce au télescope de Schmidt

Le télescope de Schmidt: un grand champ



À gauche: Mont Palomar (ciel nord); à droite ESO La Silla (ciel sud)

Le « Digitized Sky Survey »

<https://archive.eso.org/dss/dss>

Les instruments méridiens ont continué à fonctionner jusqu'en 2018

- Ces instruments n'ont plus fonctionné par la mesure de la date du passage au méridien mais ont formé des images grâce au mode « TDI »
- L'instrument méridien ne suit pas les étoiles mais balaye le ciel

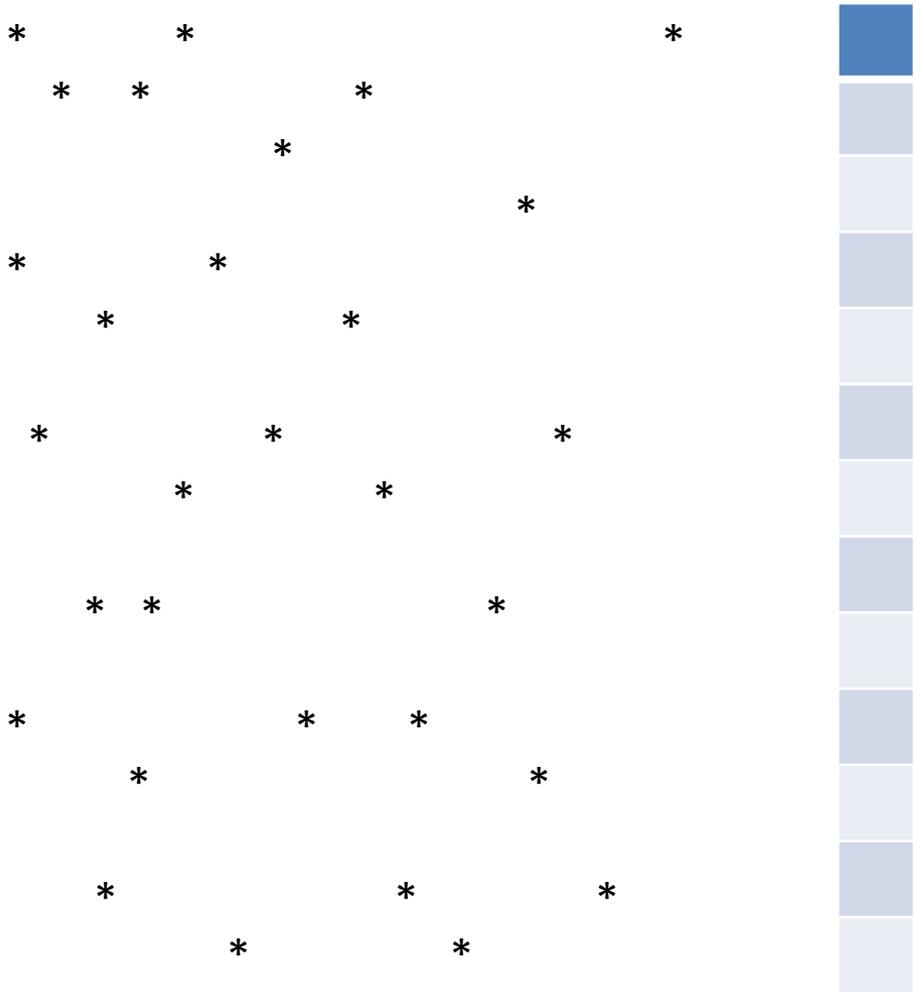
Le mode TDI (Time Delay and Integration)

avec cercle méridien ou « scanning » télescope ou
télescope à balayage

On reconstruit une image par colonne ou par tranche en laissant défiler le ciel (méridien) ou en balayant un grand cercle de la sphère céleste

- Cercles méridiens automatiques:
 - Observer le défilement des astres et non plus leur passage au méridien
- « Scanning telescope »:
 - Observer le long de grands cercles de la sphère céleste
- GAIA
 - Balayer le ciel depuis l'espace

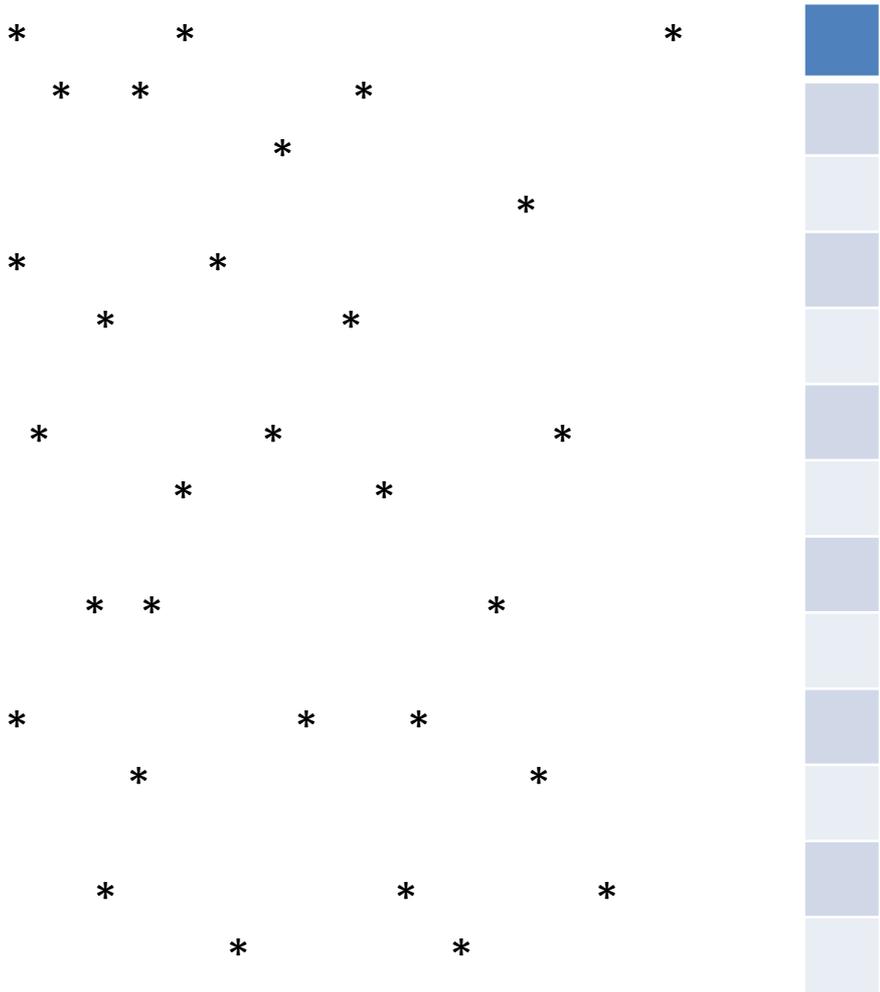
Le principe TDI: scanner le ciel



Lecture de la colonne de pixels à chaque fois que les étoiles ont avancé de la largeur de la colonne

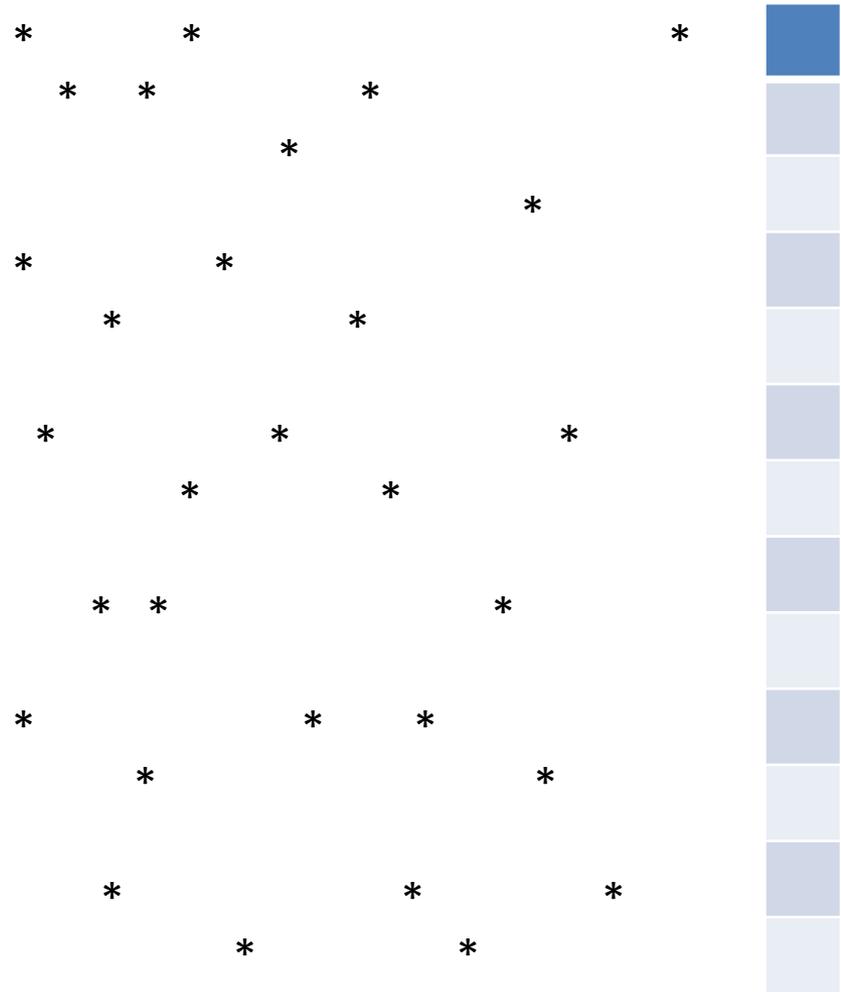
➔ le ciel défile ➔

Le principe TDI: scanner le ciel



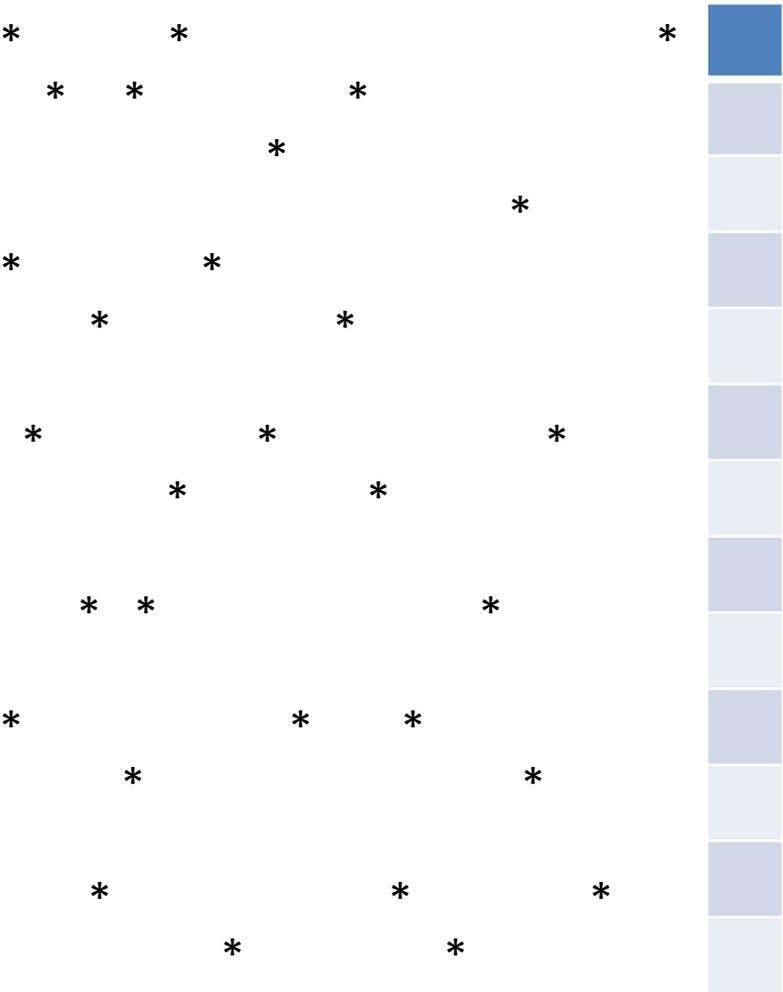
➔ le ciel défile ➔

Le principe TDI: scanner le ciel



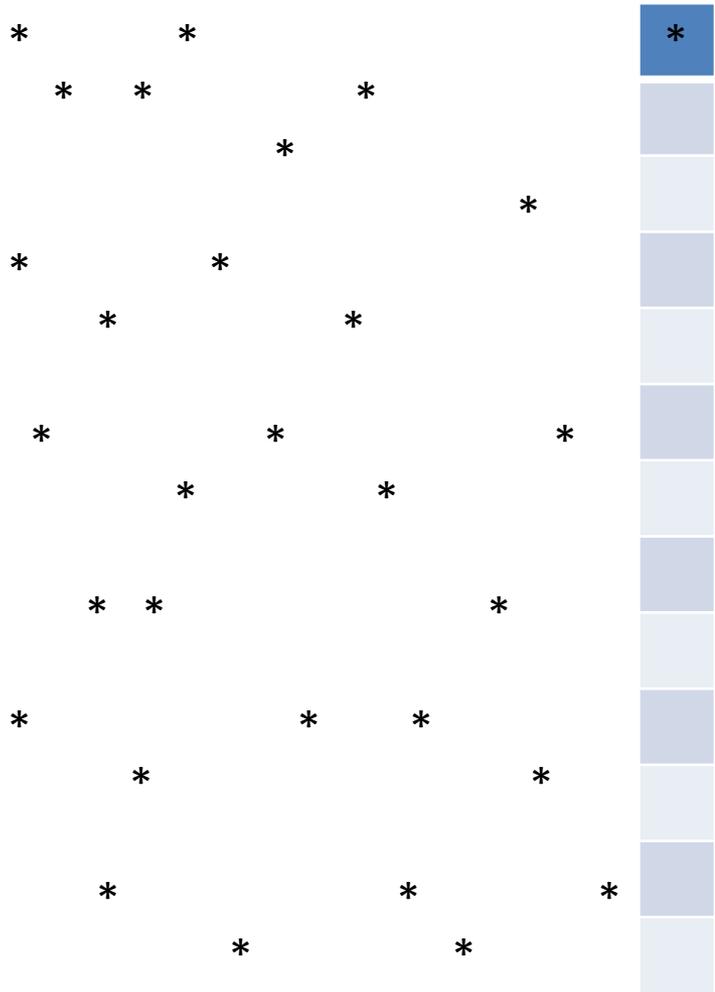
→ le ciel défile →

Le principe TDI: scanner le ciel



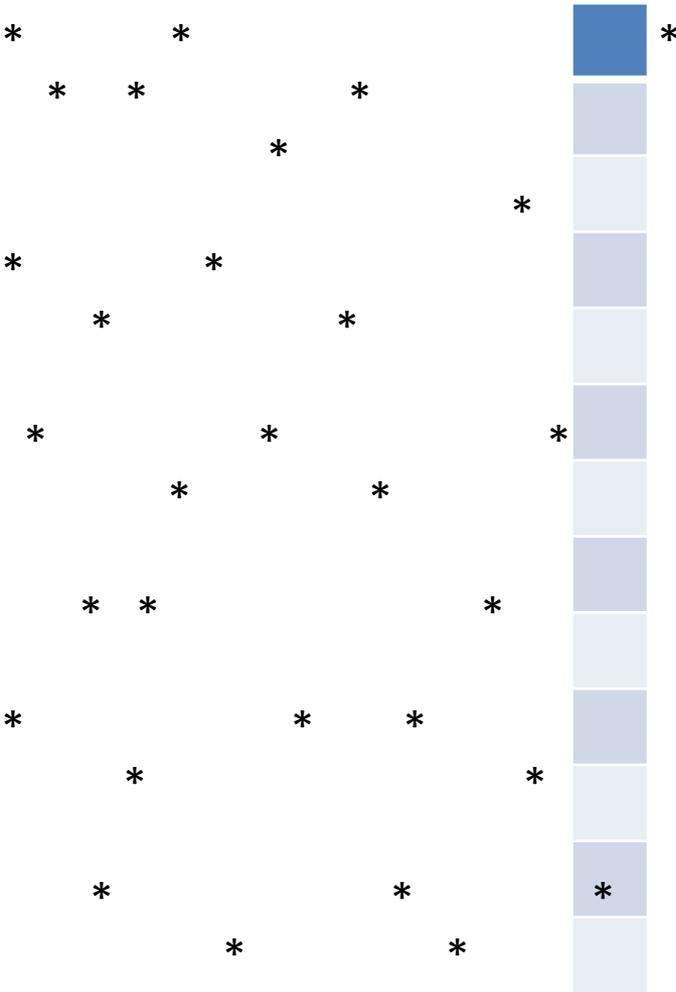
→ le ciel défile →

Le principe TDI: scanner le ciel



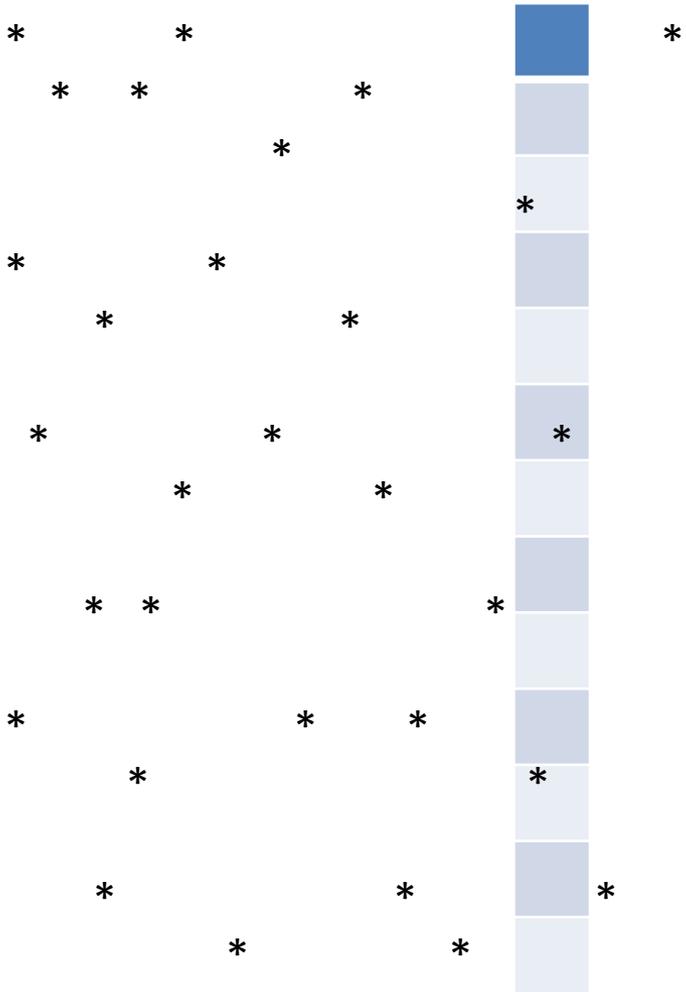
➔ le ciel défile ➔

Le principe TDI: scanner le ciel



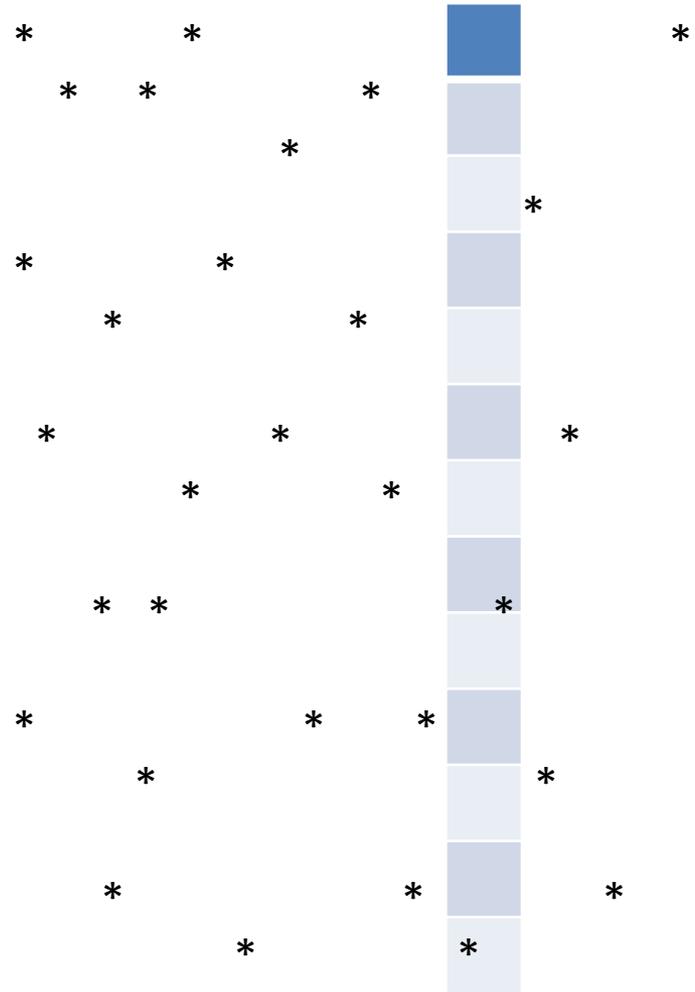
➔ le ciel défile ➔

Le principe TDI: scanner le ciel



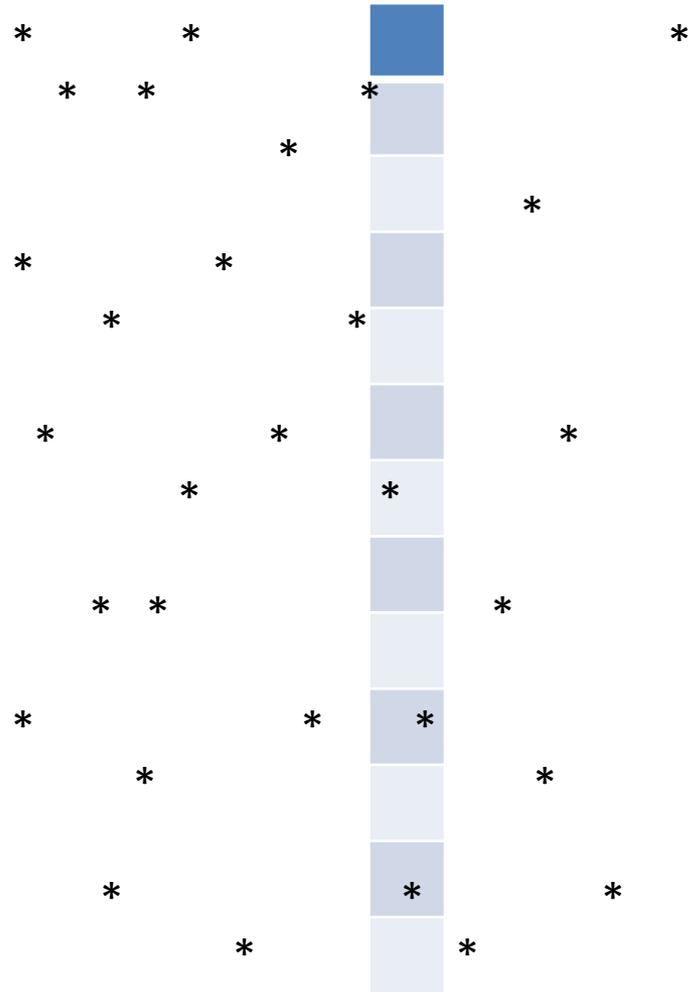
➔ le ciel défile ➔

Le principe TDI: scanner le ciel



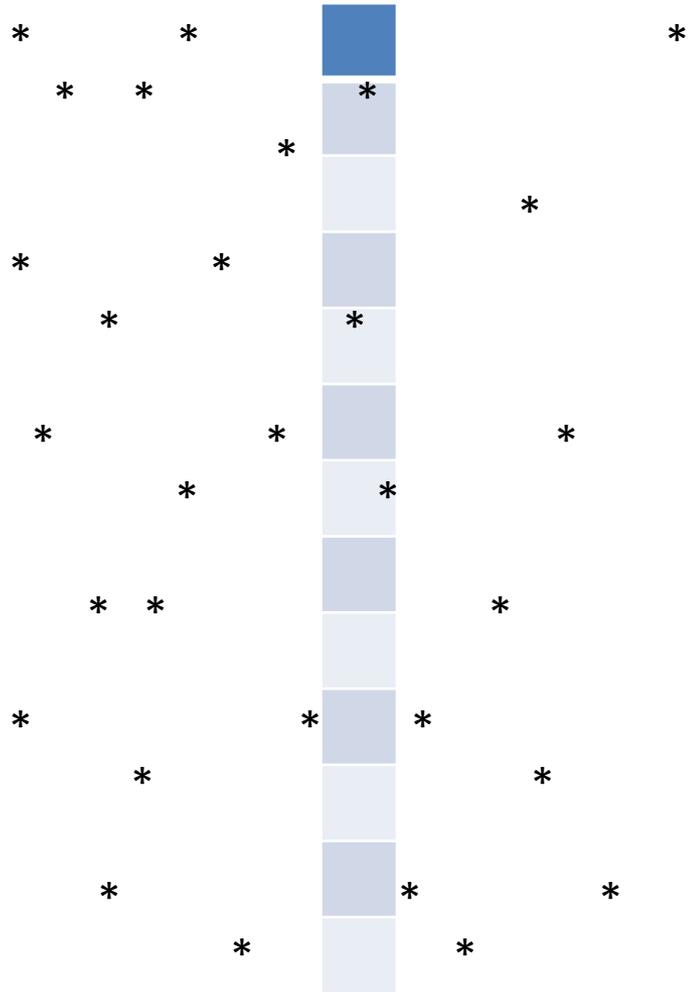
➔ le ciel défile ➔

Le principe TDI: scanner le ciel



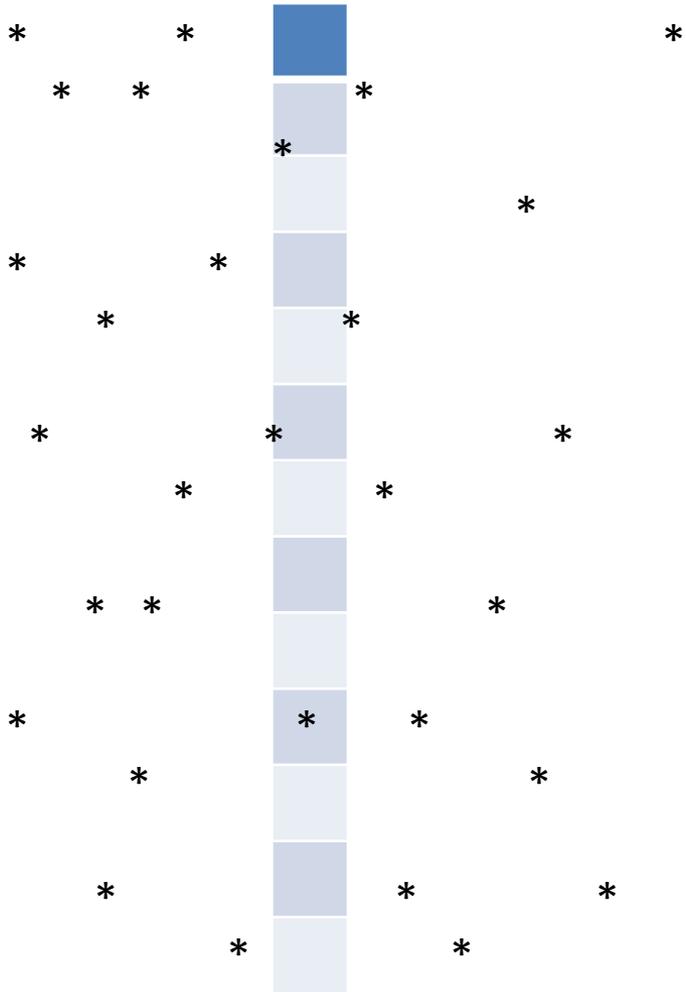
➔ le ciel défile ➔

Le principe TDI: scanner le ciel



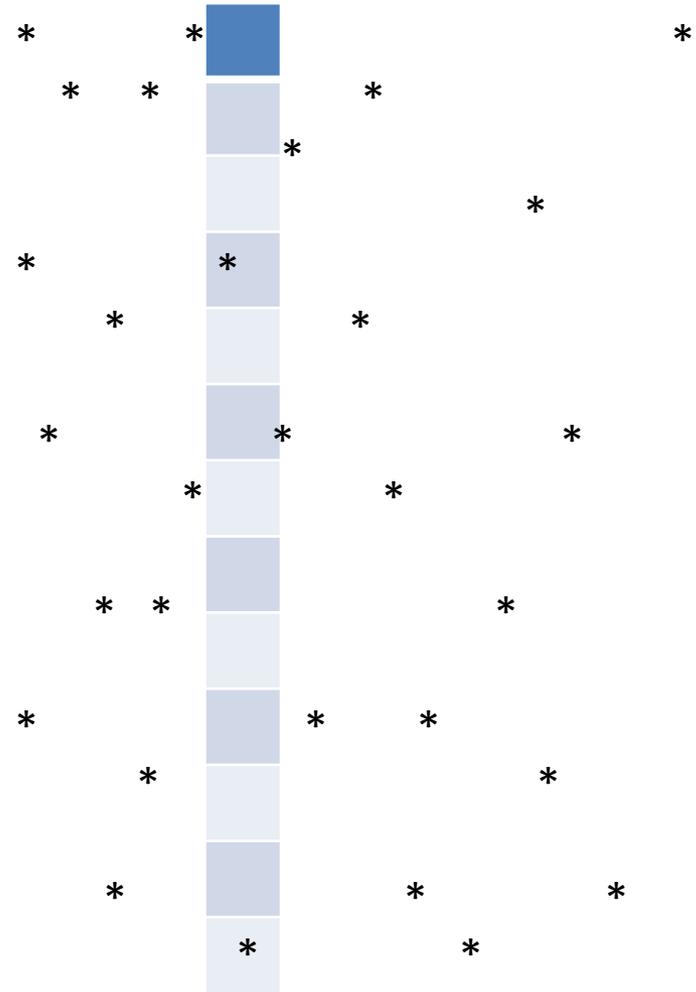
➔ le ciel défile ➔

Le principe TDI: scanner le ciel



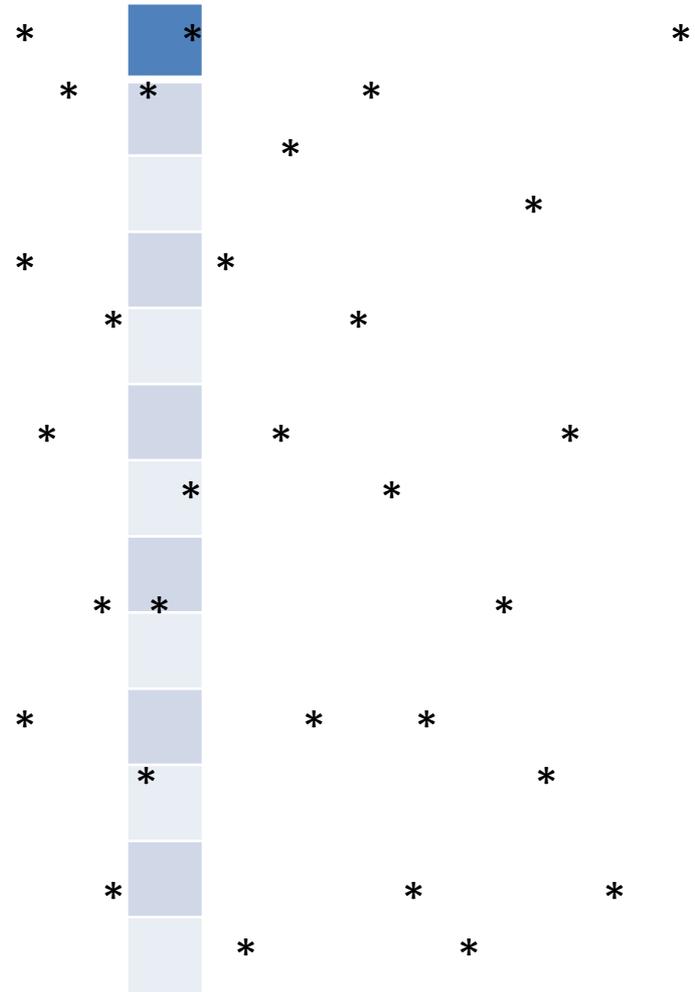
➔ le ciel défile ➔

Le principe TDI: scanner le ciel



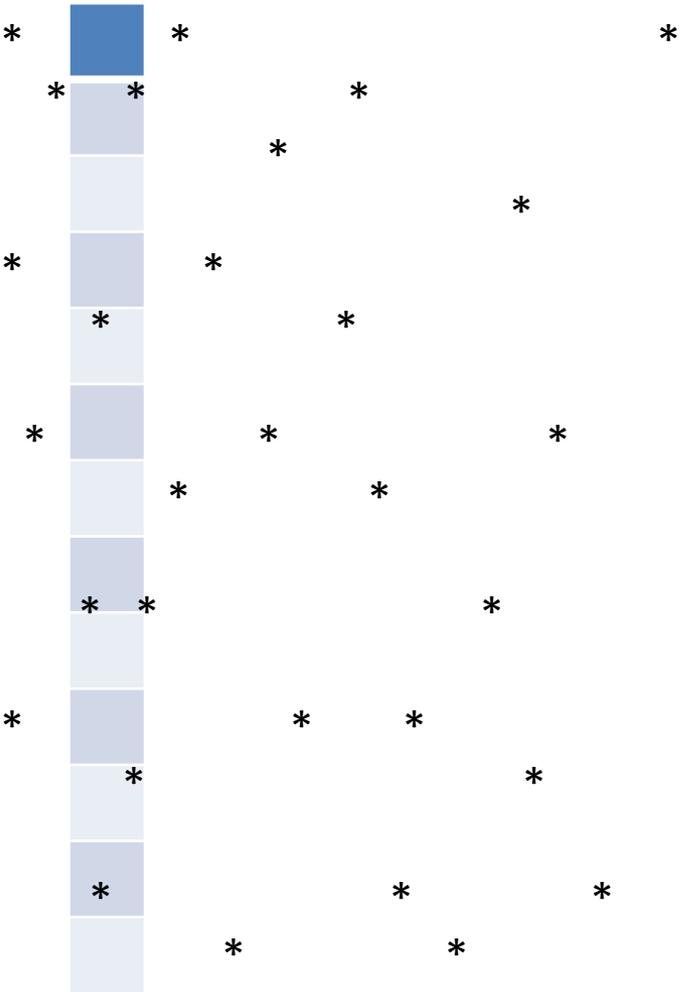
➔ le ciel défile ➔

Le principe TDI: scanner le ciel



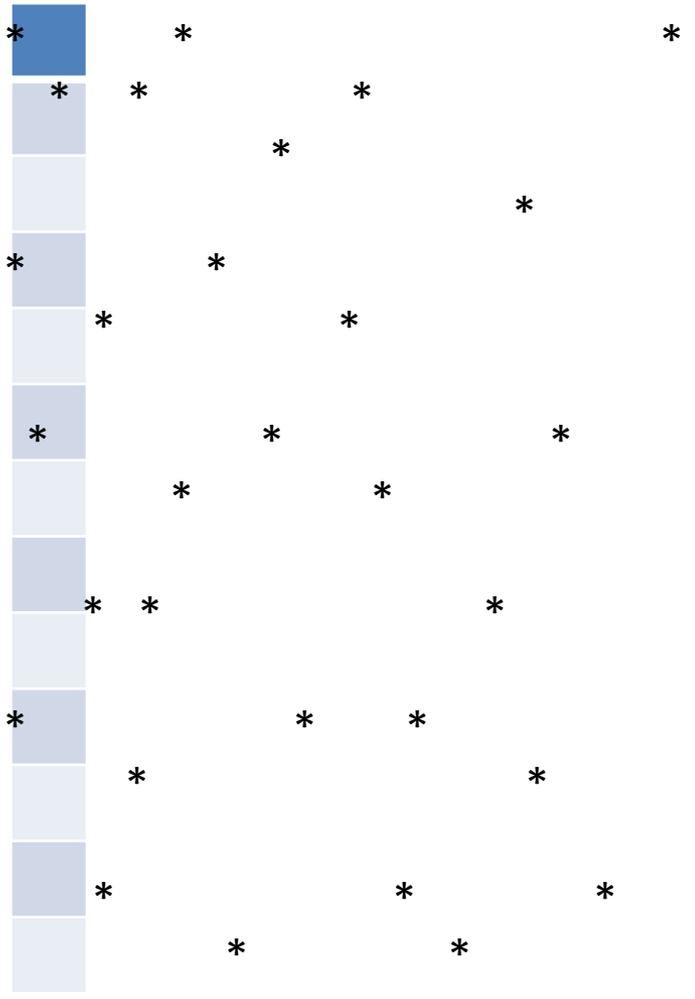
➔ le ciel défile ➔

Le principe TDI: scanner le ciel



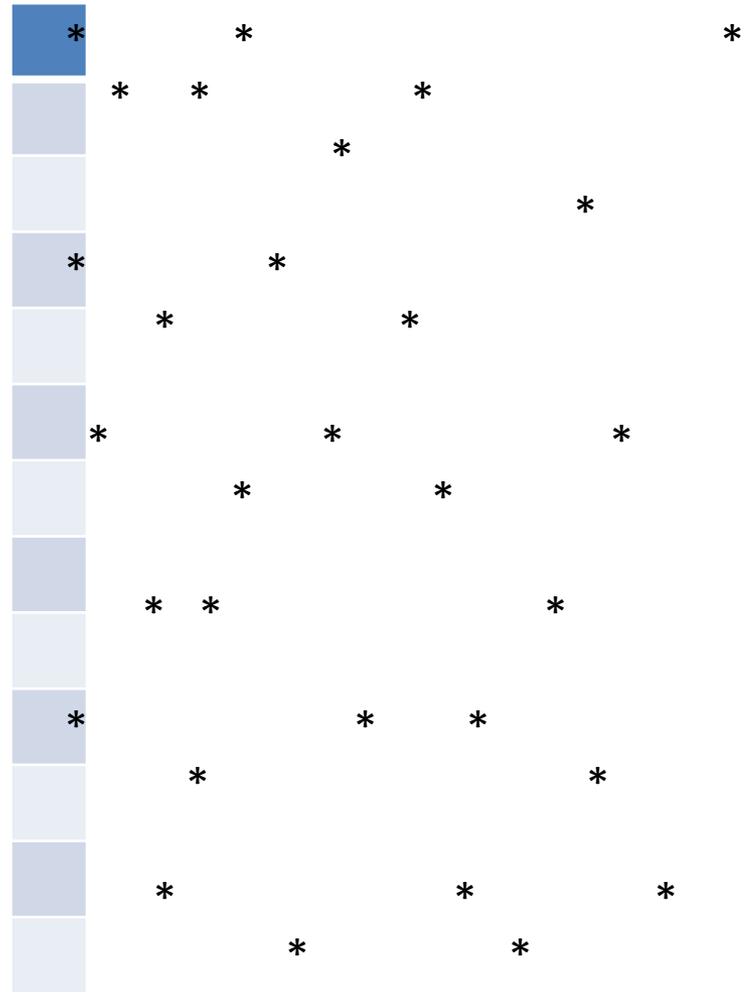
➔ le ciel défile ➔

Le principe TDI: scanner le ciel



➔ le ciel défile ➔

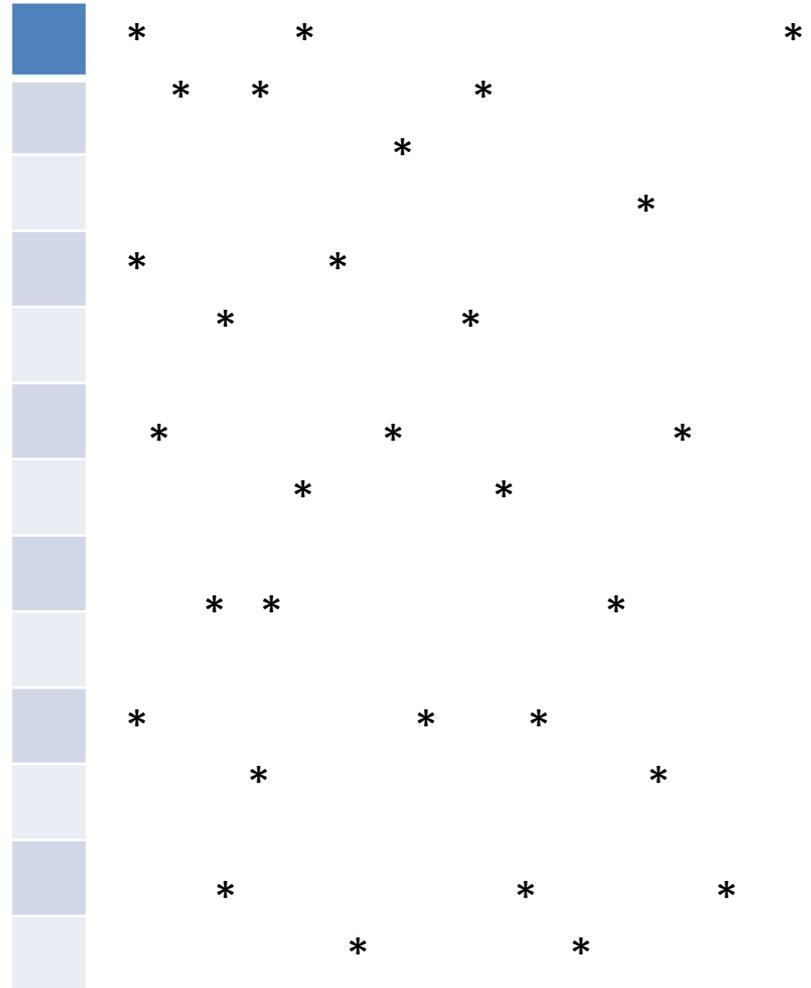
Le principe TDI: scanner le ciel



→ le ciel défile →

Le principe TDI: scanner le ciel

Lecture de la colonne de pixels à chaque fois que les étoiles ont avancé de la largeur de la colonne
→ reconstruction de l'image



→ le ciel défile →

L'observation TDI

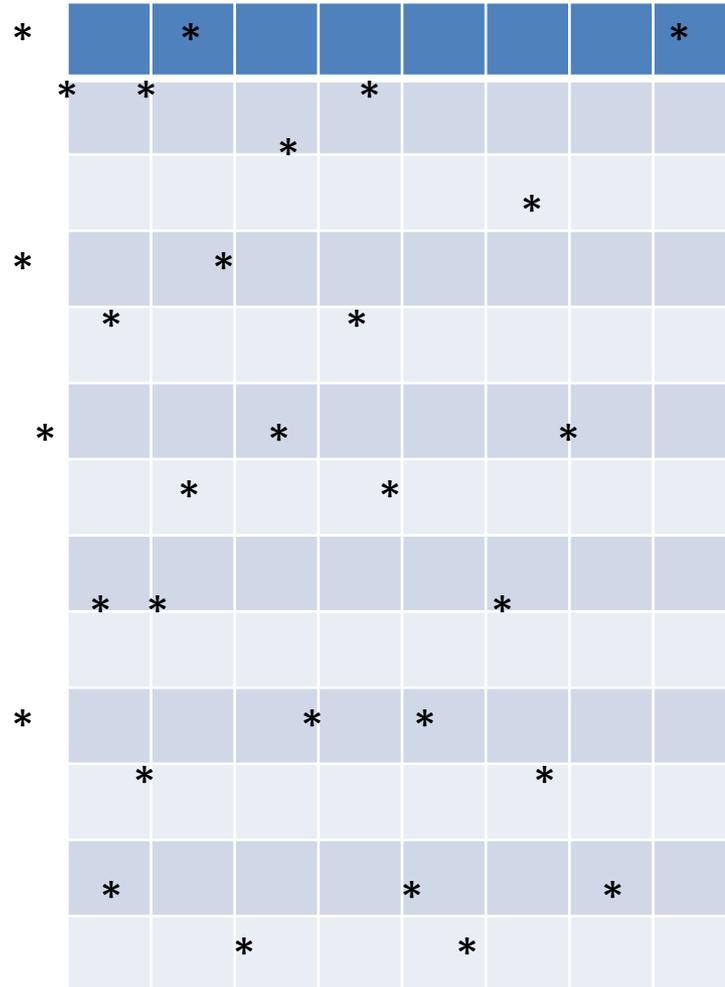
On va lire la cible à chaque fois que l'astre change de colonne de pixels

En additionnant les images avec un décalage d'une colonne de pixels (décalage de temps), on va construire une image très longue qui va intégrer sur la même image tous les astres qui vont défiler sur la cible.

(une seule colonne de pixels aurait été suffisante mais ainsi on va gagner en précision et en luminosité pour les astres faibles en utilisant une cible complète)

Le principe TDI: scanner le ciel

Si on remplace la colonne par une matrice CCD classique, on sommerait les images d'une même étoile faites sur chacune des colonnes.
La longueur de l'image ne dépend que de la durée d'observation.

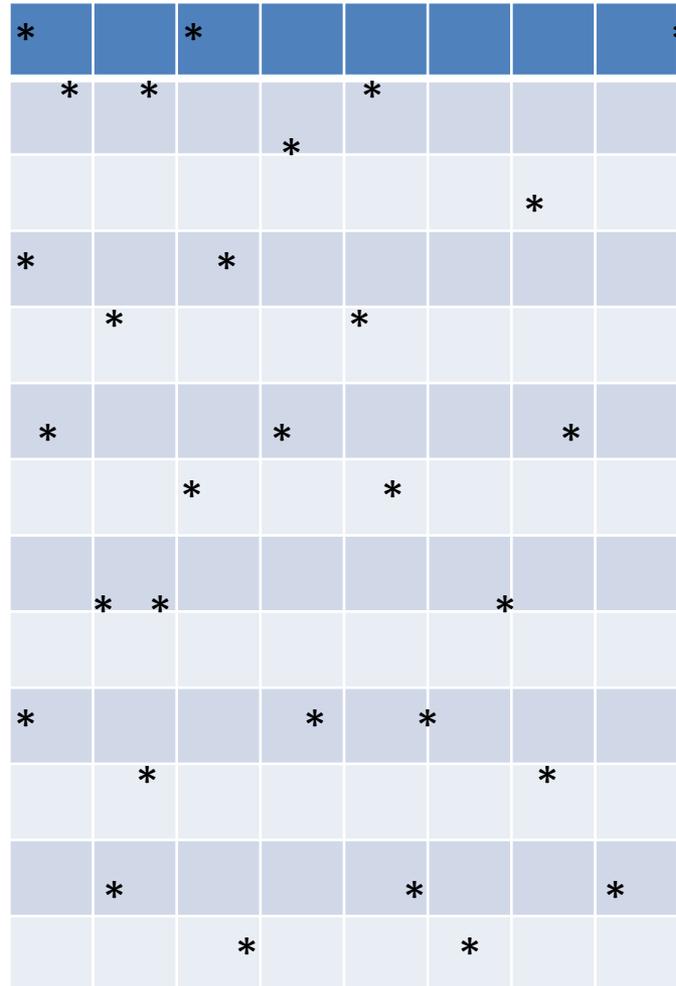


→ le ciel défile →

Le principe TDI: scanner le ciel

Si on remplace la colonne par une matrice CCD classique, on sommerait les images d'une même étoile faites sur chacune des colonnes.

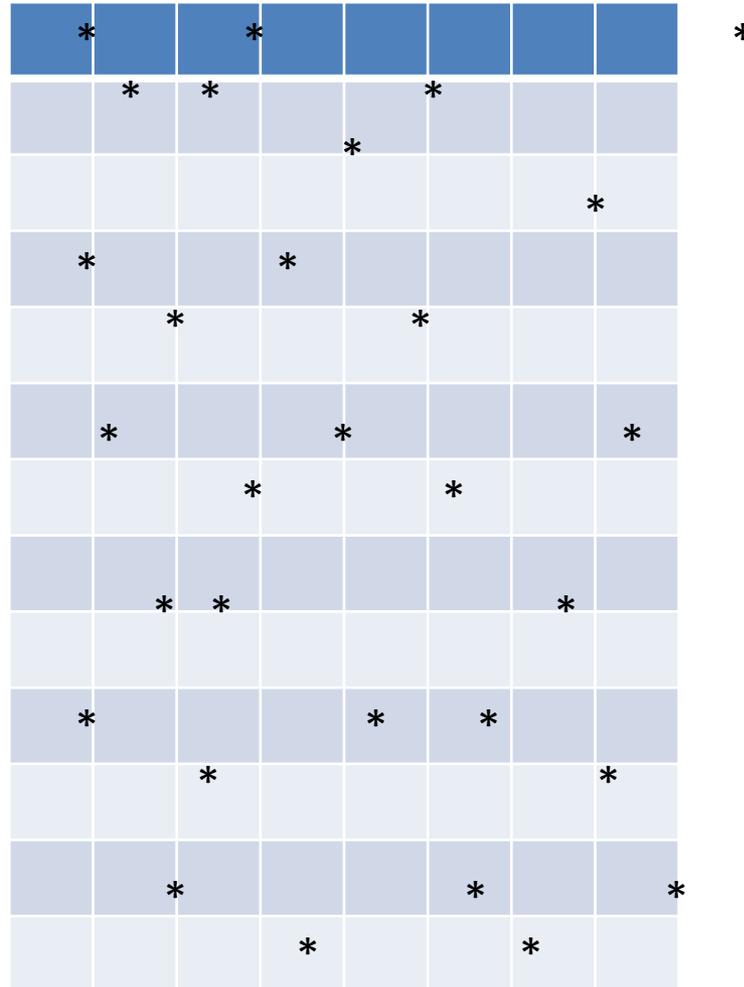
La longueur de l'image ne dépend que de la durée d'observation.



→ le ciel défile →

Le principe TDI: scanner le ciel

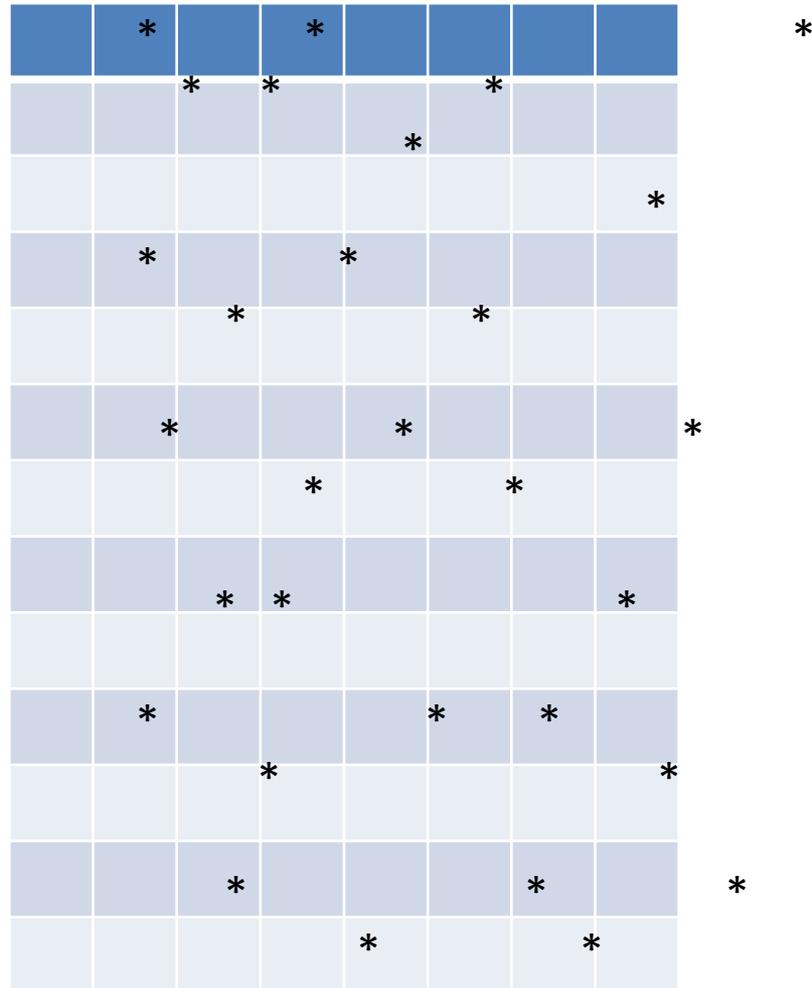
Si on remplace la colonne par une matrice CCD classique, on sommerait les images d'une même étoile faites sur chacune des colonnes.
La longueur de l'image ne dépend que de la durée d'observation.



➔ le ciel défile ➔

Le principe TDI: scanner le ciel

Si on remplace la colonne par une matrice CCD classique, on sommerait les images d'une même étoile faites sur chacune des colonnes.
La longueur de l'image ne dépend que de la durée d'observation.

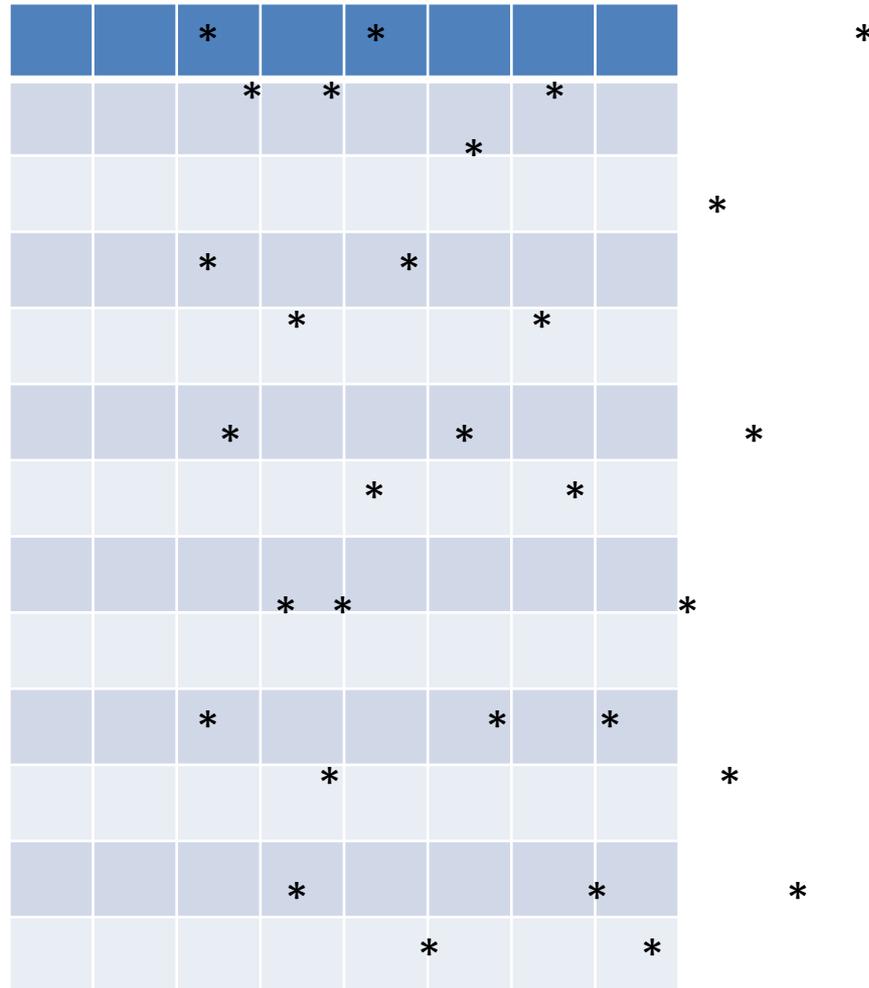


→ le ciel défile →

Le principe TDI: scanner le ciel

Si on remplace la colonne par une matrice CCD classique, on sommerait les images d'une même étoile faites sur chacune des colonnes.

La longueur de l'image ne dépend que de la durée d'observation.

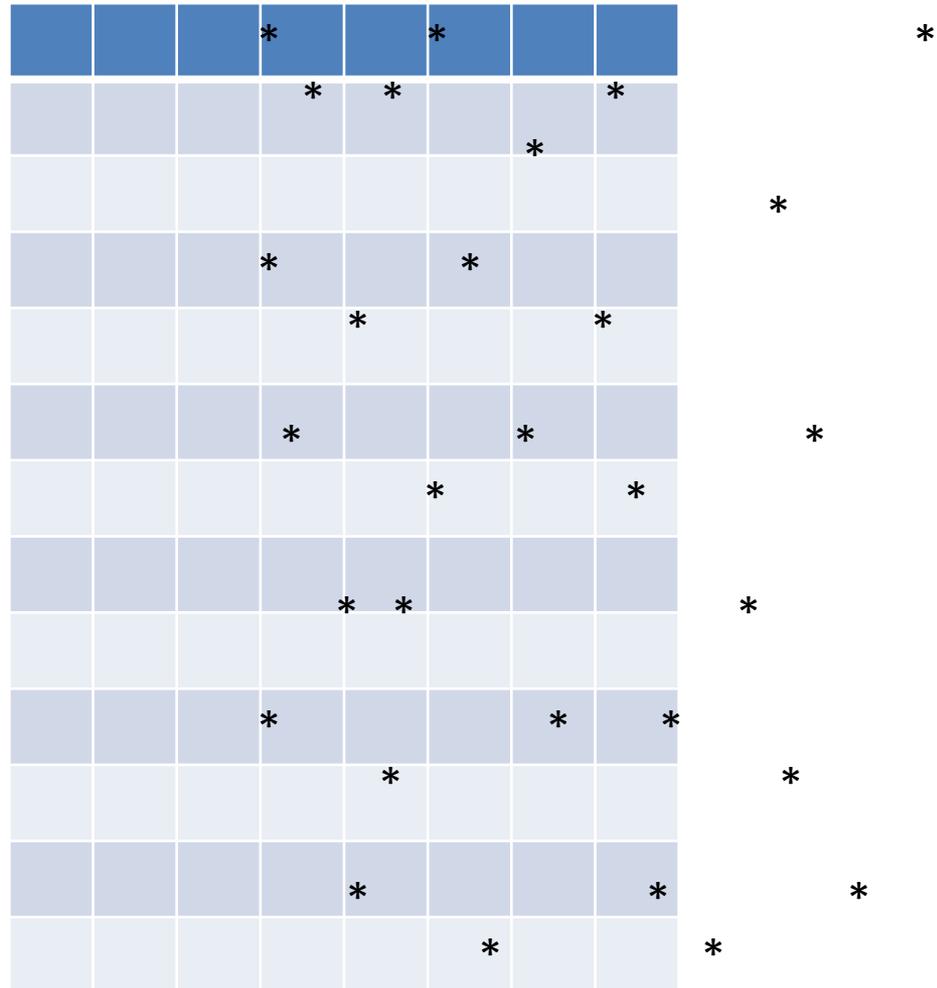


➔ le ciel défile ➔

Le principe TDI: scanner le ciel

Si on remplace la colonne par une matrice CCD classique, on sommerait les images d'une même étoile faites sur chacune des colonnes.

La longueur de l'image ne dépend que de la durée d'observation.

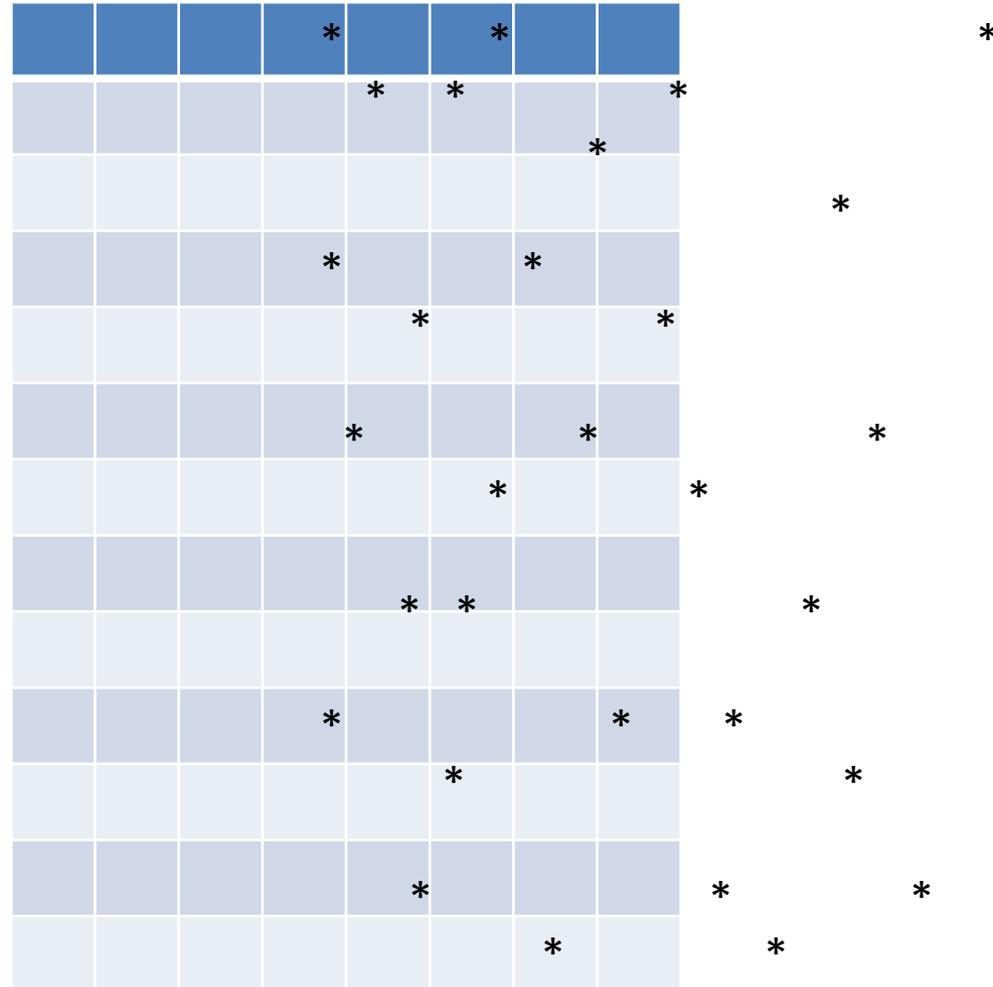


→ le ciel défile →

Le principe TDI: scanner le ciel

Si on remplace la colonne par une matrice CCD classique, on sommerait les images d'une même étoile faites sur chacune des colonnes.

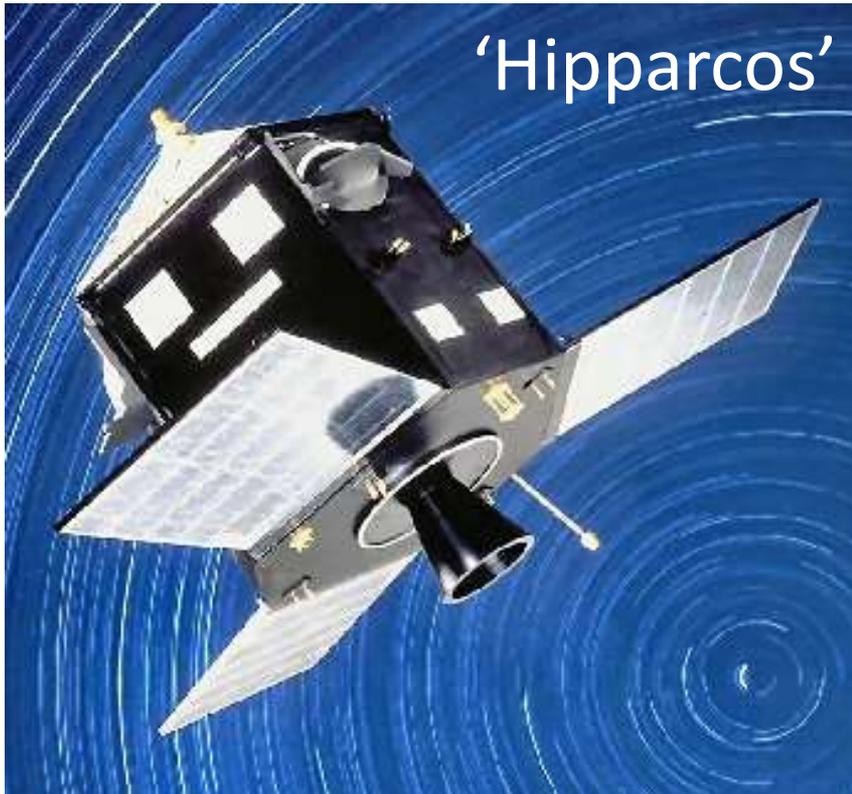
La longueur de l'image ne dépend que de la durée d'observation.



→ le ciel défile →

Hipparcos et Gaia

les télescopes astrométriques



Gaia, un satellite astrométrique qui balaie le ciel hors de l'atmosphère

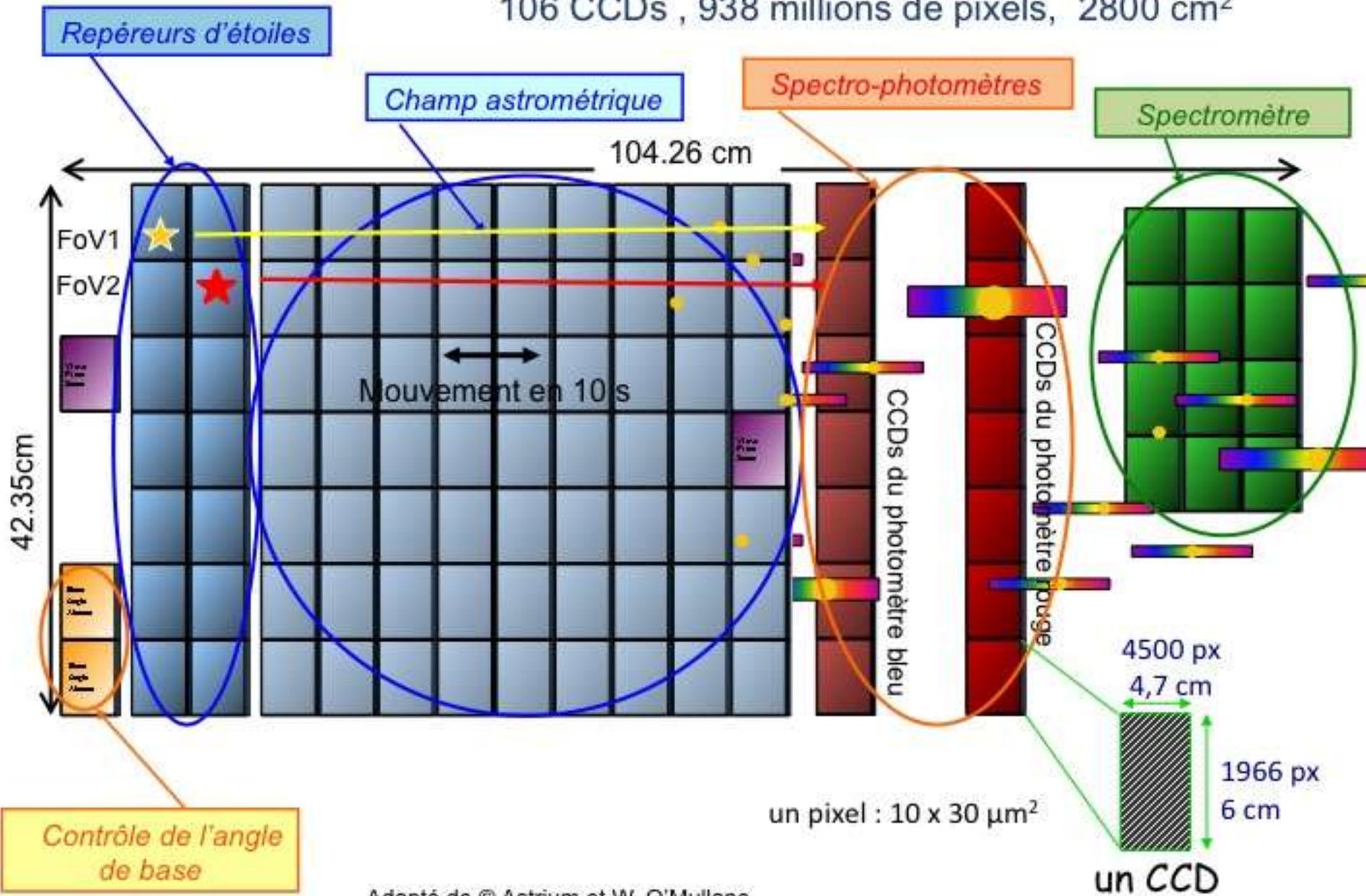
Le but du projet GAIA est de produire un nouveau catalogue d'un milliard d'étoiles avec une précision de 0.1 à 0.001 mas selon la magnitude.

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

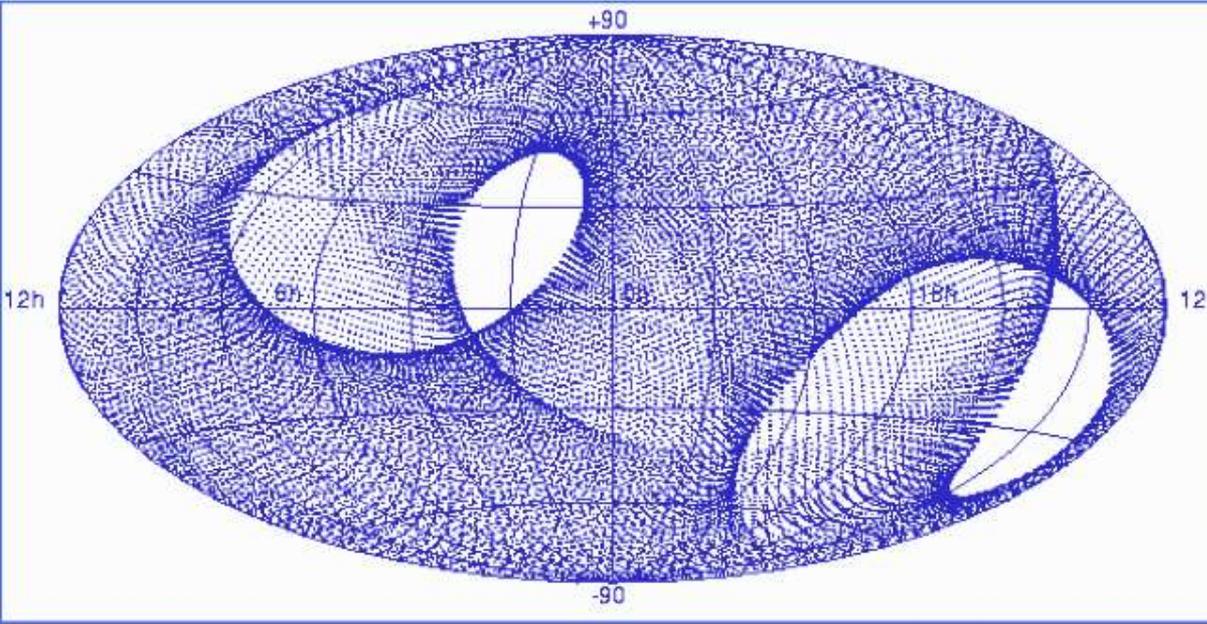
GAIA fonctionne en mode TDI: plan focal balayant le ciel

106 CCDs , 938 millions de pixels, 2800 cm²



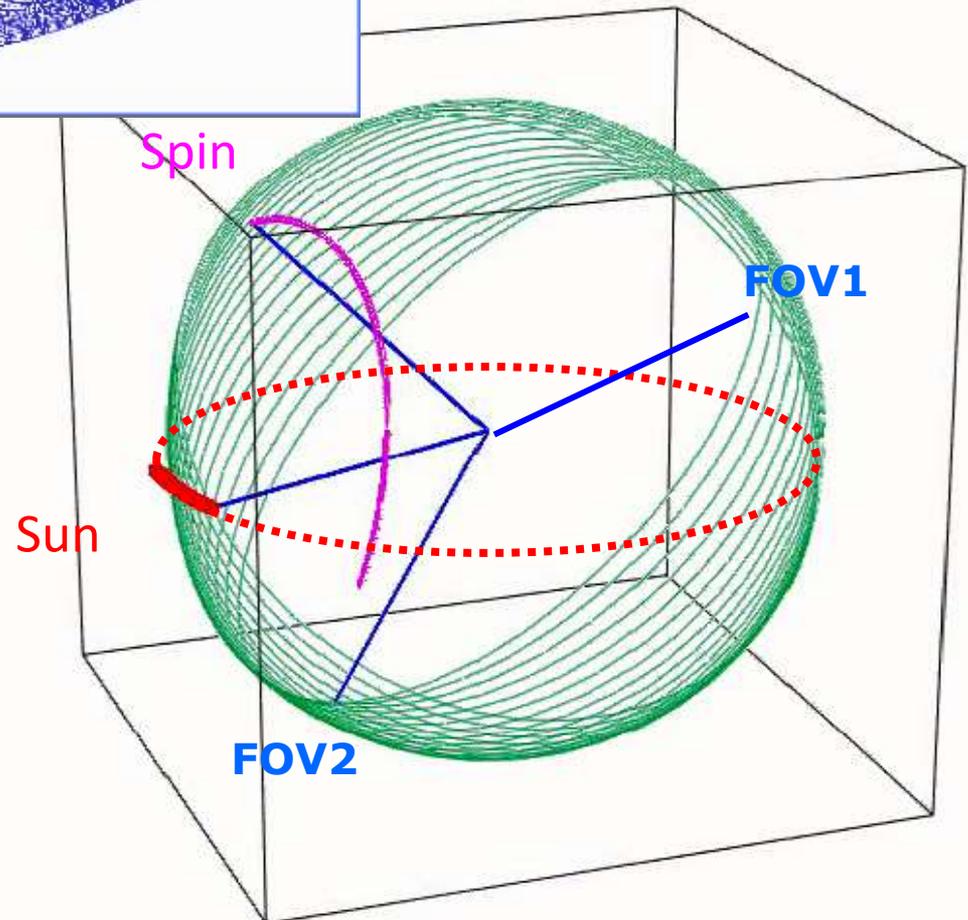
Adapté de © Astrium et W. O'Mullane

La loi de balayage du ciel

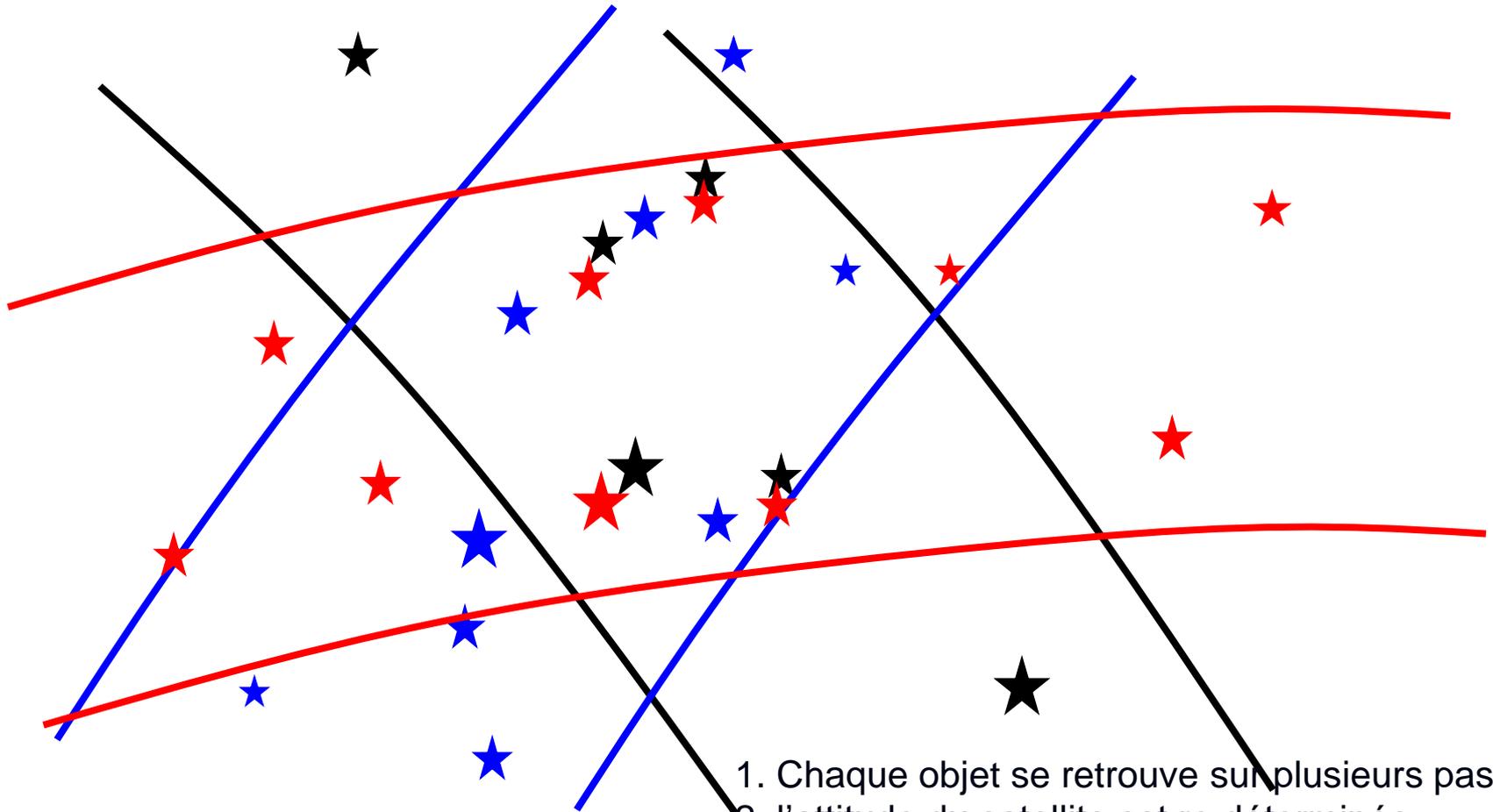


Gaia balaie le ciel (comme le fait une lunette méridienne)

- ❑ 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 re déterminée
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

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 »).

Le catalogue Gaia

- Gaia efface toutes les mesures réalisées auparavant et réalise un catalogue d'un milliard d'étoiles ultra-précis: il ne se base pas sur les catalogues précédents.
- 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.

L'astrométrie au sol complément de Gaia

- Les instruments méridiens ont permis la construction des catalogues d'étoiles de référence
- À partir de ces étoiles, on a imaginé un autre système d'observation: le rattachement
- Le catalogue Gaia permet un rattachement fiable même pour des observations passées

Observer un champ: le rattachement

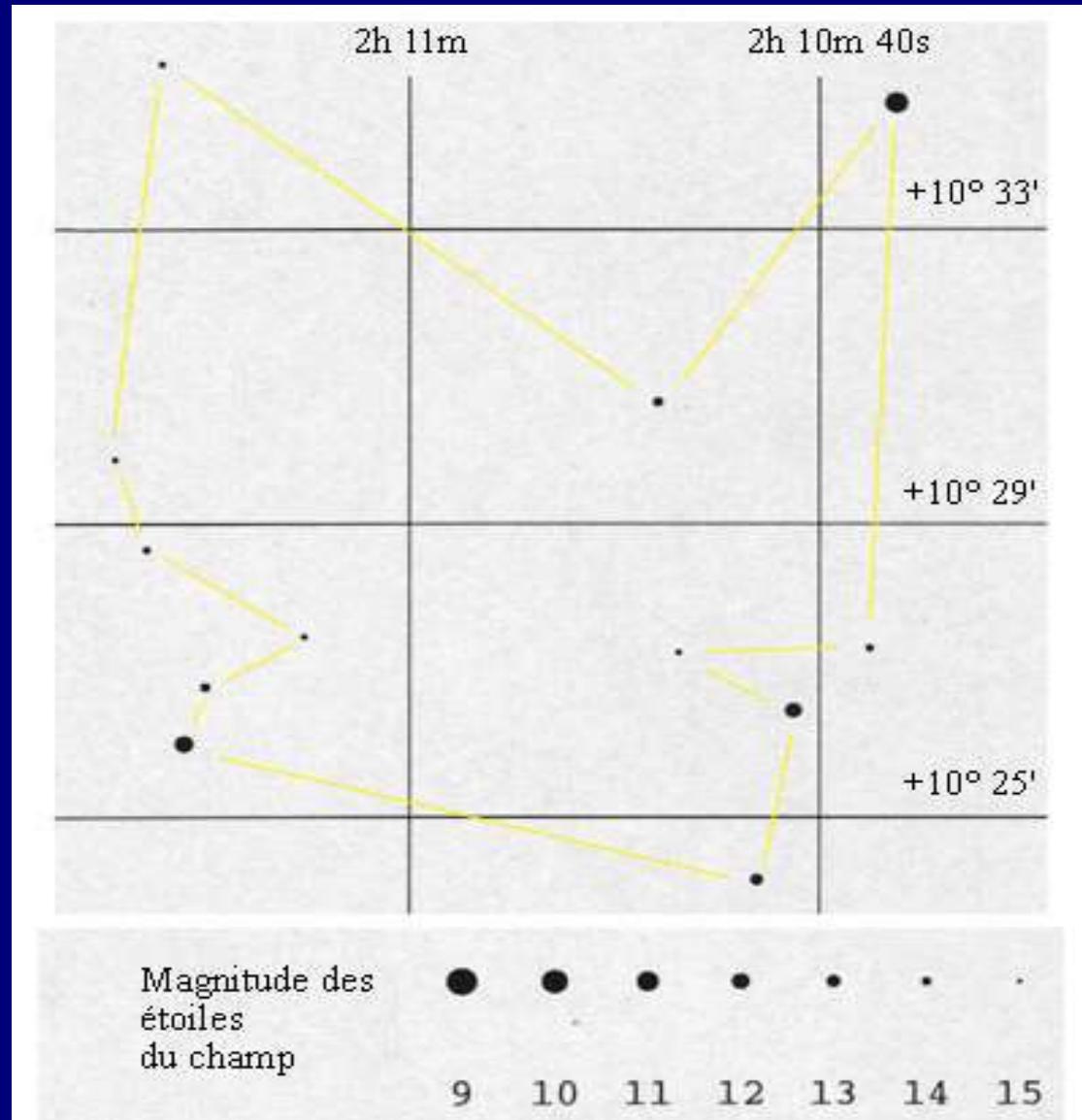


Un champ est défini par sa taille et sa magnitude limite qui dépendent du télescope utilisé

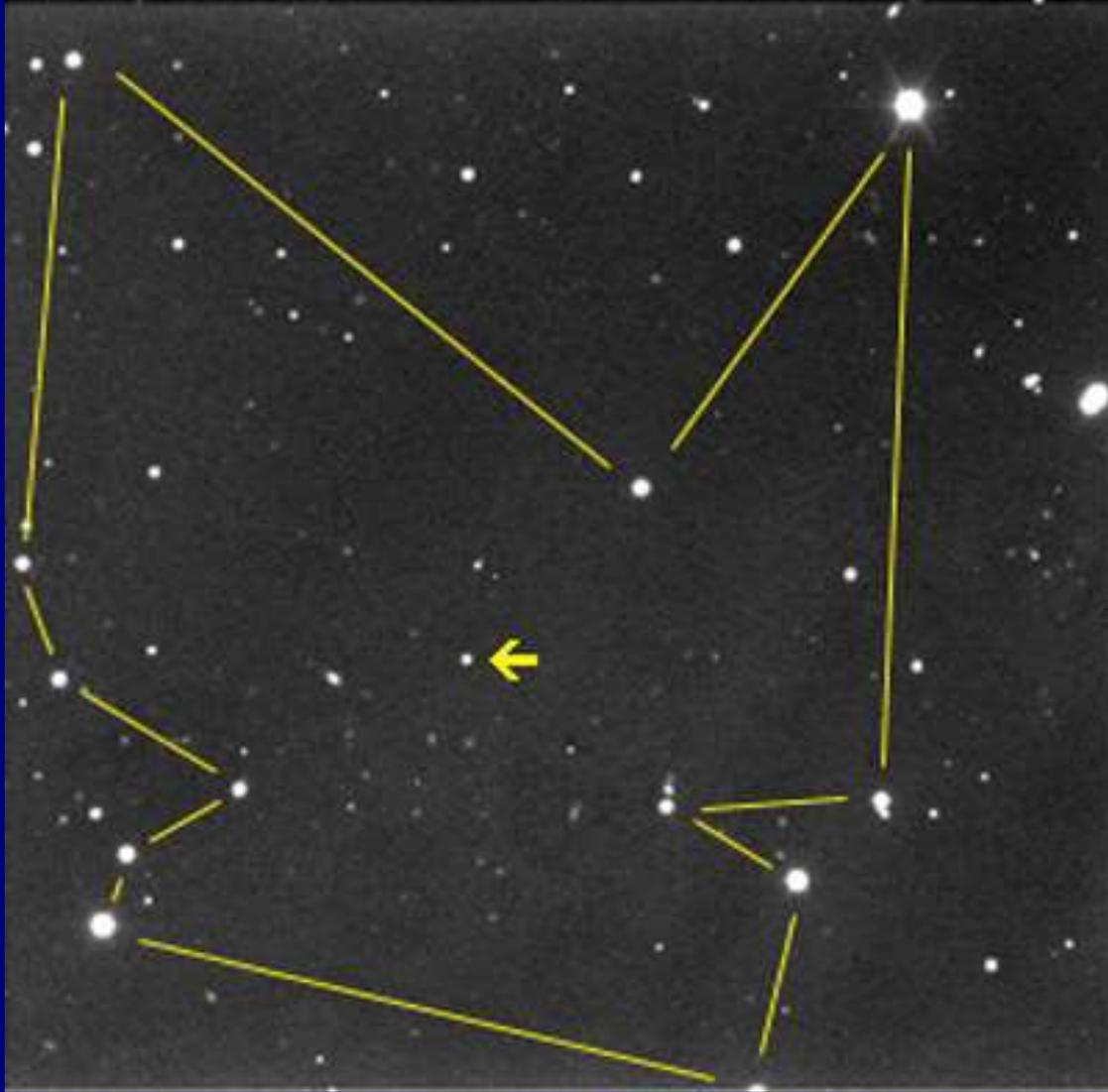
Observer un champ: le rattachement



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

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

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

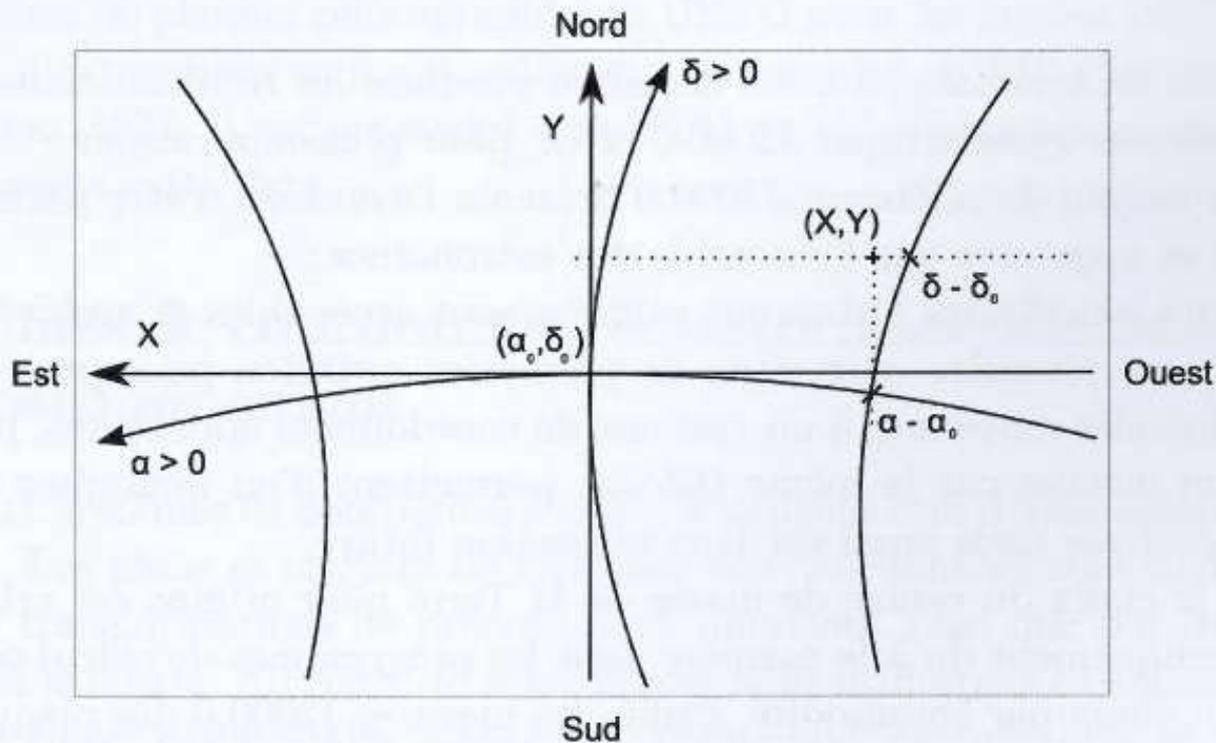
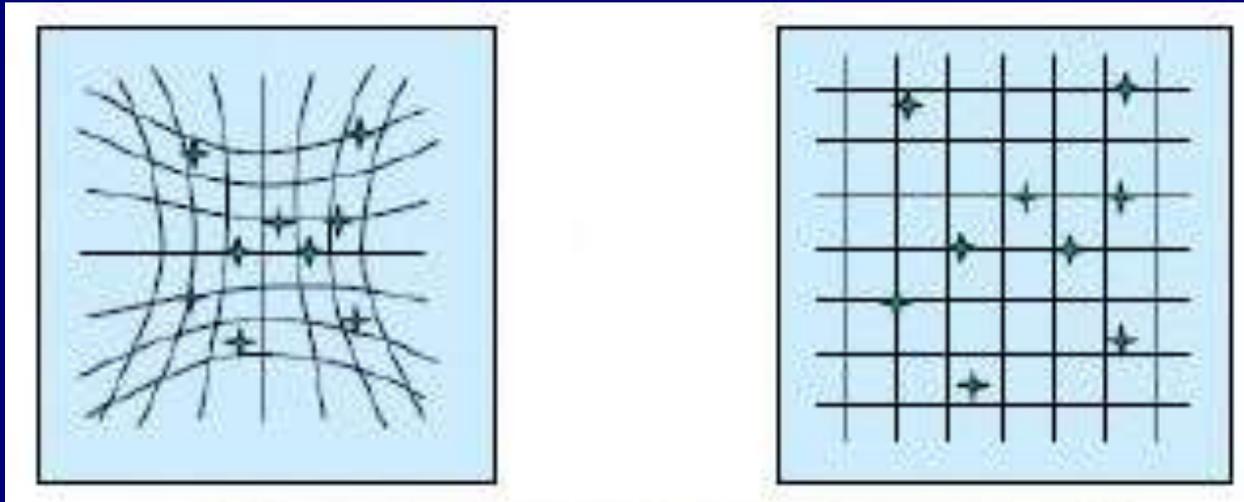


Figure 2.1 – Représentation tangentielle (plane) d'un champ sphérique.

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:

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

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

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

$a, b, c, d, e, f, a', b', c', d', e', f'$ sont les constantes de la cible CCD

$$\begin{aligned} X &= ax + by + c + dx^2 + ey^2 + fxy + \zeta_{(x,y)} \\ Y &= a'x + b'y + c' + d'x^2 + e'y^2 + f'xy + \zeta'_{(x,y)} \end{aligned}$$

Pour chaque étoile cataloguée du champ, on connaît α, δ, X, Y donnés et x, y mesurés.

On écrit les équations ci-dessus pour chaque étoile cataloguée et on résout les $a, b, c, d, e, f, a', b', c', d', e', f'$ si on a suffisamment d'étoiles (ce qui est le cas en général)

Le rattachement

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

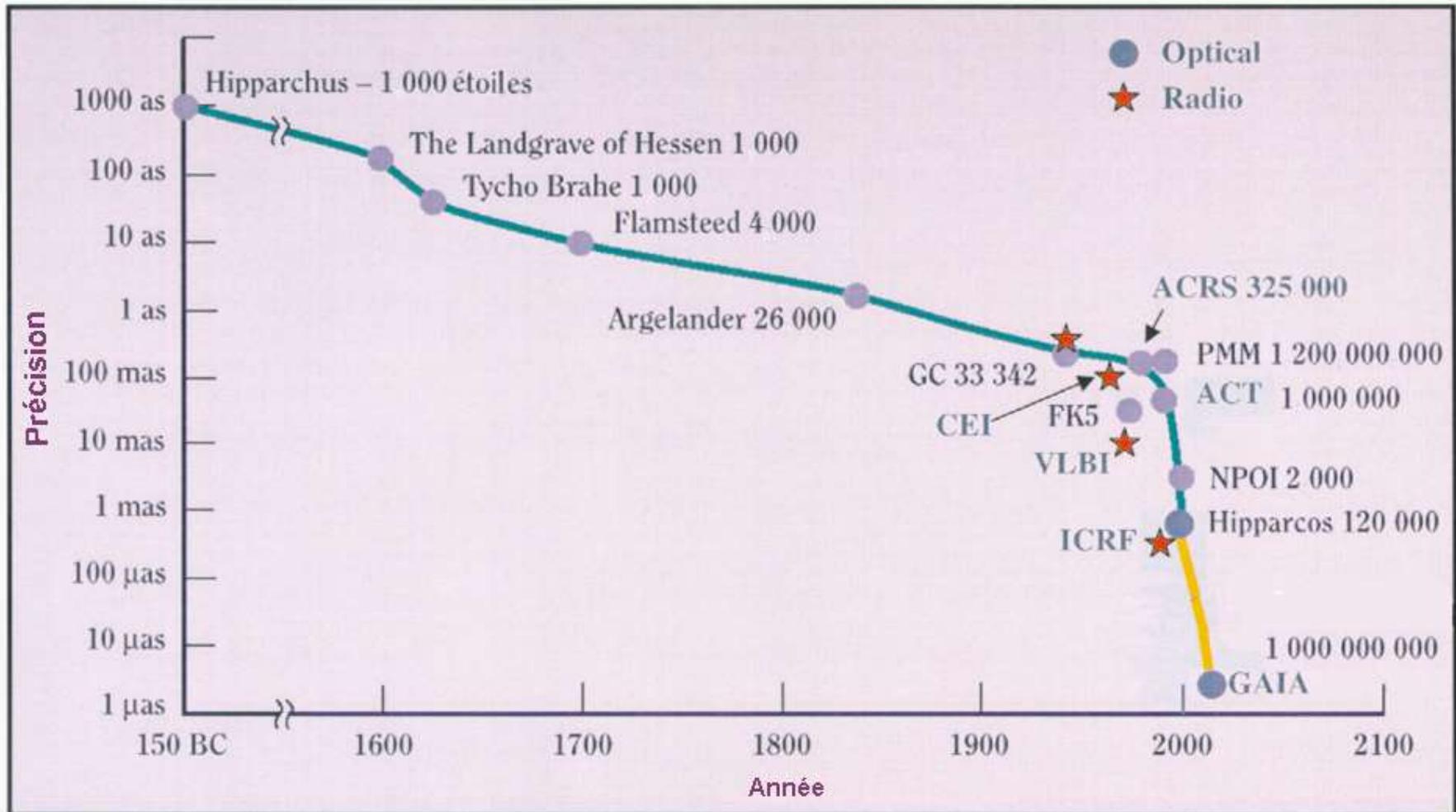
X, Y : coordonnées tangentielles théoriques dépendant de α et δ
 x, y : coordonnées mesurées sur l'image

$a, b, c, d, e, f, a', b', c', d', e', f'$ sont les constantes de la cible CCD

$$\begin{aligned} X &= ax + by + c + dx^2 + ey^2 + fxy + \zeta_{(x,y)} \\ Y &= a'x + b'y + c' + d'x^2 + e'y^2 + f'xy + \zeta'_{(x,y)} \end{aligned}$$

Il suffit ensuite de mettre les x et y mesurés de l'objet inconnu dans les deux équations pour obtenir X et Y et donc α et δ

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 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.