

Des débuts à Gaia...

La distance des étoiles



« Toujours la vue des étoiles me fait rêver, aussi simplement que me donnent à rêver les points noirs représentant sur la carte géographique villes et villages. Pourquoi, me dis-je, les points lumineux du firmament nous seraient-ils moins accessibles que les points noirs sur la carte de France ? »

Lettre à Théo, Vincent Van Gogh, Arles, 1888

Le problème le plus difficile...

- Question à Google:
 - "The most difficult problem in astronomy" ?
- Réponse :
 - « Distance measurement »
 - « Measuring the distance to something »
 - « One of the most difficult, if not absolutely the most difficult » Curtis (1911)
 - « The direct determination of stellar parallax is perhaps the most difficult problem in astronomy » Bailey (1919)
 - « Arguably, distance determination » Elitzur (1992)



*Joan Miró, La caresse des étoiles,
22 Juillet 1938*

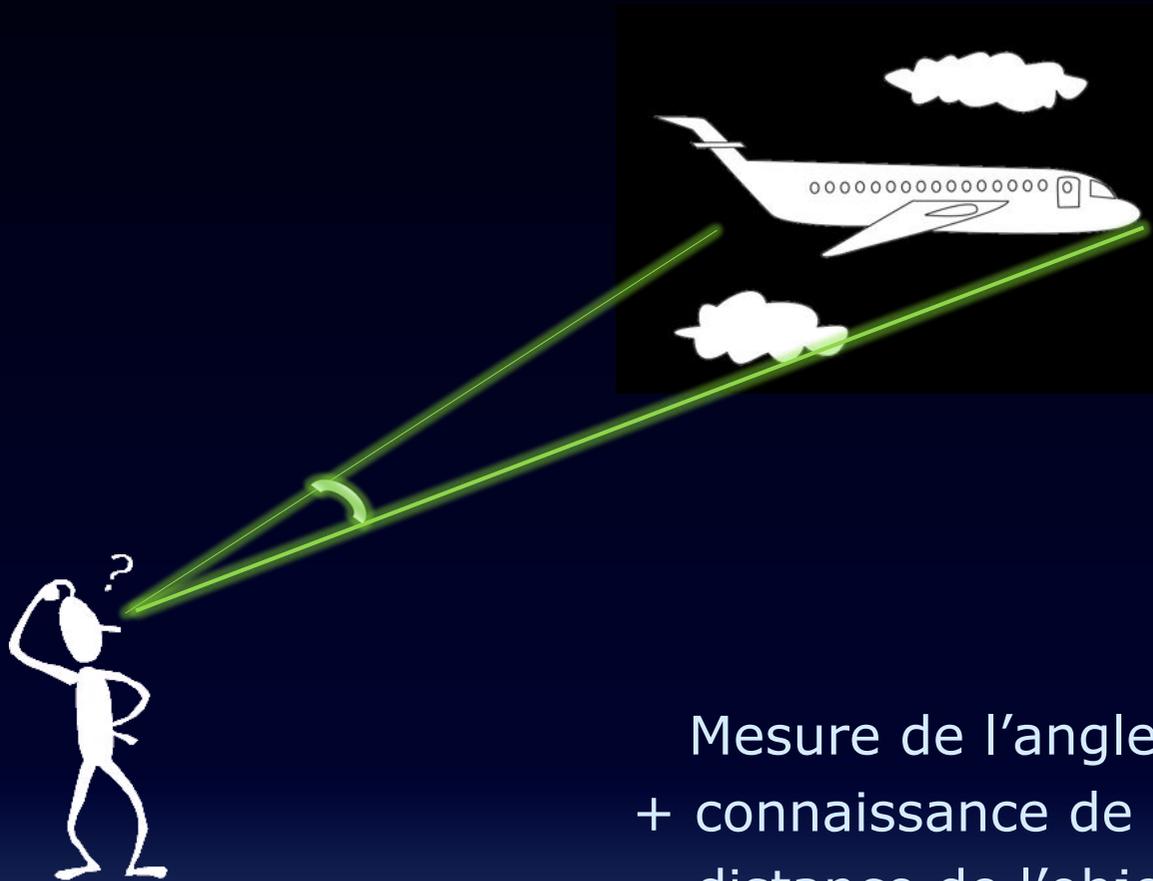
Les plus proches étoiles



À cette échelle:

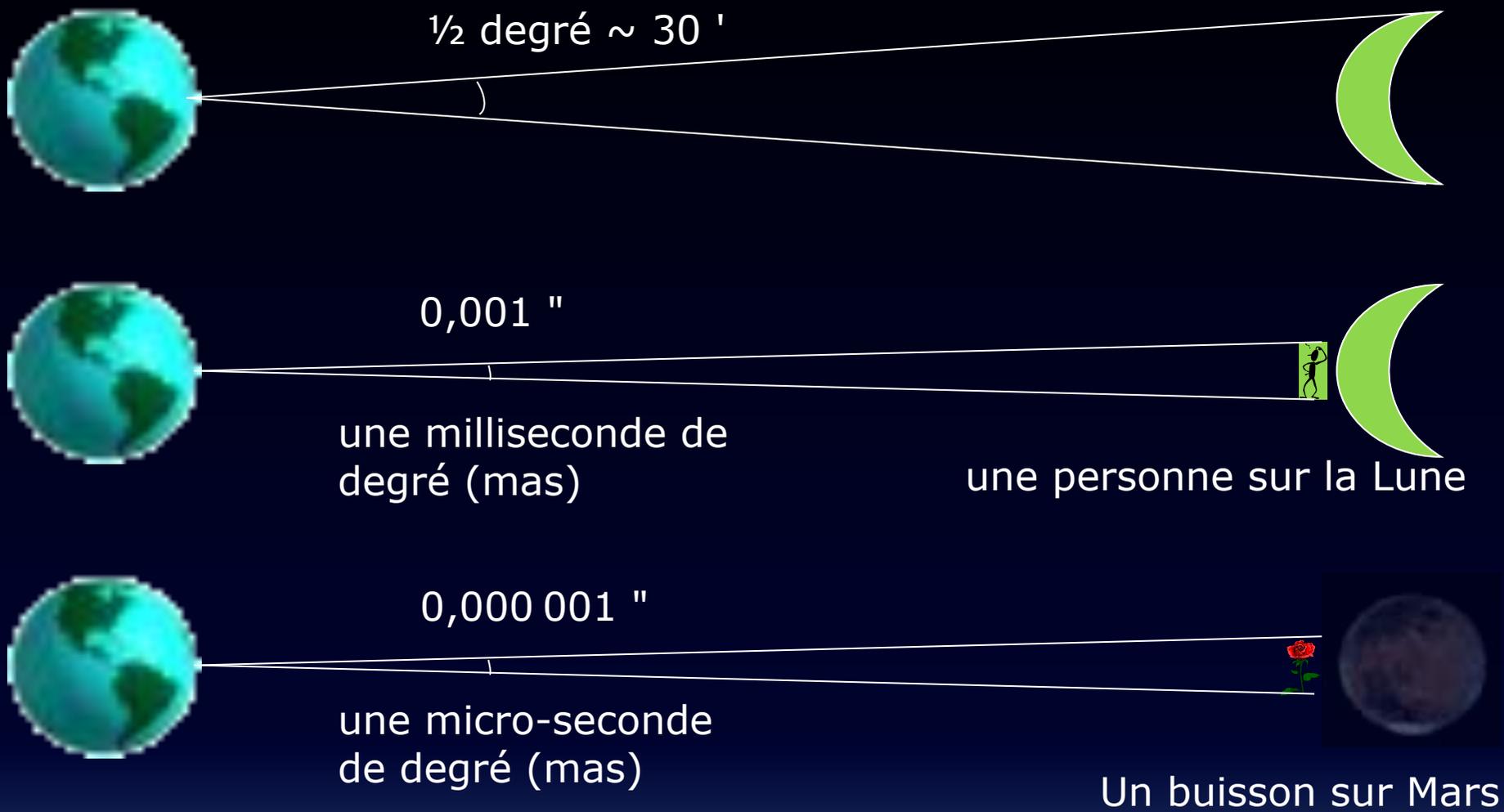
- Soleil = une bille
- Syst. solaire = terrain de foot

Angles et distances...



Mesure de l'angle
+ connaissance de la distance parcourue
= distance de l'objet

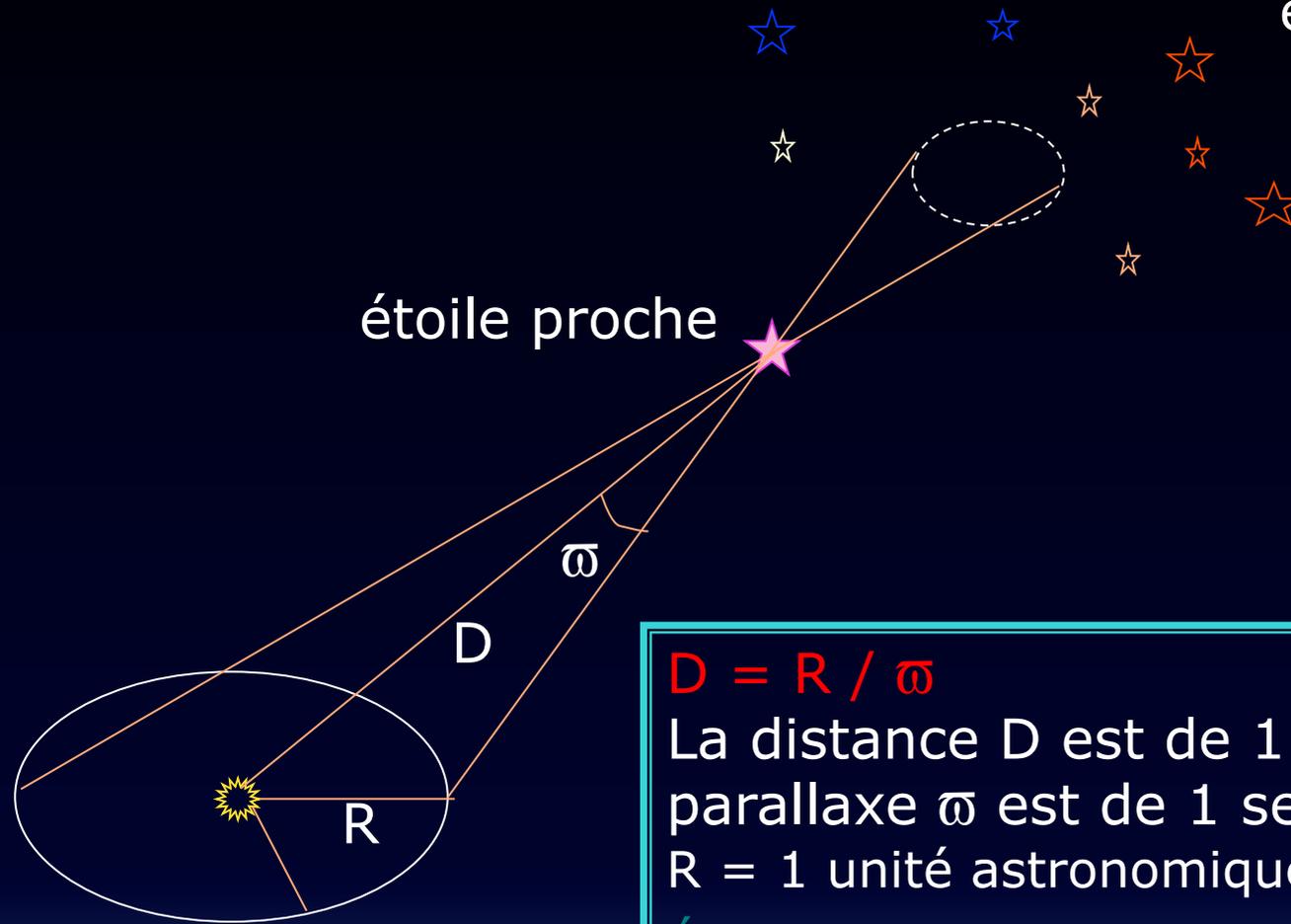
Ordres de grandeur



Distance et parallaxe trigonométrique

étoiles lointaines

étoile proche



orbite de la Terre

$$D = R / \varpi$$

La distance D est de 1 parsec si la parallaxe ϖ est de 1 seconde de degré
 $R = 1$ unité astronomique (u.a.)

Étoile la plus proche : $\varpi = 0,77''$, $D = 1,3$ pc

Quelques unités utiles

L'année-lumière

$$1 \text{ année-lumière} = 9,5 \times 10^{12} \text{ km}$$

Le parsec

C'est la distance d'une étoile dont la parallaxe trigonométrique est de 1 seconde de degré.

$$\begin{aligned} 1 \text{ pc} &= 1/\sin(1'') = 206\,265 \text{ u.a.} \\ &= 3,1 \times 10^{13} \text{ km} \\ &= 3,26 \text{ années-lumière} \end{aligned}$$

L'unité astronomique

C'est le rayon de l'orbite circulaire que décrirait autour du soleil une planète de masse négligeable et de révolution 365,256 898 3263 jours

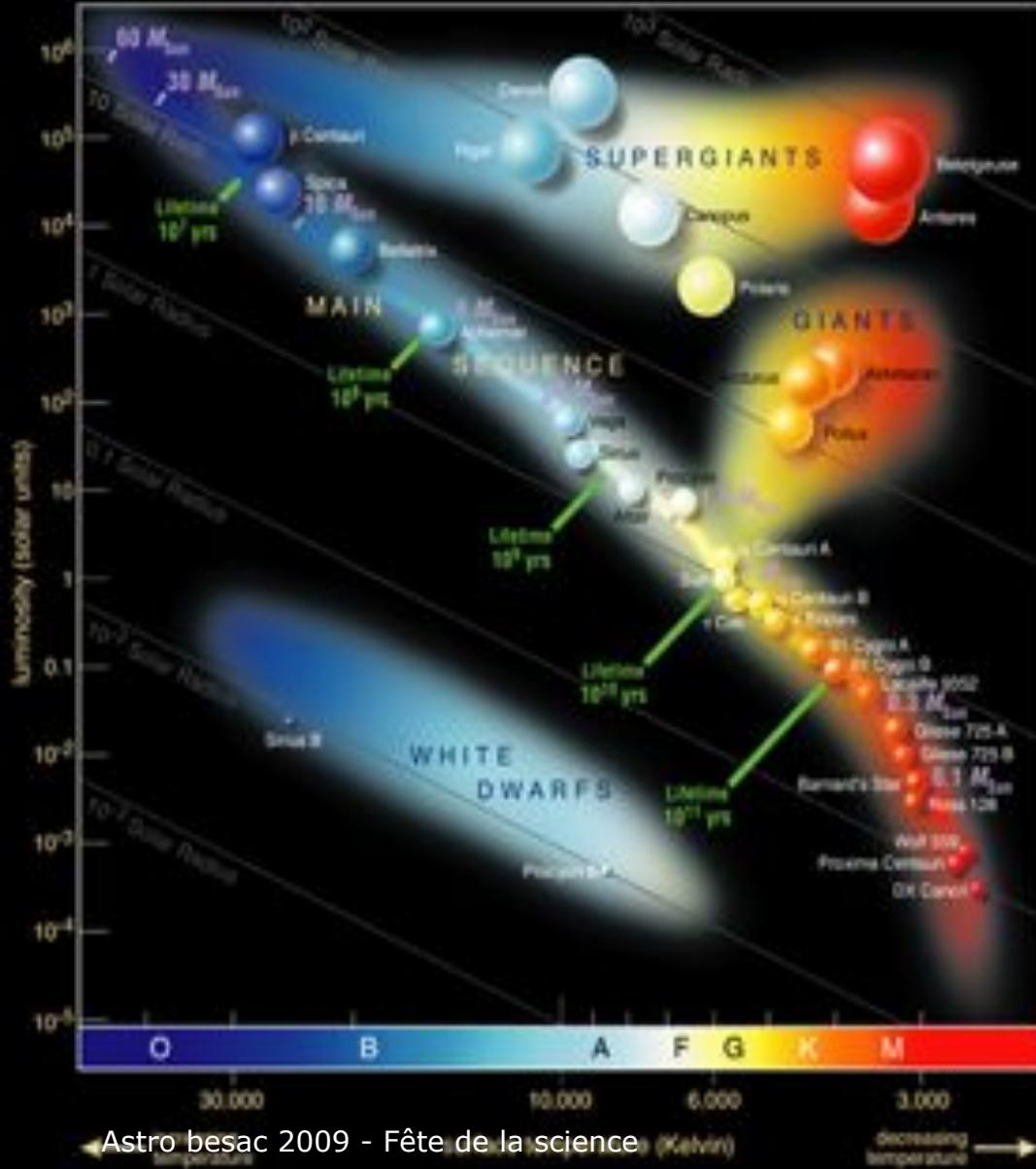
$$1 \text{ u.a.} = 149,6 \times 10^6 \text{ km}$$

Demi-grand axe de l'orbite terrestre = 1,000 000 236 u.a.

Vitesse de la lumière

$$c = 299\,792,458 \text{ km/s}$$

Le diagramme HR



- Un diagramme de Hertzsprung-Russell a une ordonnée dans une échelle de magnitude absolue et une abscisse dans une échelle de température

magnitude apparente d'un objet :

$$m = 2,5 \log(\text{Luminosité}_{\text{apparente}}) + \text{Cte}$$

magnitude absolue :

$$M = 2,5 \log(\text{Luminosité}_{\text{totale}}) + \text{Cte}$$

comme $\frac{\text{Luminosité}_{\text{apparente}}}{\text{Luminosité}_{\text{totale}}} = \frac{1}{4\pi D^2}$

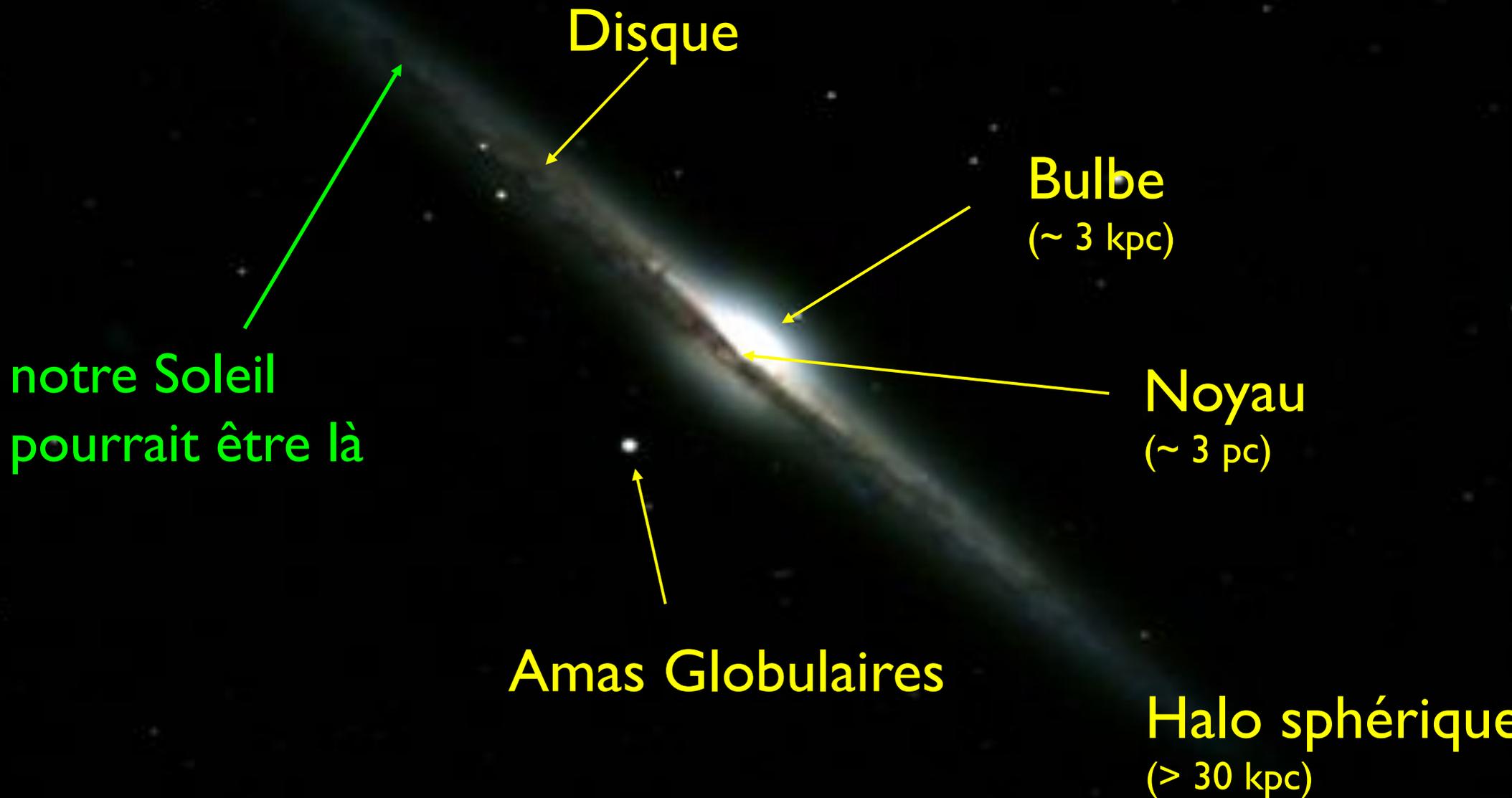
$$m - M = 5 \log D - 5 \quad \text{si } D \text{ est en parsec}$$

M 83 (à quoi notre Galaxie ressemble peut-être)

notre Soleil pourrait être là



NGC 4565: à quoi notre Galaxie ressemble peut-être



Intro

Graal

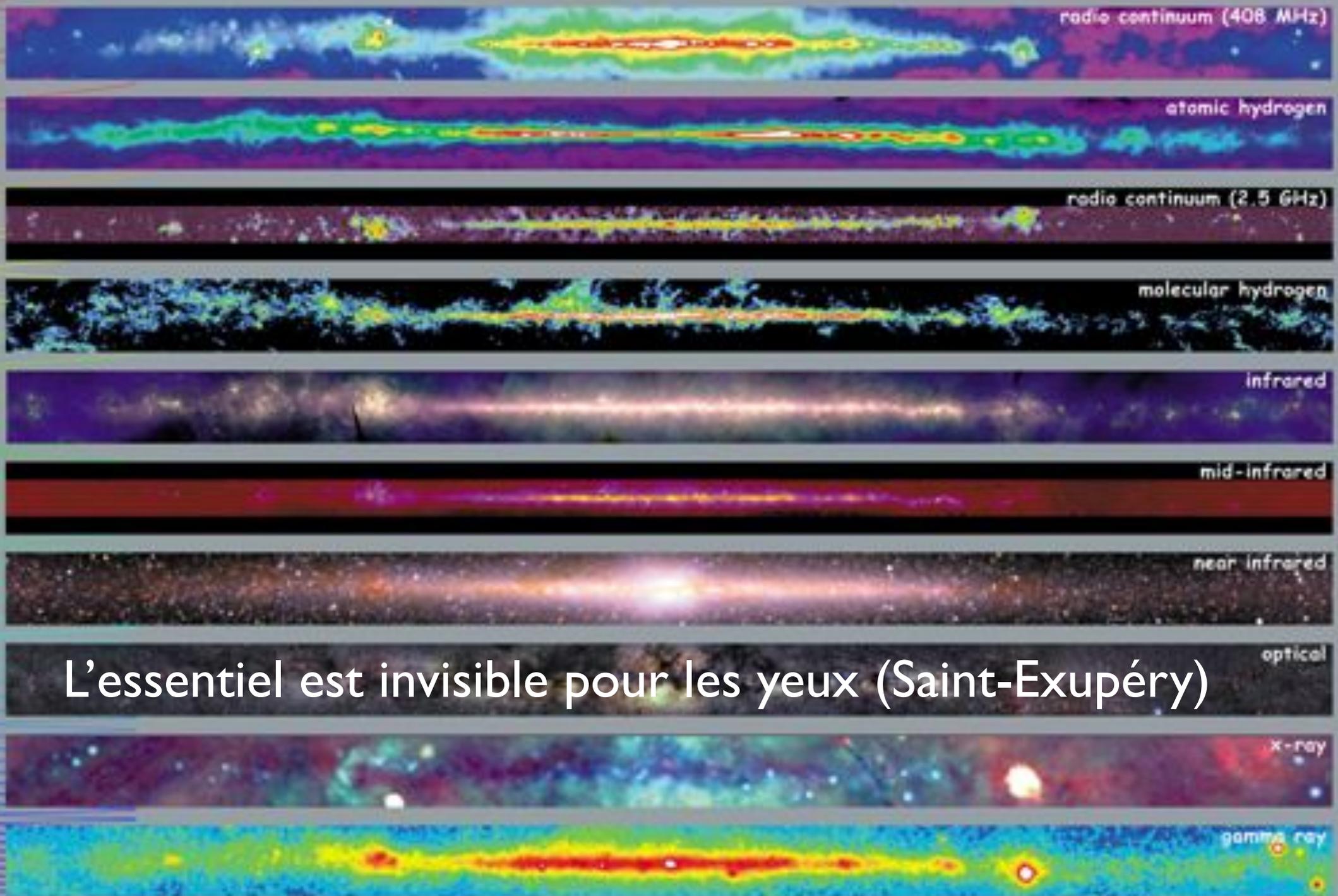
Angles

Luminosité

Hipparcos

Gaia





L'essentiel est invisible pour les yeux (Saint-Exupéry)

<http://cds.cern.ch/ftp/nasa.gov/mw/>

La quête du Graal...

Les distances stellaires

LES DISTANCES STELLAIRES

Les anciens

- ❑ Modèle géocentrique
 - ❑ Sphère des fixes, différence de taille, vitesse finie
 - ❑ Toutes les étoiles à la même distance
 - ❑ Aristote (-320): étoiles 9 x plus loin que le soleil
 - ❑ Ptolémée (130): 569 463 333 stades $\sim 20\,000$ ER $\sim 10^8$ km
- ❑ Modèle d'Aristarque de Samos (-270)
 - ❑ Connu par l'Arénaire d'Archimède
 - ❑ Lui-même n'est pas héliocentrique
 - ❑ « *Il est des personnes, ô roi Gélon, qui pensent que le nombre des grains de sable est infini. Nous disons donc que si l'on avait une sphère de sable aussi grande que la sphère des étoiles fixes supposée par Aristarque, on pourrait démontrer que parmi les nombres dénommés dans le Livre des Principes, il y en aurait qui surpasseraient le nombre de grains de sable contenus dans cette sphère.* »
 - ❑ Distance des étoiles $< 10^{14}$ stades $\sim 15\,000$ milliard km



Galilée

« Je ne crois pas que toutes les étoiles sont parsemées sur une surface sphérique à la même distance d'un centre; mais je pense, au contraire, que leurs distances sont tellement variées qu'il y a plusieurs étoiles deux ou trois fois plus éloignées que les autres de manière que, si l'on voyait dans le champ d'une lunette une étoile très petite, très proche d'une des plus grandes, la première étant à une très grande hauteur, il pourrait arriver quelque changement sensible entre elles. »

Galilée, 1632, Dialogues, Troisième journée



Photométrie: distance de Sirius

□ Christiaan Huygens (1629-1695)

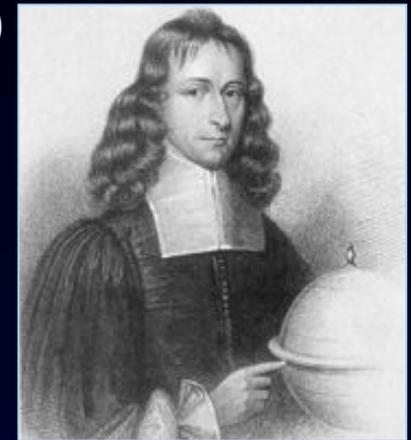
- Veut prouver que les étoiles ne tirent pas leur lumière du soleil ("*une conception du monde beaucoup plus grandiose*")
- Un écran, des trous, une lentille,... et une bonne mémoire!
- Surface trou/soleil: Sirius à 27 664 U.A. (1686, publié 1698)
- 538 x plus loin que Képler (repris par Fontenelle, Kant)

□ James Gregory (1638-1675)

- 83 190 U.A. (1668)
- Méthode améliorée par Newton

□ Newton (1643-1727)

- comparaison de la magnitude de Sirius avec celle de Saturne
- Calcul de la fraction de la lumière réfléchiée par Saturne, supposant connus son rayon, distance au soleil, albedo
- distance qu'aurait le Soleil pour avoir la magnitude de Saturne: $\sim 548\,100$ U.A. (1686)



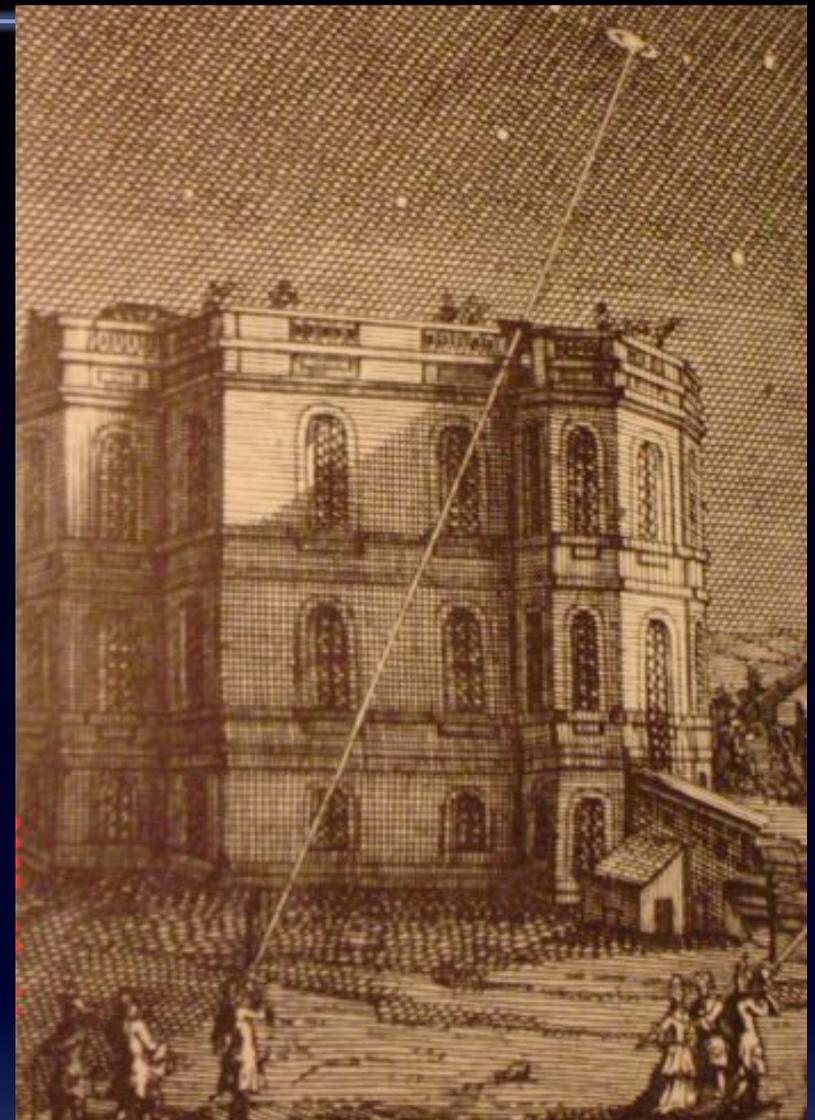
□ Très bonne estimation car Sirius ~ 2.6 pc $\sim 536\,289$ U.A.

Estimer les distances...

« De la terre où nous sommes, ce que nous voyons de plus éloigné, c'est ce ciel bleu, cette grande voûte où il semble que les étoiles sont attachées comme des clous. »

« Les étoiles fixes ne sauraient être moins éloignées de la Terre que de vingt sept mille six cent soixante fois la distance d'ici au Soleil, qui est de trente-trois millions de lieues et, si vous fâchiez un astronome, il les mettrait encore plus loin. »

□ Fontenelle, 1686, *Entretiens sur la pluralité des Mondes*



Soirée à l'Observatoire de Paris, fin du XVII^{ème}

Mouvement propre



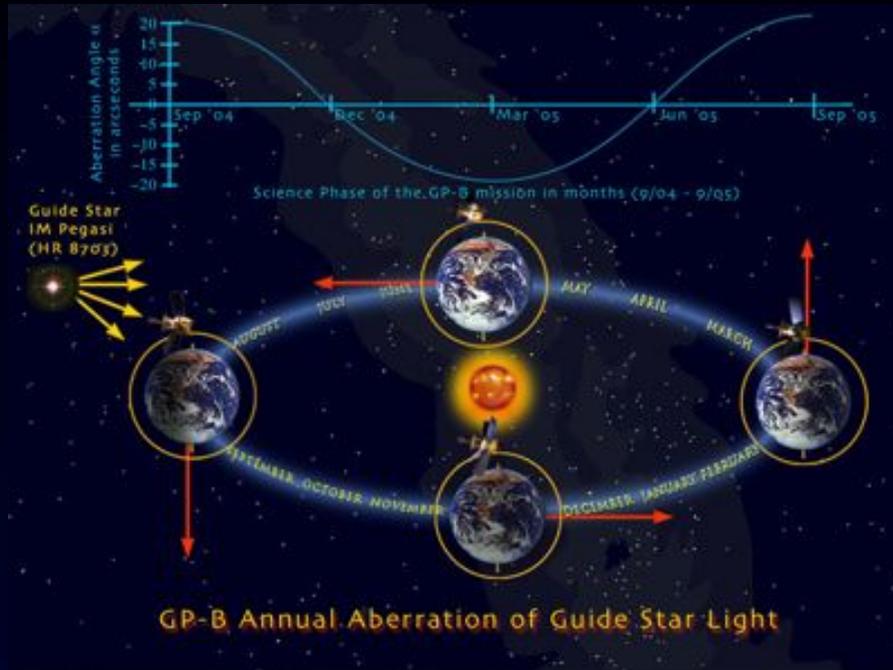
Upper Sco: sur un million d'années

- Edmond Halley (1656-1742)
 - découvre en 1718 les mouvements propres
 - en comparant les positions d'étoiles observées à son époque avec celles de Ptolémée
 - « *20' depuis le temps d'Hipparque* »
 - Étoile proche: grand mouvement propre
 - Toujours pas de parallaxes...

Parallaxes et mouvements propres



Aberration de la lumière



□ James Bradley (1693–1762) & Samuel Molyneux

- Mesure de la position de Gamma Draconis le 3 décembre 1725
- Pour mesurer une parallaxe
- Deux semaines après, l'étoile a déjà bougé... et dans le mauvais sens
- Deux ans après, il comprend en voyant le fanion d'un bateau sur la Tamise
- La raison: la terre a bougé (analogue à l'inclinaison nécessaire du parapluie quand on court !)

- Toujours pas de parallaxes, mais tout autant fondamental
 - Preuve (même sans parallaxes!) de la théorie de Copernic
 - Confirme Rømer: finitude de la vitesse de la lumière
 - Connaissant (mal) l'unité astronomique: vitesse de la lumière

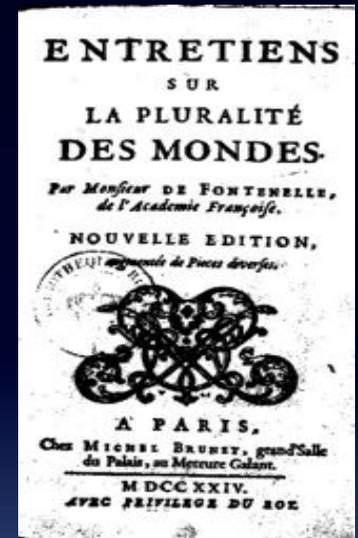
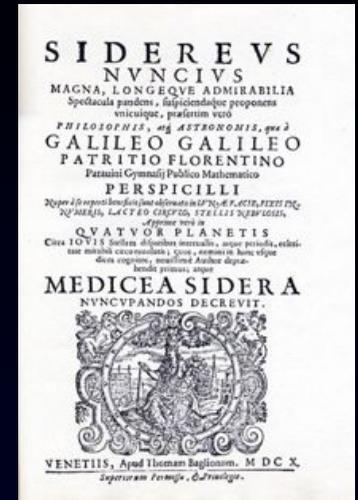
La Voie Lactée

« La Voie Lactée n'est autre, en effet, qu'un amas d'innombrables étoiles disséminées en petits tas »

Galilée, 1610, Le messager céleste

« Les petits tourbillons de la Voie de lait sont si serrés qu'il me semble que d'un monde à l'autre on pourrait se parler, ou même se donner la main. Du moins je crois que les oiseaux d'un monde passent aisément dans un autre, et que l'on y peut dresser des pigeons à porter des lettres, comme ils en portent ici dans le levant d'une ville à une autre. »

Fontenelle, 1686, Entretiens sur la pluralité des mondes - 5^{ème} soir



Spéculations sur la Voie Lactée...

□ Le centre de la Galaxie ?

□ Thomas Wright (1750):

- La Voie Lactée est une coquille, le soleil dans l'épaisseur
- Le Soleil n'est donc pas au centre de l'univers
- Certaines des nébuleuses sont des systèmes lointains

□ Kant (1755, suivant Wright):

- La Voie Lactée : un disque vu de l'intérieur
- Le soleil n'a pas de place particulière (Sirius au centre?)

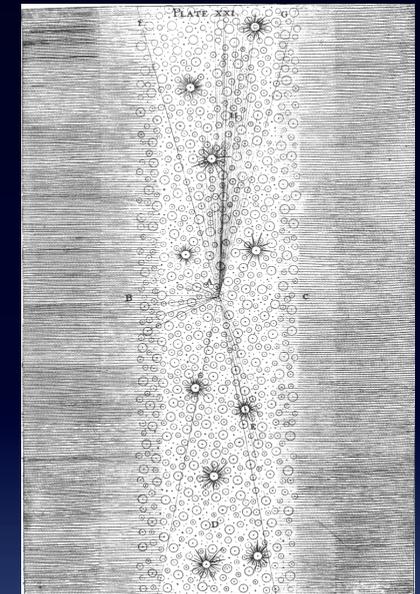
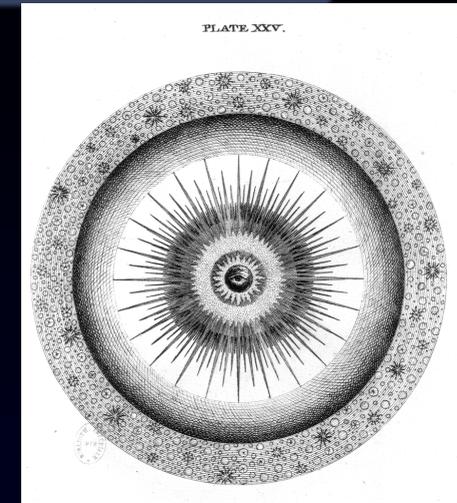
□ La taille de la Galaxie ?

□ Lambert (1760, indépendamment):

- Un système oblong, plat, fini (> 150000 « siriomètres »)
- Le soleil dans un sous-système d'Orion
- Un univers avec un grand nombre de voies lactées

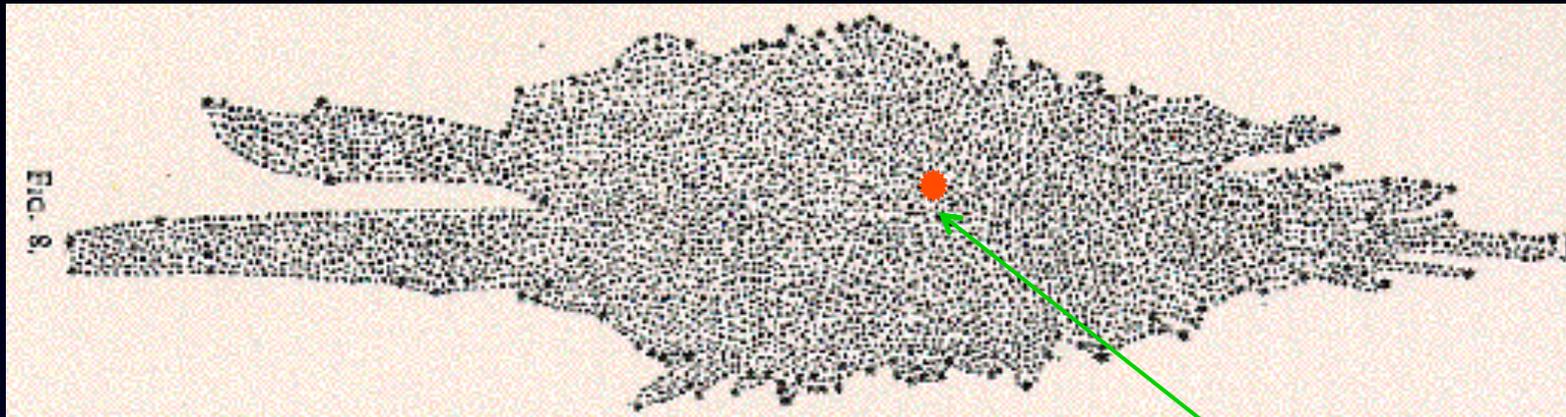
□ Herschel (1785)

- Une démarche observationnelle rigoureuse



Notre Galaxie sans distances

Forme de notre Galaxie dessinée par William Herschel (1785) à partir de dénombrements d'étoiles



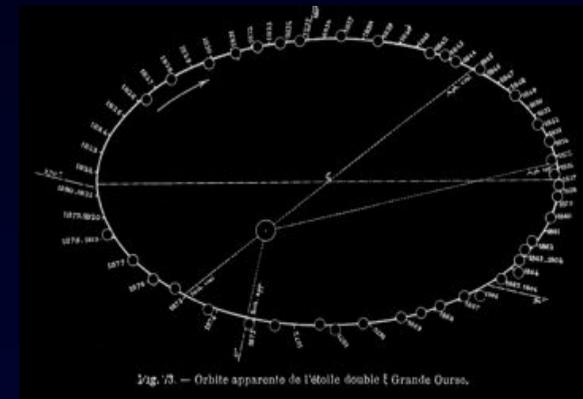
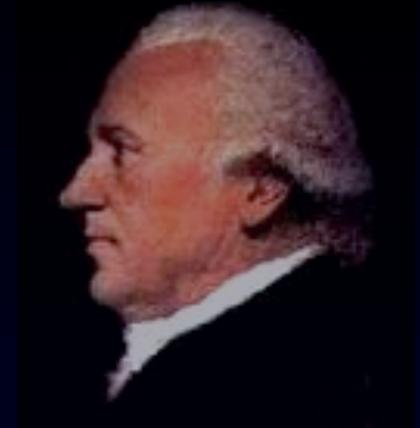
Hypothèses fâcheuses:

- Les étoiles sont réparties uniformément
- L'espace interstellaire est transparent
- On peut observer toutes les étoiles jusqu'aux confins du système
- Chaque magnitude double la distance
- Les étoiles ont toutes la même luminosité intrinsèque

Manque crucial: des distances correctes

Les étoiles binaires

- Utiliser les étoiles doubles pour rechercher des parallaxes n'est pas l'idée initiale de Herschel
 - Suggestion de Bode: étude du mouvement relatif des couples de luminosité différente
 - Herschel (1782) se met à mesurer méticuleusement un grand nombre de couples, en commençant le 11 novembre 1776 avec θ 1 Orionis,
- Paradoxalement, Herschel n'allait pas contribuer à la distance des étoiles, mais faire bien plus!
 - En 1803, il fournit une liste de couples orbitaux, Castor en tête.
 - Fin de la controverse sur la nature physique d'un certain nombre de systèmes
 - Voie ouverte pour prouver à la fois que la loi de la gravitation de Newton était réellement universelle (valable hors de notre système solaire)
 - Les étoiles pouvaient donc avoir une magnitude absolue différente



Parallaxes, tiercé gagnant...

□ Bessel

- Commence le 18 août 1837, publication déc. 1838
- Héliomètre 4" de Königsburg (Fraunhofer)
- 61 Cygni, parallaxe précise à 10% près



□ Henderson

- Troughton instrument au Cap
- Deux mois après Bessel
- α Centauri, parallaxe précise à 25% près



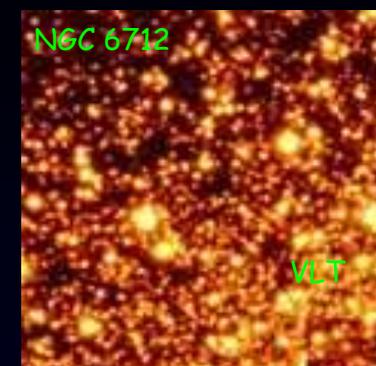
□ Struve

- Lunette 9" Dorpat (Fraunhofer)
- 1837 puis fin 1839
- Vega, parallaxe en réalité 2 fois plus grande (correcte en 1837!)



L'évolution des distances estimées

Nom	Date	10 ⁹ km
Aristarque	- 280	"immense" !
Ptolémée	150	0.13
Copernic	1500	"immense" !
Tycho Brahe	1580	0.09
Képler	1621	217 / 383
Newton	1685	140 000
Bessel-Struve-Henderson	1838-39	> 30 000
Étoile	1^{ères} valeurs (milliard km)	Hipparcos
Sirius (Newton)	130 000	81 370 ± 340
α Centauri (Henderson)	31 000	41 570 ± 80
61 Cygni (Bessel)	98 500	107 450 ± 560
α Lyrae (Struve)	117 000	239 330 ± 1000

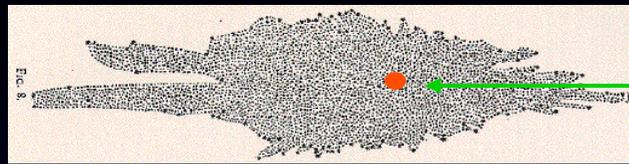


Pourquoi le « parsec » ?

- ❑ L'année-lumière est utilisée depuis longtemps
 - ❑ En 1694, Roberts: « *la lumière mets plus de temps à venir depuis les étoiles que nous à voyager vers les Caraïbes* » (6 semaines)
 - ❑ Bode, Arago, Flammarion idem, le mot « année-lumière » apparaît fin 19^{ème}
- ❑ La distance de Sirius également
 - ❑ Herschel utilise la distance de Sirius en 1785 comme étalon
 - ❑ Seeliger utilise (1898-1909) une « Siriusweite »
- ❑ Mais les parallaxes arrivent
 - ❑ Kobold (1906) définit une « Sternweite » = 1 pc
 - ❑ Turner propose « PARallax one SECond of arc » en 1913
 - ❑ Pas vraiment accepté jusqu'à 1928
 - ❑ Ce à quoi nous avons échappé:
 - ❑ Un macron = un astron = une Sternweite = un parsec
 - ❑ Une année-lumière = 0.3066 parsec
 - ❑ Un Siriusweite = 5 parsecs
 - ❑ Un siriomètre = 4.8482 parsecs = 10^6 A.U.
 - ❑ Un Andromède = 490 parsecs (pour Very en 1911; vraie distance ~ 778000 pc!)

Notre Galaxie : forme ? taille ?

Au cours des siècles ...

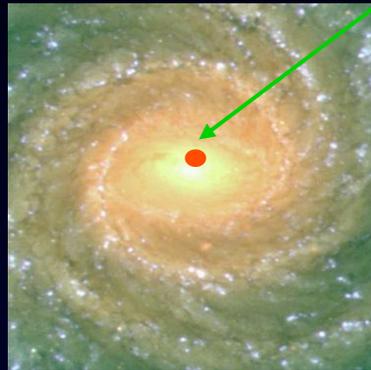


1785 Herschell

Soleil

Galaxies extérieures petites et proches

20 kpc



1922 Kapteyn

90 kpc

1915 Shapley



De nos jours: 30 kpc ~ 100 000 années-lumière

Le grand débat, 1920

□ Les bévues des observateurs

- van Maanen (1916-): mouvements propres trop grands
 - Si la galaxie était extérieure, alors la vitesse de rotation serait $> c$
- Bohlin (1907): la nébuleuse d'Andromède M31 à... 6 pc !

□ La révolution « galactocentrique »

- Pour Shapley, le centre est celui des amas globulaires,
- Le soleil à ~ 14 kpc...
 - mais la galaxie, grande, contient ces nébuleuses (au contraire de Curtis)

□ Hubble, lettre à Shapley le 19 février 1924

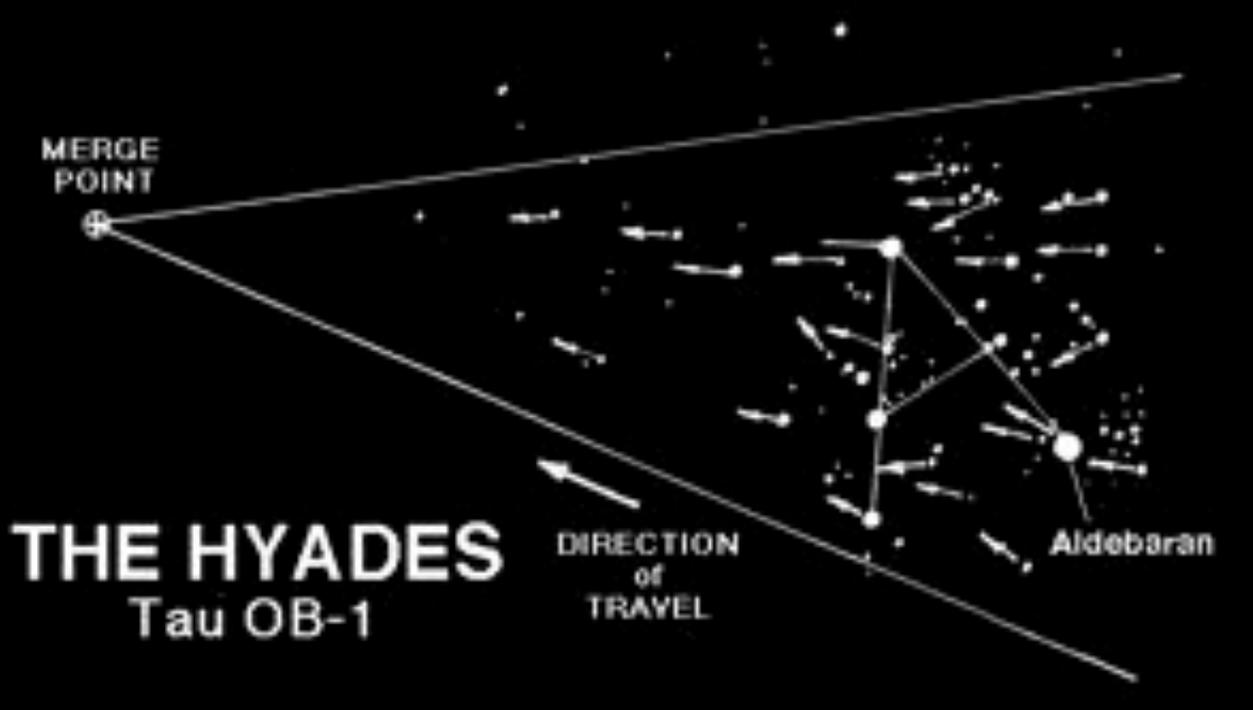
- Via des céphéides dans M31: distance = 300 kpc
- Shapley: « voici la lettre qui a détruit mon univers... »

L'imagination au pouvoir...
pour suppléer aux parallaxes inconnues

Nouvelles méthodes angulaires...

Nouvelles méthodes angulaires...

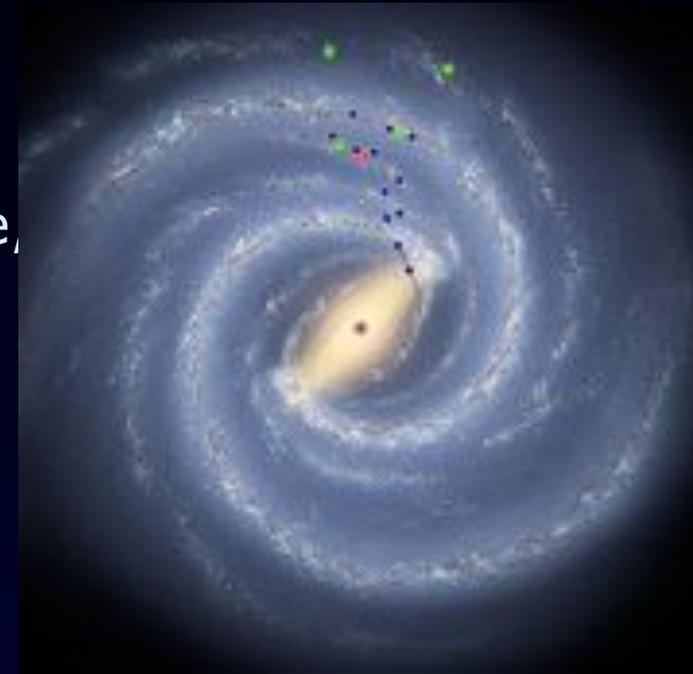
La méthode du point convergent



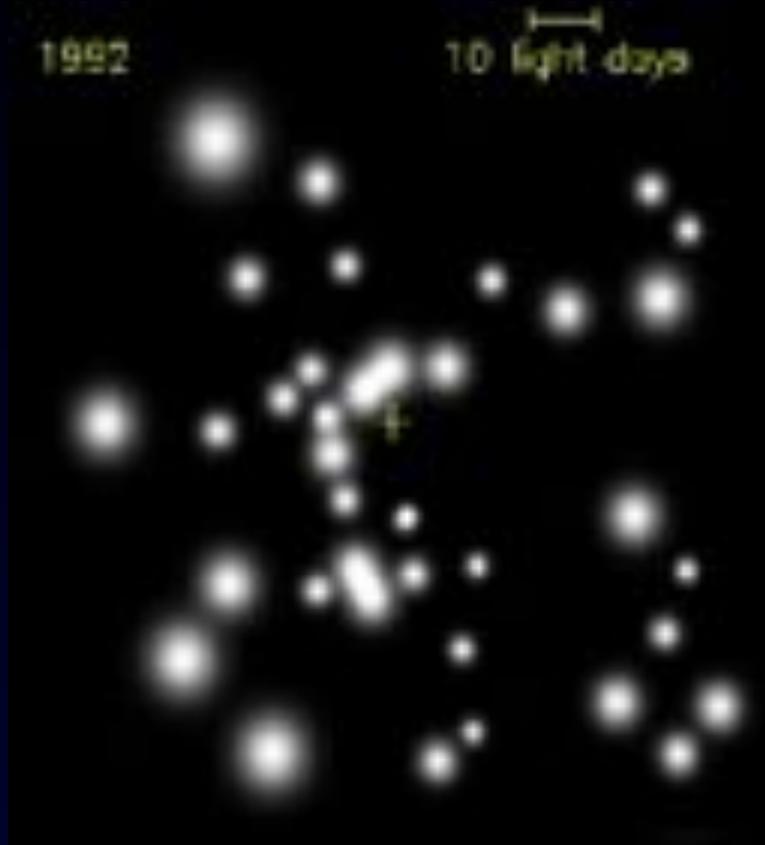
- Valable uniquement pour les amas ouverts
- Analogue aux platanes à l'horizon de la route
- Besoin de l'angle et de la vitesse radiale moyenne
- Boss (1908) pour les Hyades

Parallaxes séculaires/statistiques

- ❑ Le soleil bouge vers l'apex (Herschel)
 - ❑ ~ 13 km/s soit 2.7 UA/an
 - ❑ car V_T (km/s) = $4.74 [\mu/\varpi$ UA/an]
 - ❑ Donc une base de 27 UA en 10 ans
 - ❑ Prendre un groupe d'étoiles de même type, même magnitude (même distance)
 - ❑ moyenner leur mouvement propre
 - ❑ C'est celui du soleil
- ❑ Parallaxes statistiques
 - ❑ Chaque étoile a un mouvement propre
 - ❑ En moyenne, mouvement radial identique au mouvement transverse
 - ❑ Le mouvement transverse en unité angulaire, le mouvement radial en km/s
 - ❑ Le rapport donne la distance



Parallaxes dynamiques



Distance au centre galactique: $8 \pm 0.4 \text{ k pc}$
 Masse trou noir central de masse $3 \cdot 10^6 \text{ Msol}$

- Valable uniquement pour les étoiles binaires
 - Visuelle
 - Visuelle+spectroscopique
 - Spectroscopique+eclipse
- Utilise la troisième loi de Kepler
 - Le demi-grand axe de l'orbite et la période sont reliés à la masse totale
 - $a^3 / P^2 = M_1 + M_2$

Parallaxe d'expansion: les novae

□ V445 Puppis

- Probablement une naine blanche accrétant le matériel d'une étoile à hélium
- Précurseur de supernova Ia ?

□ Méthode usuelle

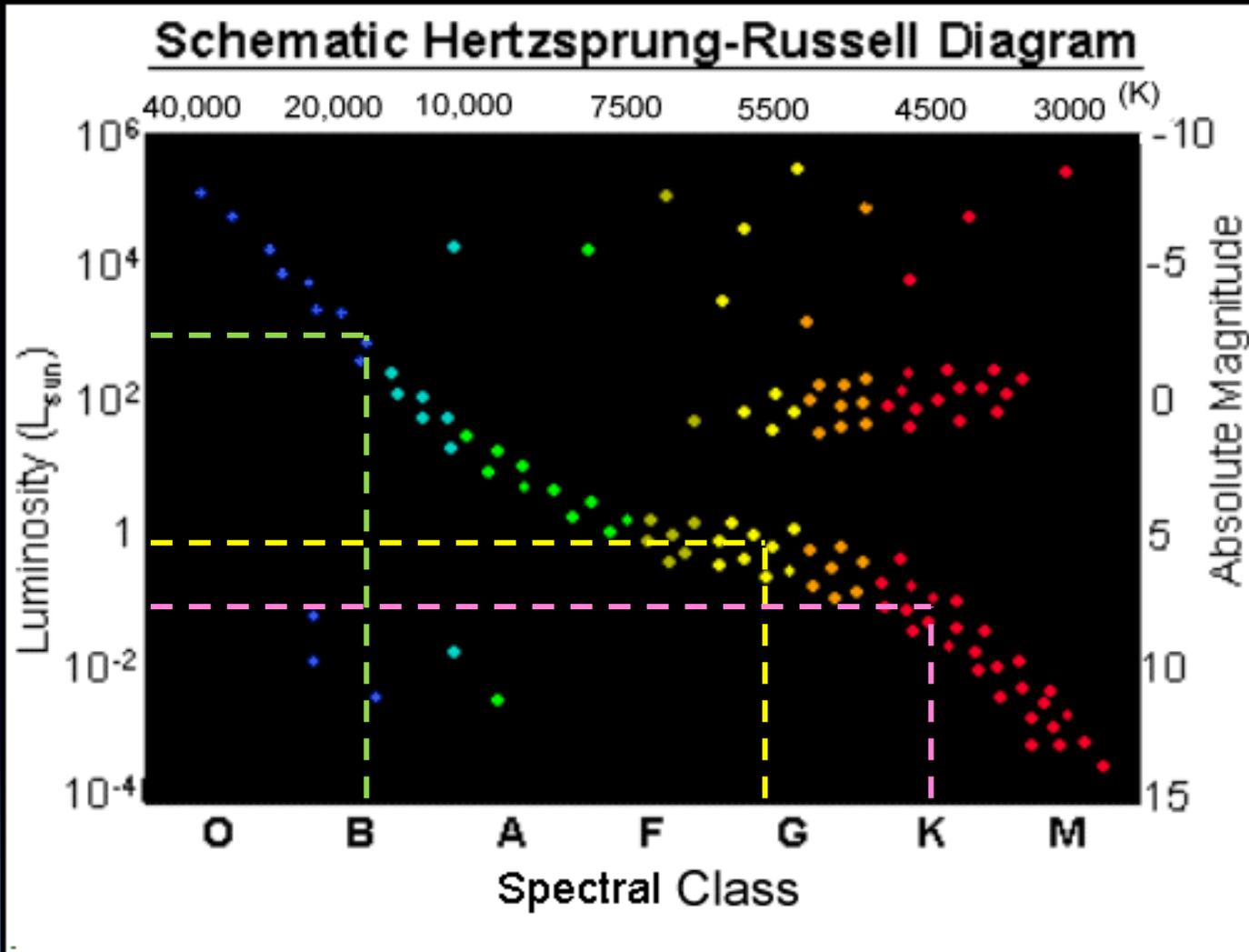
- Mesure de la taille angulaire de l'enveloppe
- Mesure de la vitesse radiale fois le temps d'expansion
- Rapport entre les deux: la parallaxe



Calibrations de luminosité

Calibrations de luminosité

“Parallaxe spectroscopique”

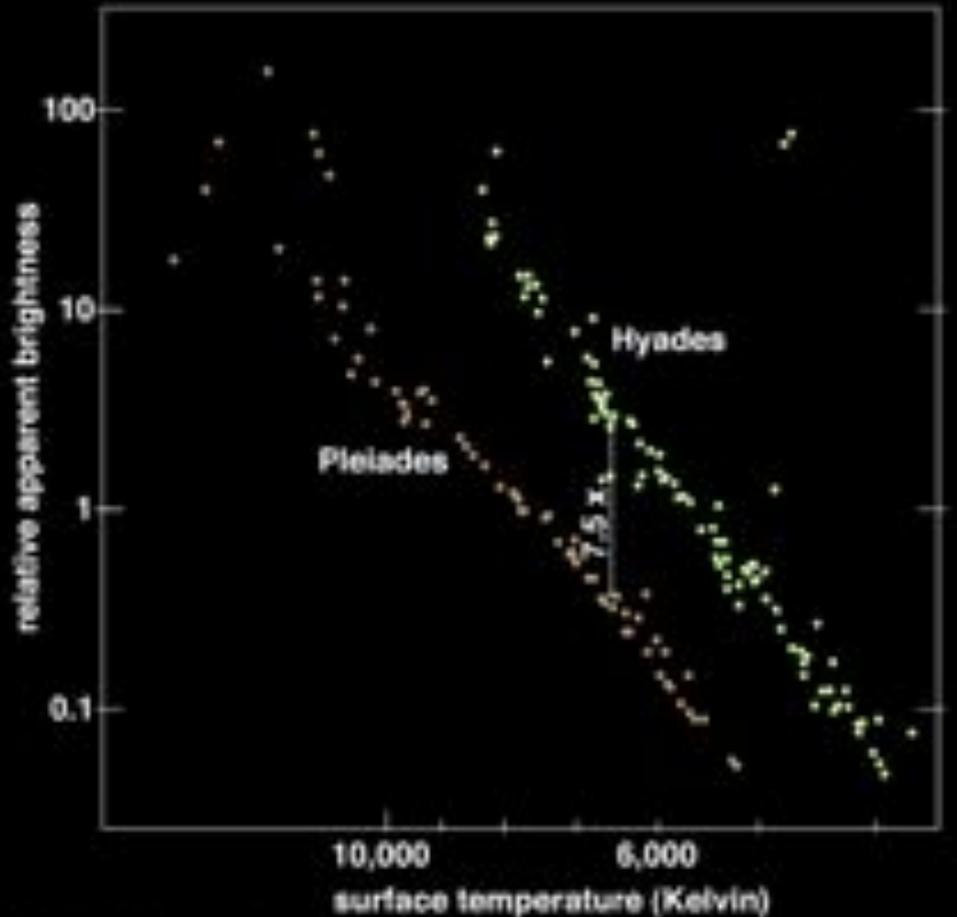


G2: $L \approx L_{\odot}$

B5: $L \approx 800L_{\odot}$

K5: $L \approx 0.1L_{\odot}$

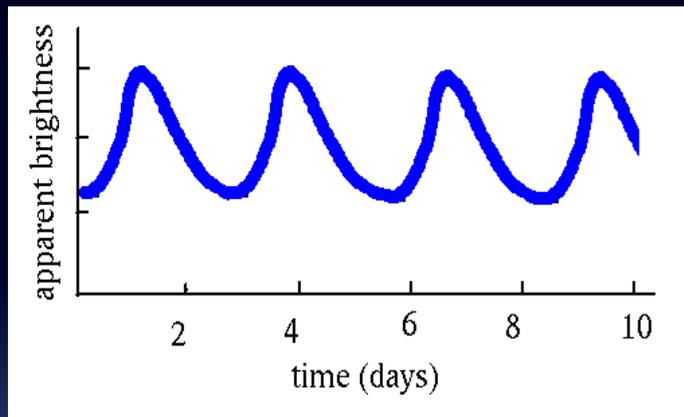
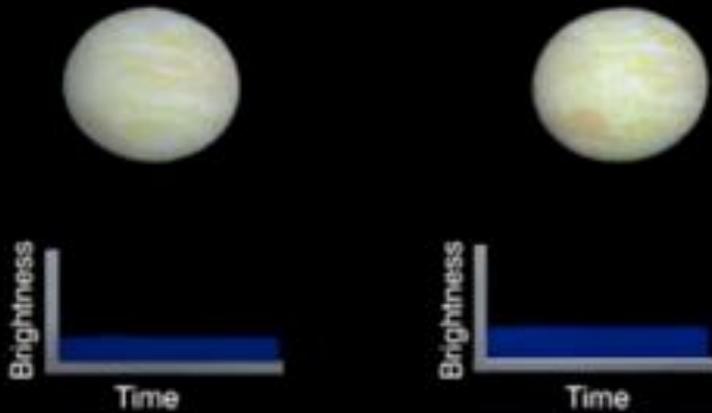
Ajustement de séquence d'amas



- Ajustement vertical (m-M)
 - Pleiades 2.75 x plus lointaines que les Hyades
 - Car $(2.75)^2 = 7.5$ x moins brillantes
- Problèmes de
 - métallicité,
 - extinction

Copyright © Addison Wesley

Période-Luminosité des céphéides



période
↓
luminosité absolue
+
luminosité apparente
↓
distance

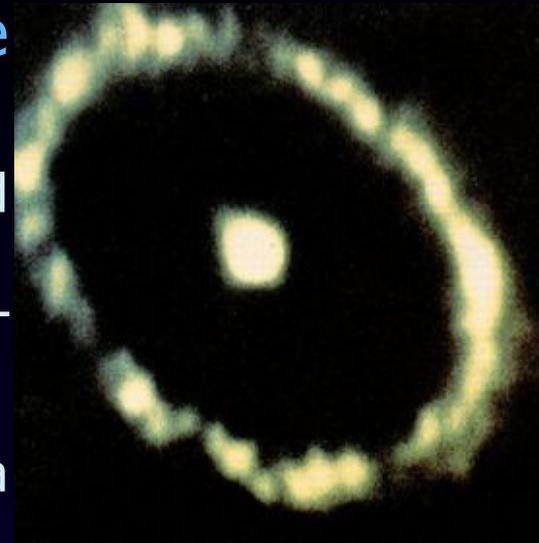
- Henrietta Leavitt (1868 – 1921)
 - Volontaire en 1895
 - “Calculatrice” de magnitudes
 - Permanente 7 ans plus tard, salaire mesquin
 - Prouve la relation P-L dans les Nuages de Magellan en 1912
 - La base de la révolution de Hubble



Supernovae

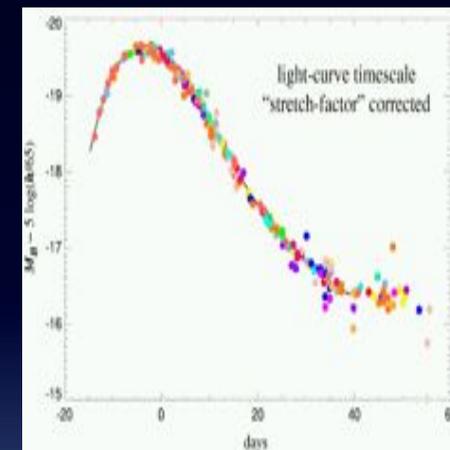
□ Supernova de type II (explosion d'une étoile massive en fin de vie)

- SN1987a ayant eu lieu en 1987 dans le grand nuage de Magellan
- image de la partie centrale observée par le HST dans les années suivantes: taille angulaire
- Parallaxe d'écho de lumière: temps d'arrivée de la lumière sur l'anneau: dimension linéaire



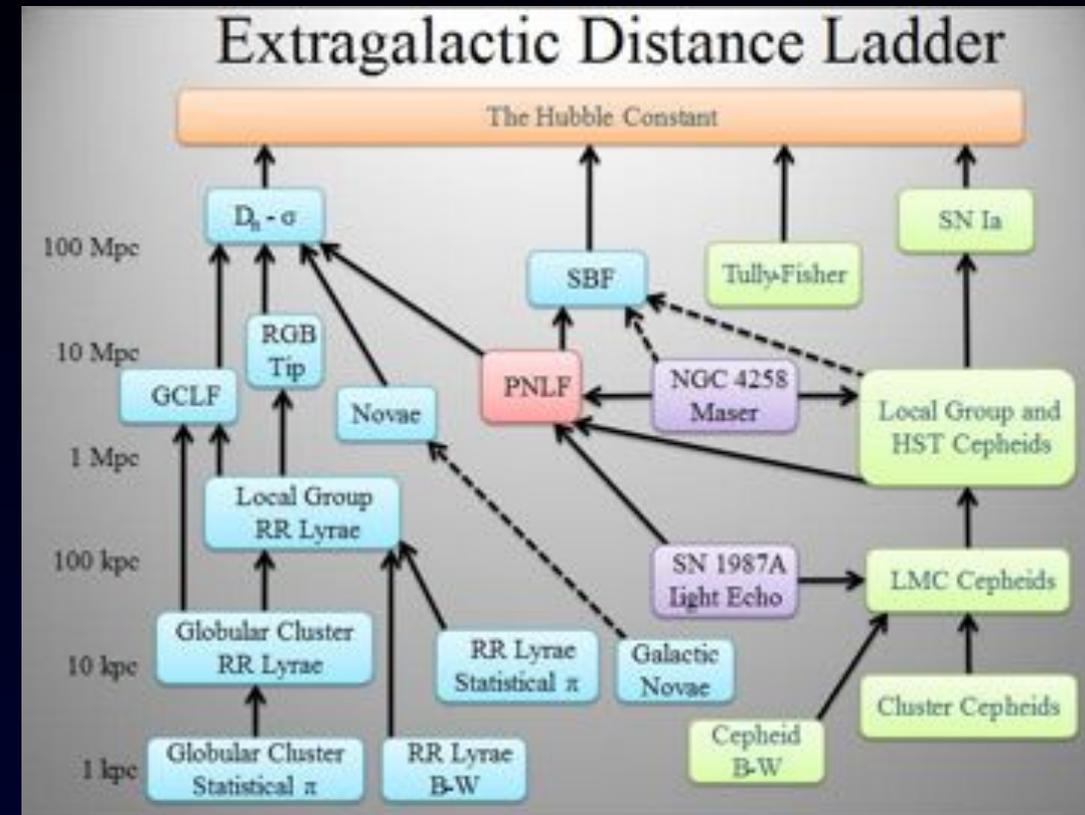
□ Supernova de type Ia

- explosion d'une naine blanche arrivant à la masse limite (1,4 MSoleil) de Chandrasekar par accrétion de matière dans un système binaire
- la magnitude absolue au maximum est constante
- phénomène très rare mais nombre d'étoiles/galaxie grand -> ≈ 1 supernova par siècle dans une spirale

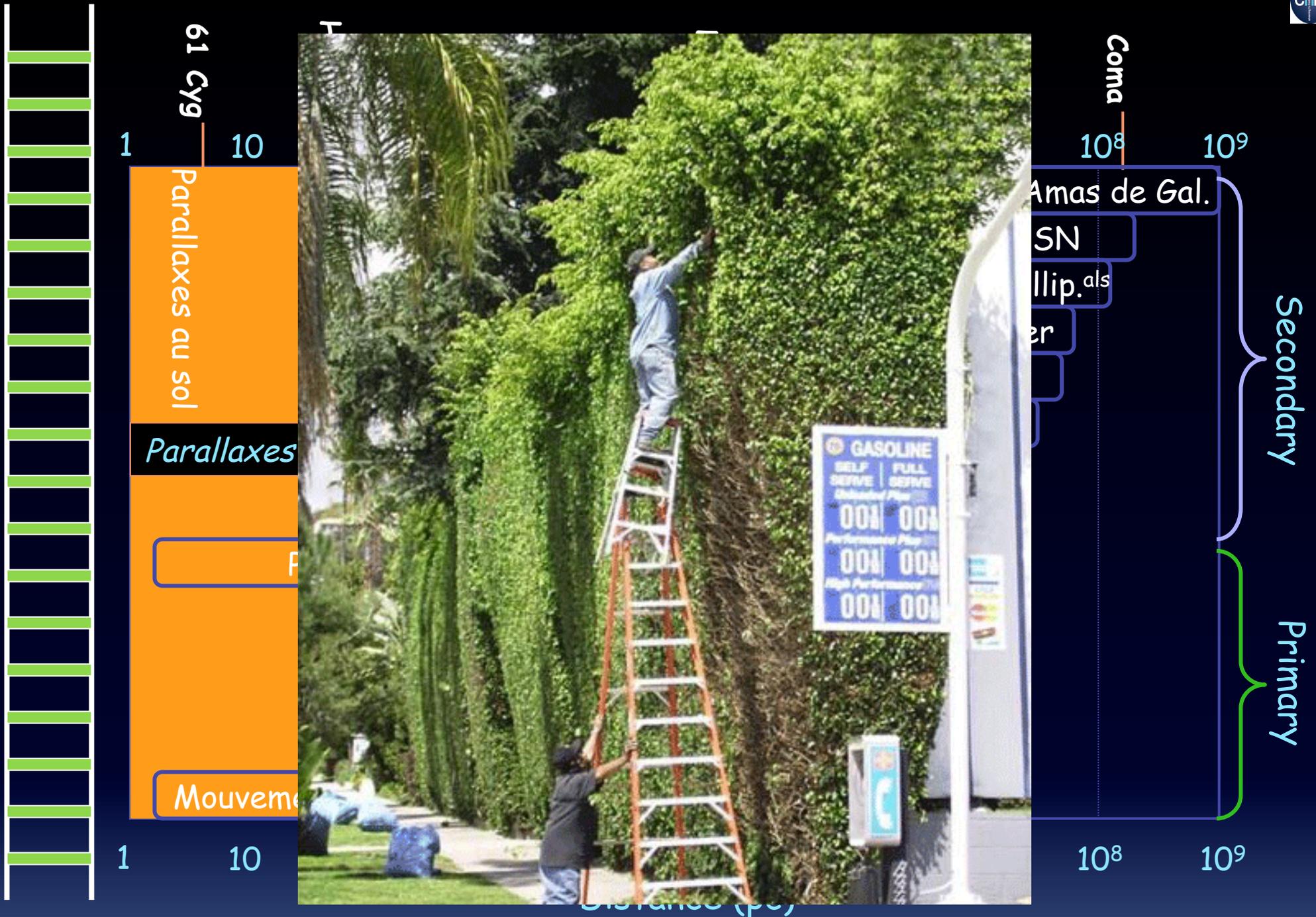


Distances extragalactiques

- ❑ L'unité astronomique: le jalon des distances astronomiques
- ❑ *La parallaxe annuelle: l'indicateur fondamental des distances galactiques et extragalactiques*
- ❑ *Indicateurs primaires de distances : basés sur les propriétés des étoiles*
- ❑ Indicateurs secondaires : basés sur les propriétés des galaxies
- ❑ Indicateurs tertiaires : basés sur les propriétés des amas de galaxies
- ❑ la loi de Hubble : $V = H_0 D$



L'échelle des distances



La révolution spatiale & européenne

Hipparcos

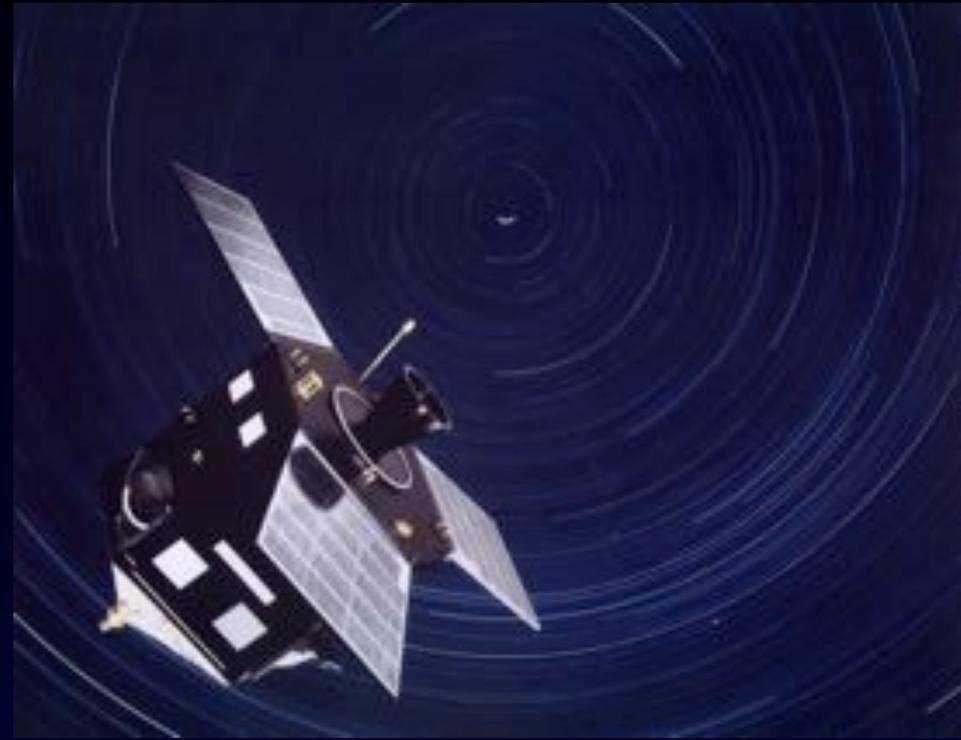
Hipparcos

Catalogues de parallaxes

1904: Newcomb:	72 étoiles
1924: Schlesinger First General Catalogue of trigonometric parallaxes	1870 étoiles
1963: Jenkins Yale Parallax Catalog	7 000 étoiles
1995: van Altena, Lee, Hoffleit Fourth General Catalogue of trigonometric parallaxes	8112 étoiles
1997: Perryman et al., ESA 1200 Hipparcos Catalogue	118 218 étoiles
2020: Gaia	10^9 étoiles

Hipparcos: enfin des parallaxes !

- ❑ **118 210 étoiles** (Input Catalogue) sélectionnées
 - ❑ sur programmes scientifiques
 - ❑ pour respecter les contraintes techniques du mode d'observation
- ❑ Pour la première fois des parallaxes absolues
- ❑ Et pour un grand nombre d'étoiles, sur presque tout le diagramme HR: 21 000 étoiles avec $\sigma_{\varpi}/\varpi < 10 \%$
- Luminosités, âges, mouvements, duplicité, variabilité

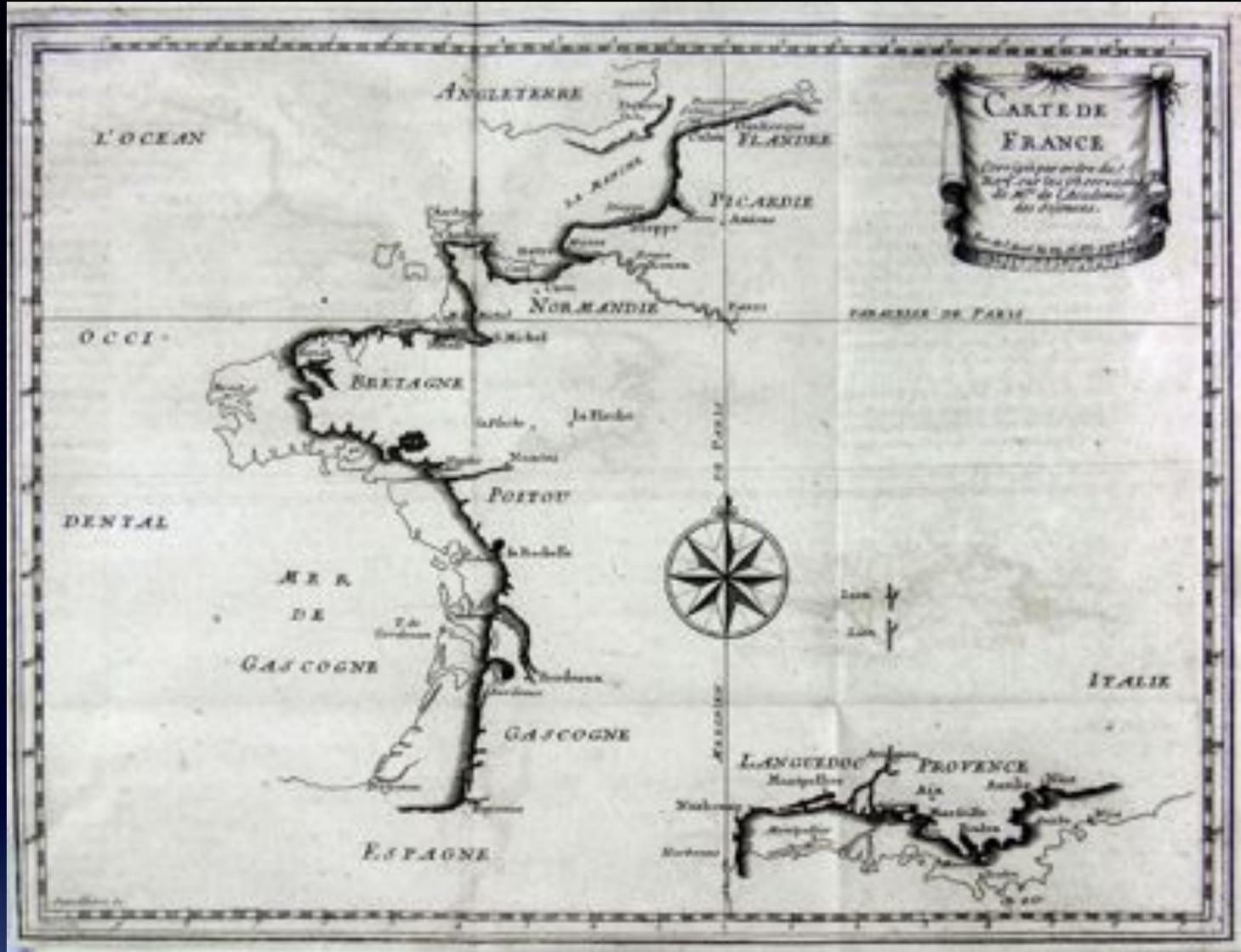


Hipparcos a montré

- ❑ que beaucoup de distances mesurées au sol étaient sous-estimées, de 10 à 15 %
- ❑ que même les étoiles supposées être à moins de 25 pc du Soleil étaient très mal connues
- ❑ que la densité locale en étoiles était sur-estimée
- ❑ que la distance du Grand Nuage de Magellan était encore très mal connue



Diminuer la taille de notre univers



... une tradition chez les astronomes!

Cassini / La Hire, 1693

Hipparcos a montré

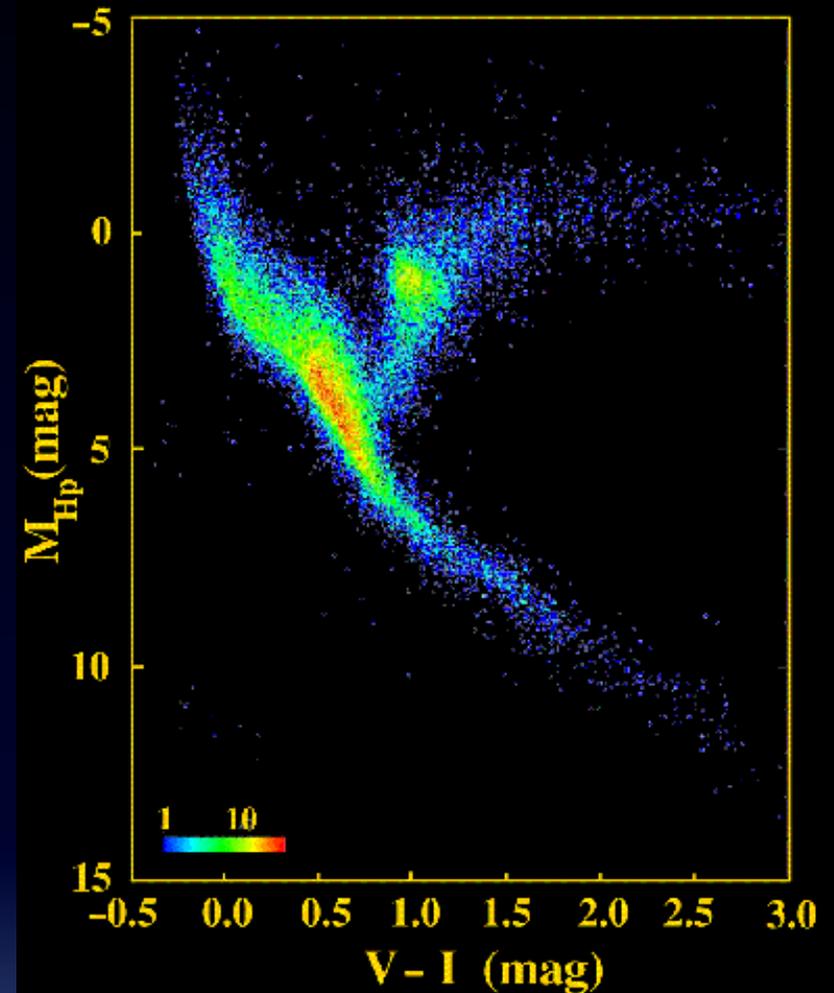
- ❑ que les **distances** d'amas globulaires étaient **sous-évaluées**
- ❑ que leurs **âges** étaient **sur-évalués** (max = 12 à 14 milliards d'années)
- ❑ **contradiction levée entre l'âge de l'Univers et l'âge des objets les plus vieux de notre Galaxie**



Hipparcos a montré

- Que la séquence principale était très fine pour les étoiles froides
- Que le « clump » des géantes était très concentré, même pour les étoiles de champ du voisinage solaire
- ...etc.
- L'astrométrie est devenue un outil majeur pour l'astrophysique: **plus de 6000 publications!**

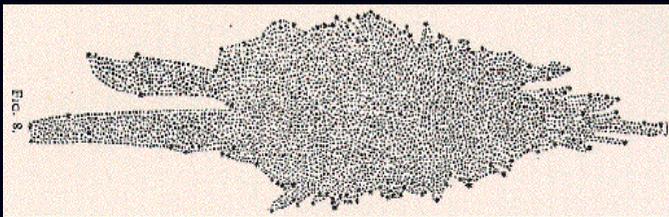
Hertzsprung - Russell: ($\sigma_{\pi} / \pi < 0.2$)



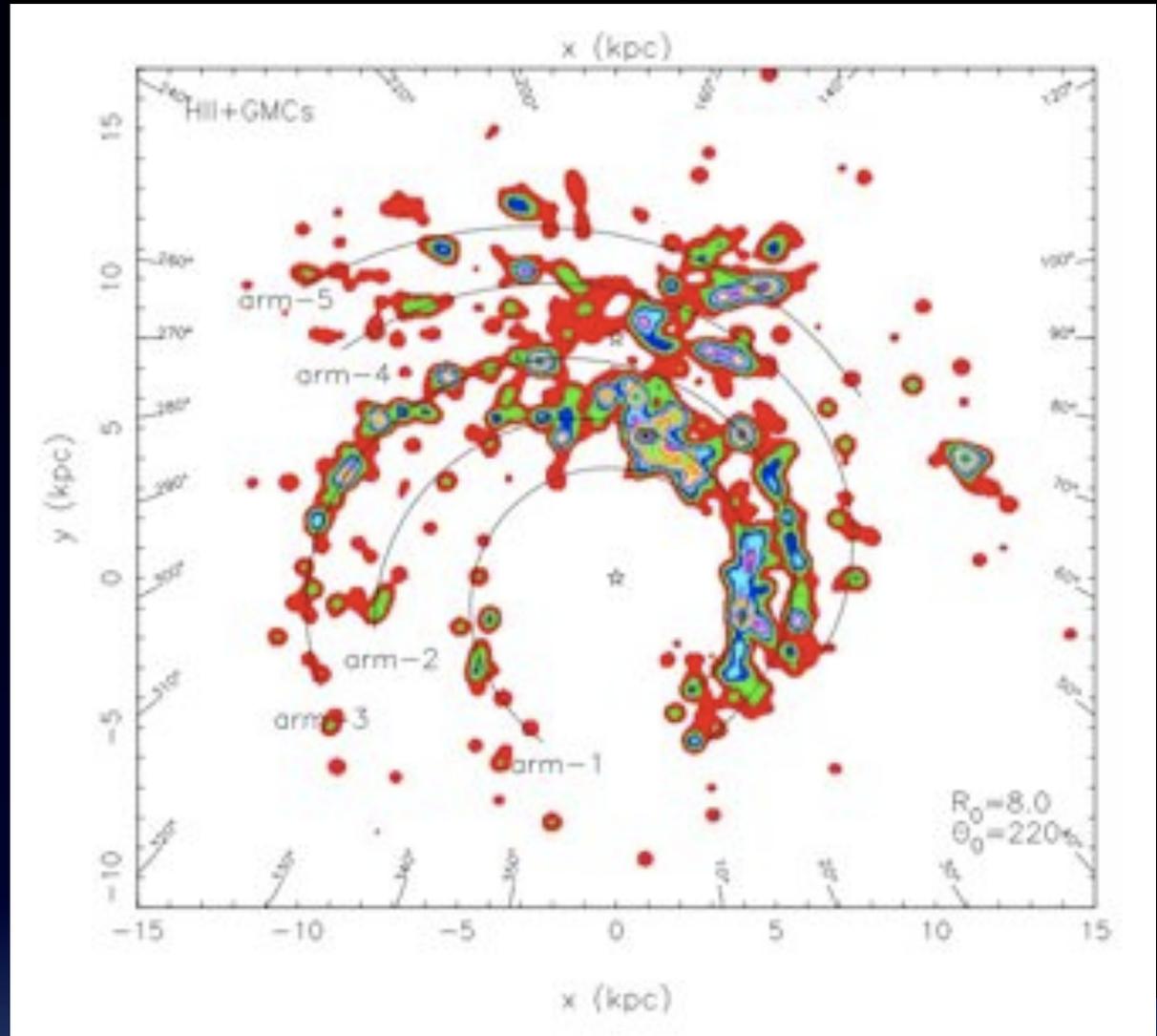
Ce n'est qu'un début, continuons...

Gaia
Gaia

L'état de nos connaissances



Herschel, 1785



Hou et al., 2009

d'Hipparcos à Gaia

**118 000 étoiles
dans le voisinage solaire**

jusqu'à la magnitude 12,4

21 000 distances à mieux que
10% ➤ 220 pc

photométrie en 3 couleurs
pas de vitesses radiales

aucune galaxie

1 quasar

48 astéroïdes + 3 satellites

confirmation de 5 exo-planètes

**plus d'un milliard d'étoiles
dans toute la Galaxie (au-delà)**

jusqu'à la magnitude 20-21

100 millions à mieux que 10%
➤ 15 000 pc

photométrie multi-couleurs
vitesses radiales

1 à 10 millions de galaxies

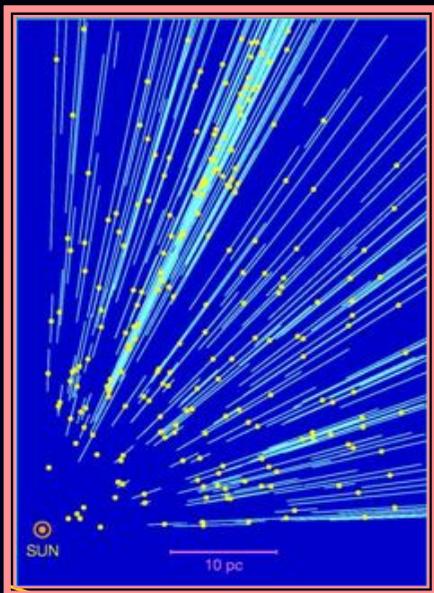
500 000 quasars

> 500 000 astéroïdes

2000 à 5 000 exo-planètes

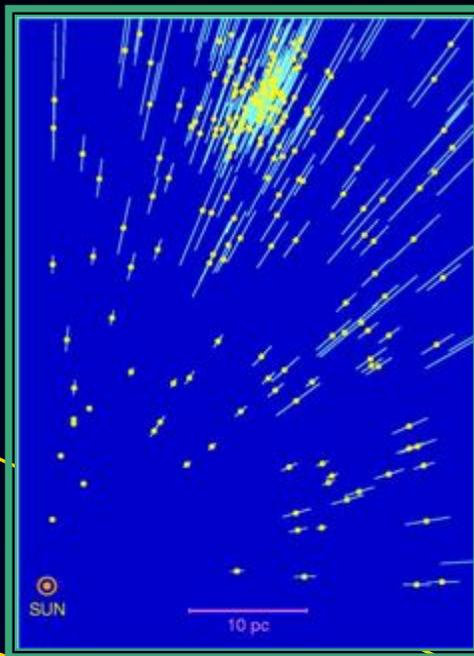
Les Hyades vues par les mesures de parallaxes

Sol



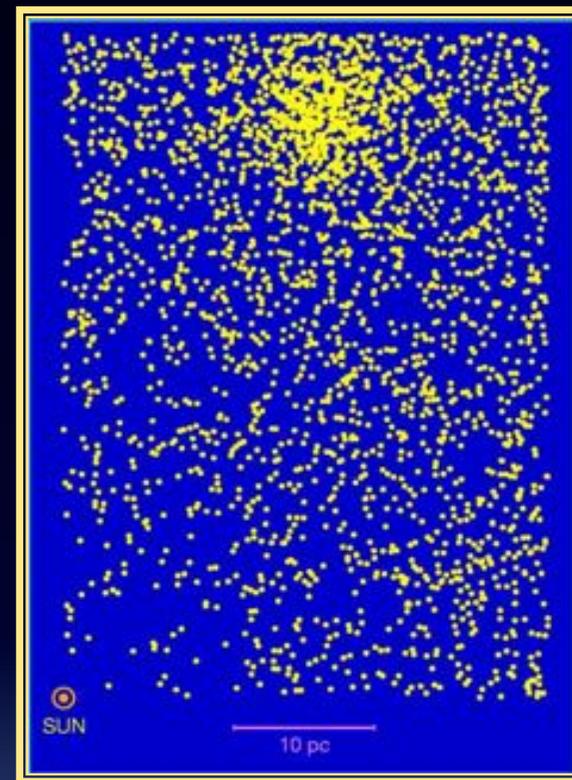
1960

Hipparcos



1990

Gaia



2015

Courtesy M. Perryman

Quelques légères complications...

Les étoiles de fond bougent

Les étoiles de fond sont à distance finie

Un objet peut être multiple (mouvement du photocentre)

Vitesse Radiale (effet Doppler)

Rotation terrestre (ou du satellite)

Cette binaire peut être variable

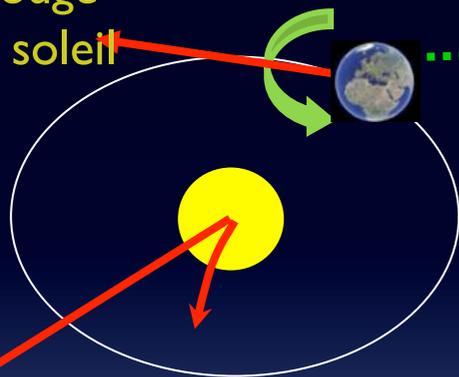
L'étoile bouge

La terre bouge autour du soleil

Courbure de l'espace-temps

Microlentille

Mouvement propre transverse

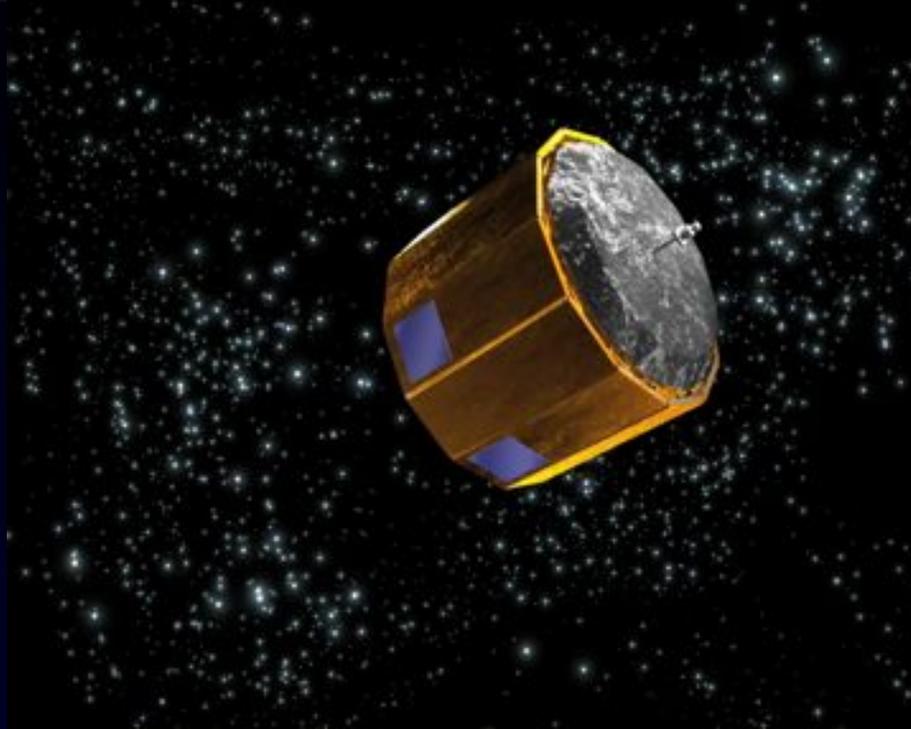
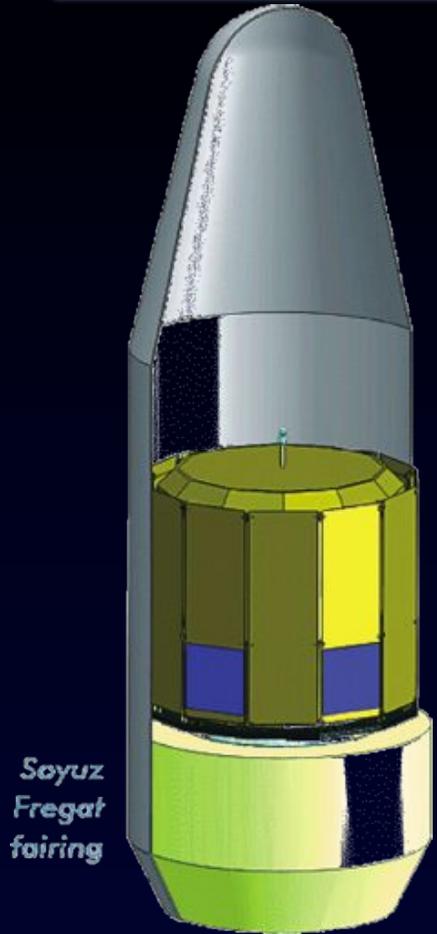


Le soleil bouge

et a un mouvement réflexe

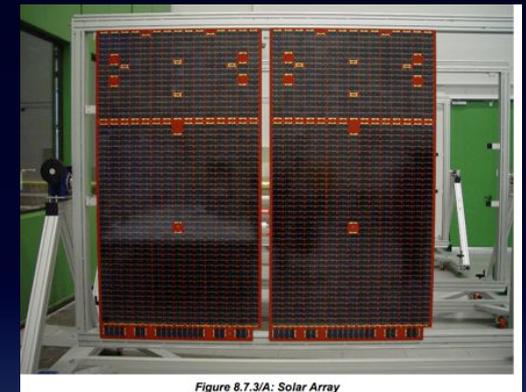
...Tout bouge!

Lancement et déploiement

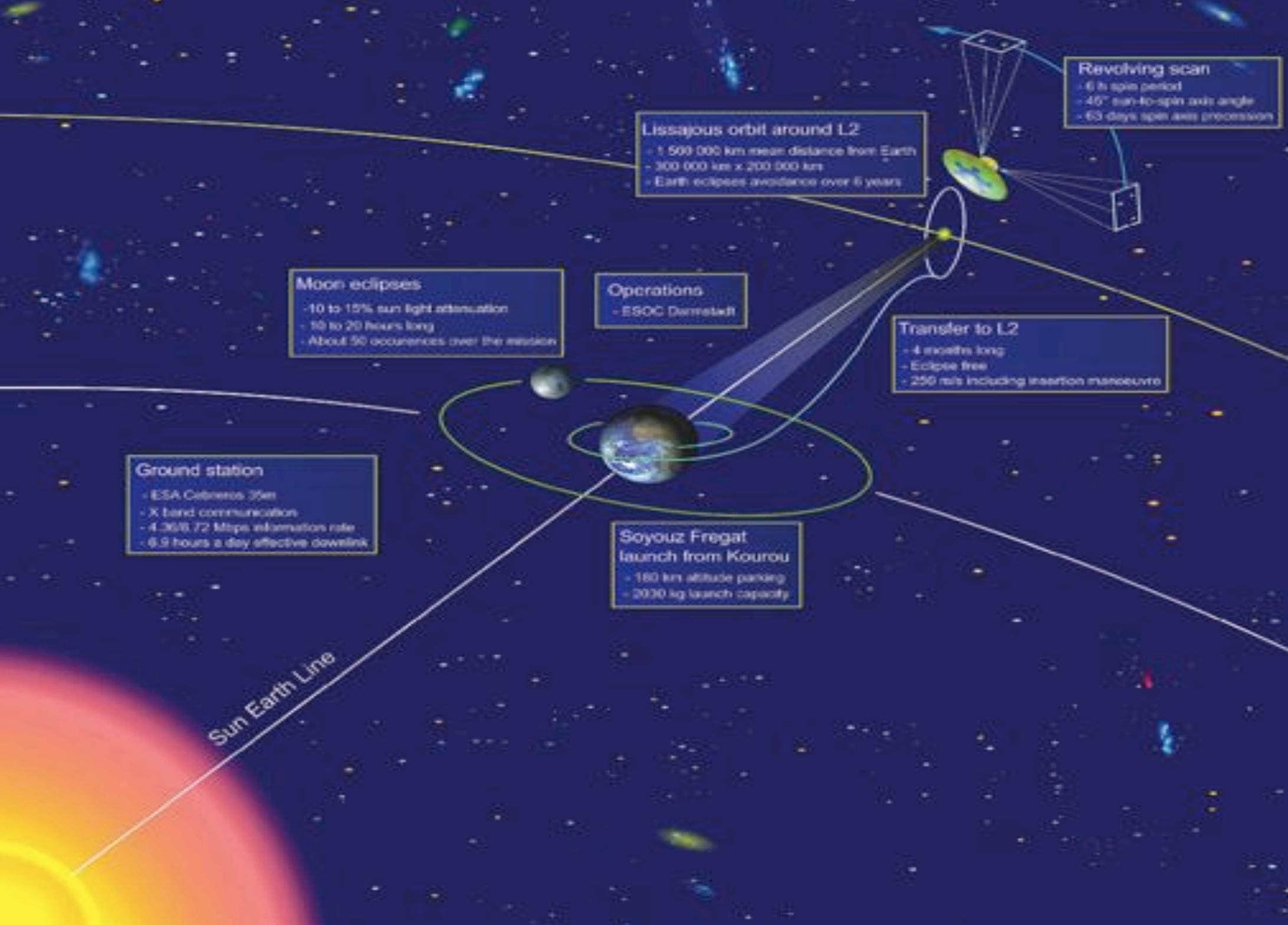


- Date: printemps 2012
- Durée: >5 ans
- Lanceur: Soyouz-Fregat
- Orbite: point L2
- Débit: 4 à 8.2 Mbps

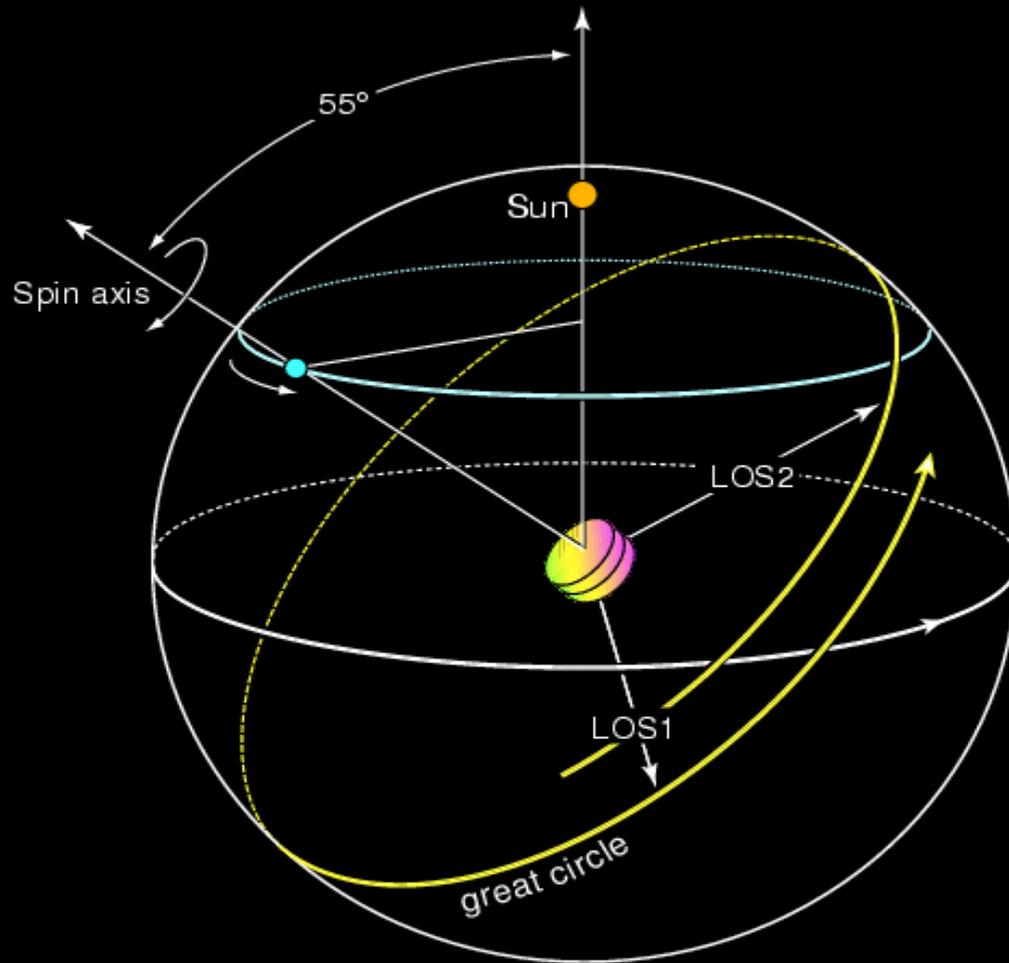
- Masse: 2 tonnes
- Puissance: 1900 W
- Hauteur instrument: 3m



Panneaux solaires

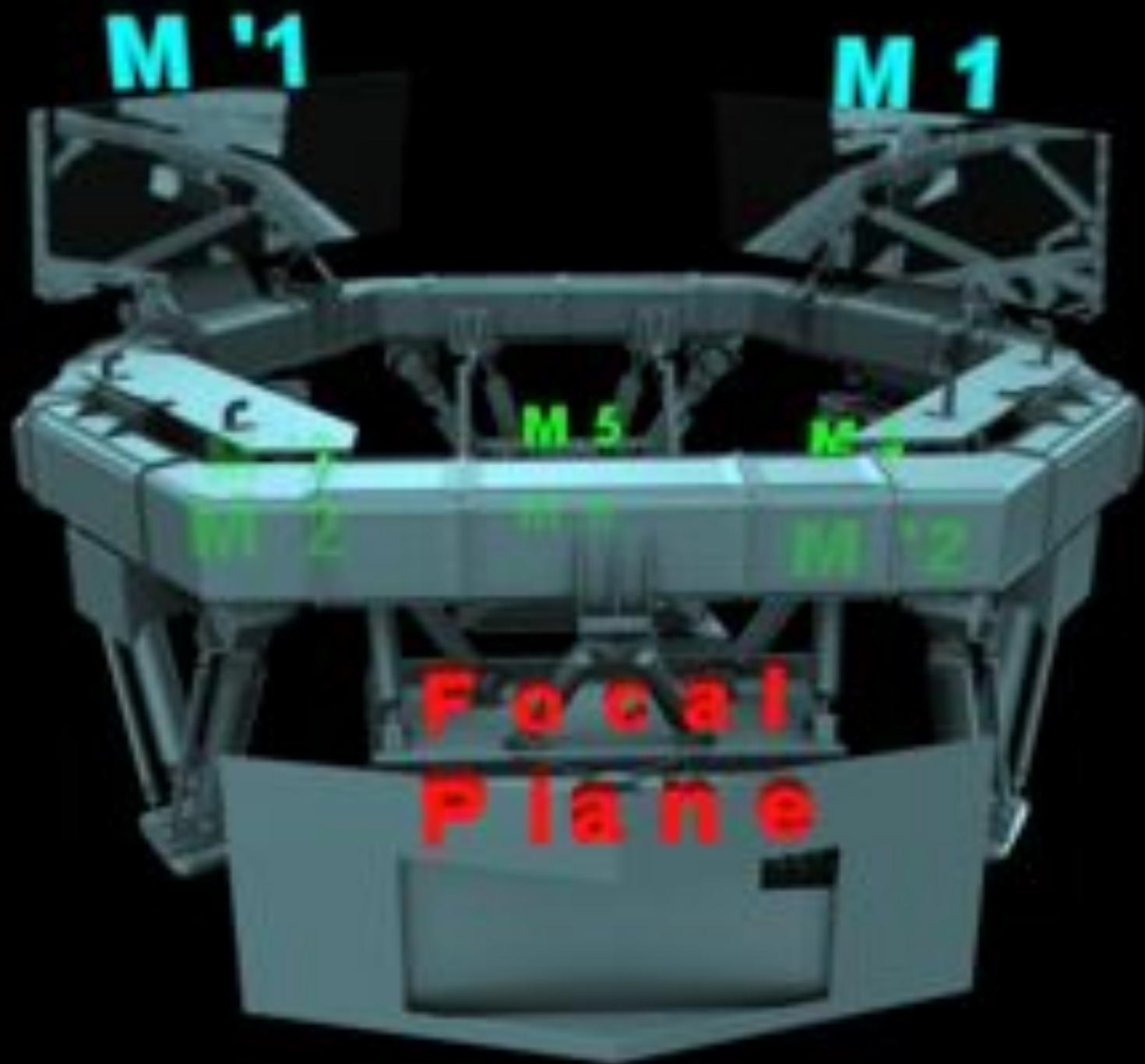


Loi de balayage

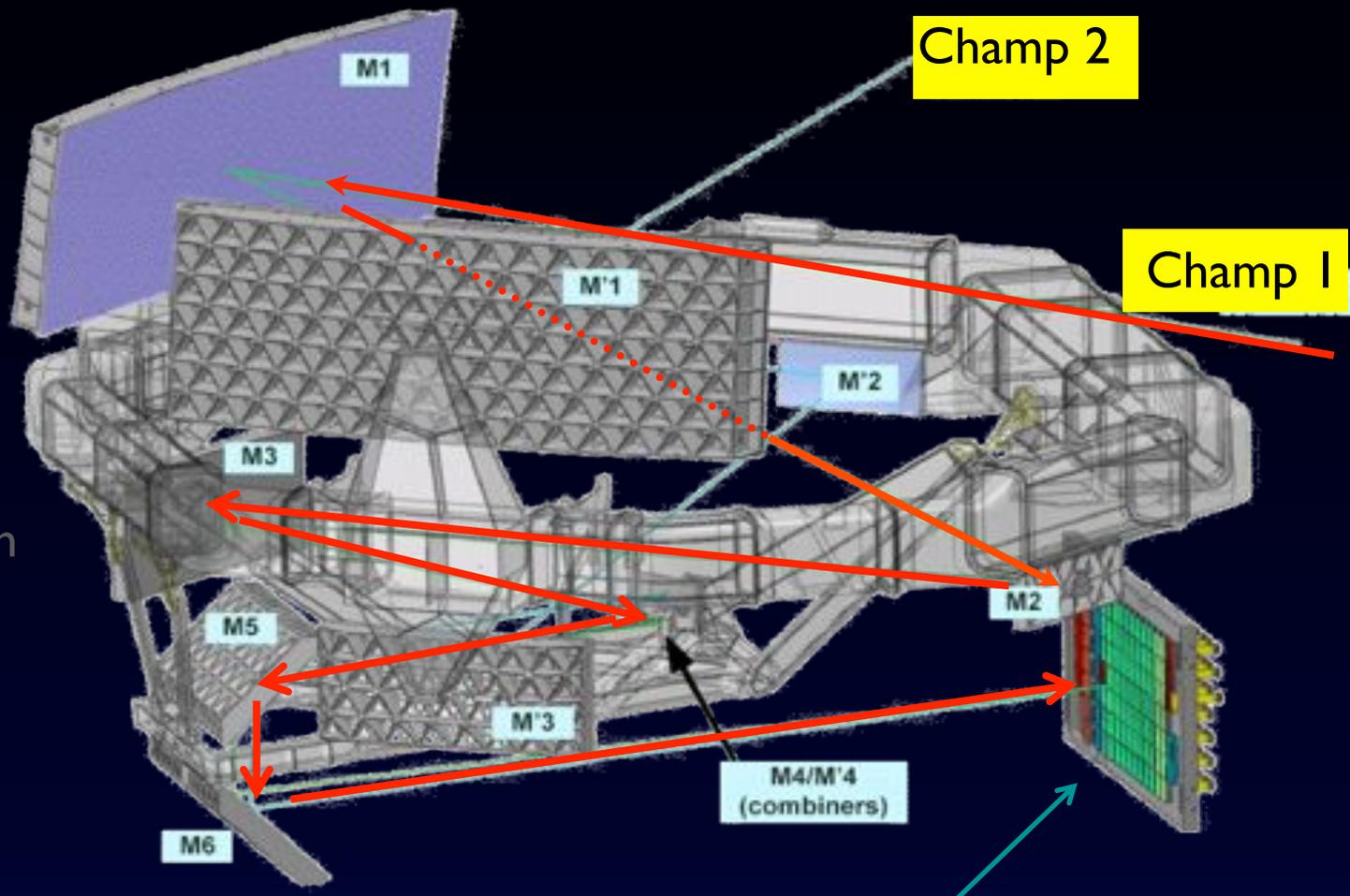


Vitesse de rotation:
60 arcsec/s
Période: 6 heures

Angle de base 106.5°
Champ 2 observé
106.5 mn après le
champ 1



Télescope



Miroirs primaires 1.45 x 0.5 m
 Angle de base 106.5 °
 Longueur focale 35 m

plan focal T = 170 K

Figure courtesy of EADS Astrium

Plan focal

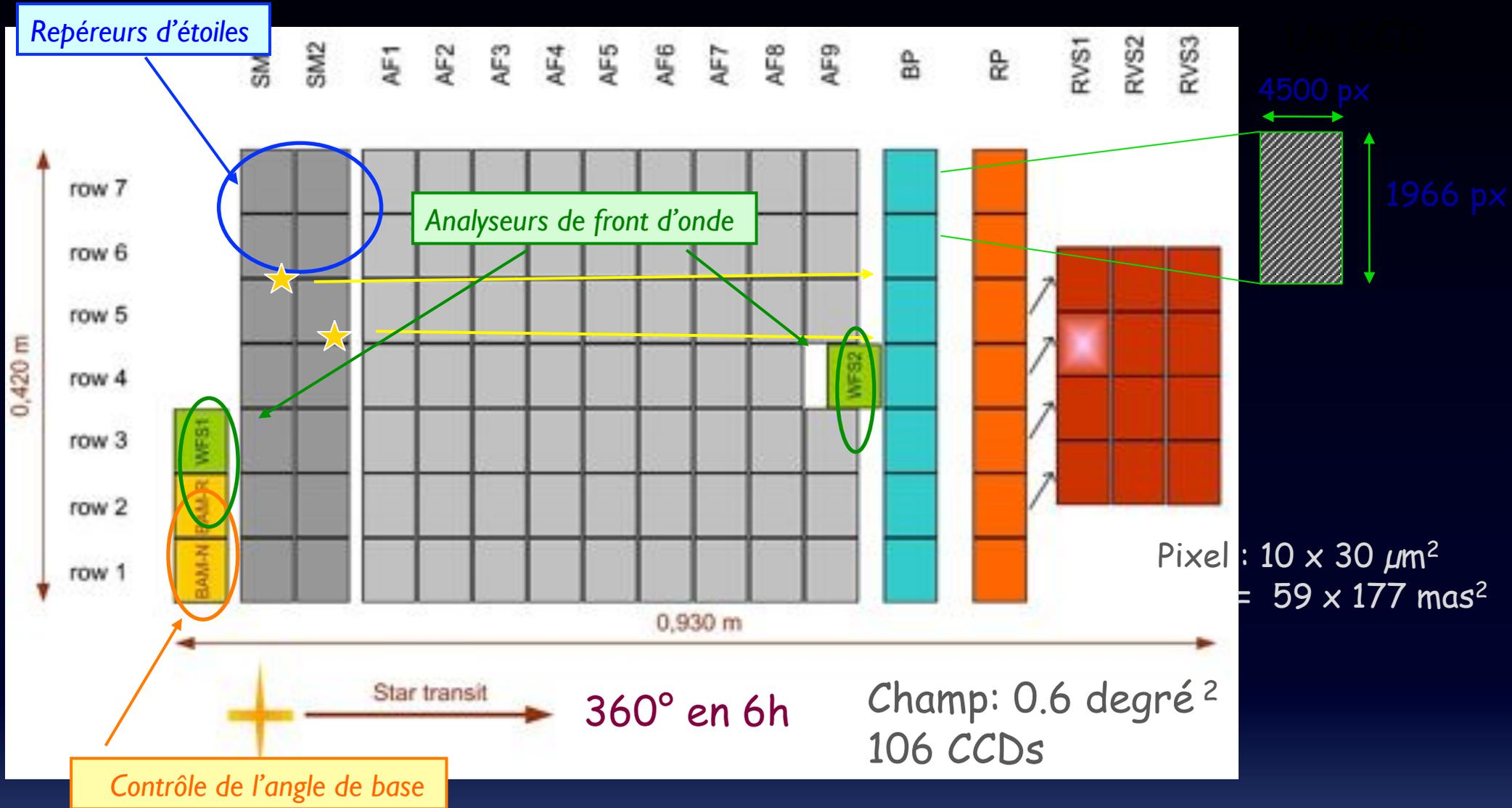


Figure courtesy of EADS Astrium

Le « modèle de Besançon »

- Une référence mondiale dans la synthèse de population stellaire
- Recrée notre Galaxie simulée
 - Aspects dynamiques et photométriques
 - La comparaison avec notre (vraie) Galaxie permet de déterminer les "ingrédients" du modèle!
- Indispensable pour préparer la mission Gaia
 - L'univers vu par l'instrument fournit des données de test pour les algorithmes
 - A également permis de dimensionner la mission pour les industriels



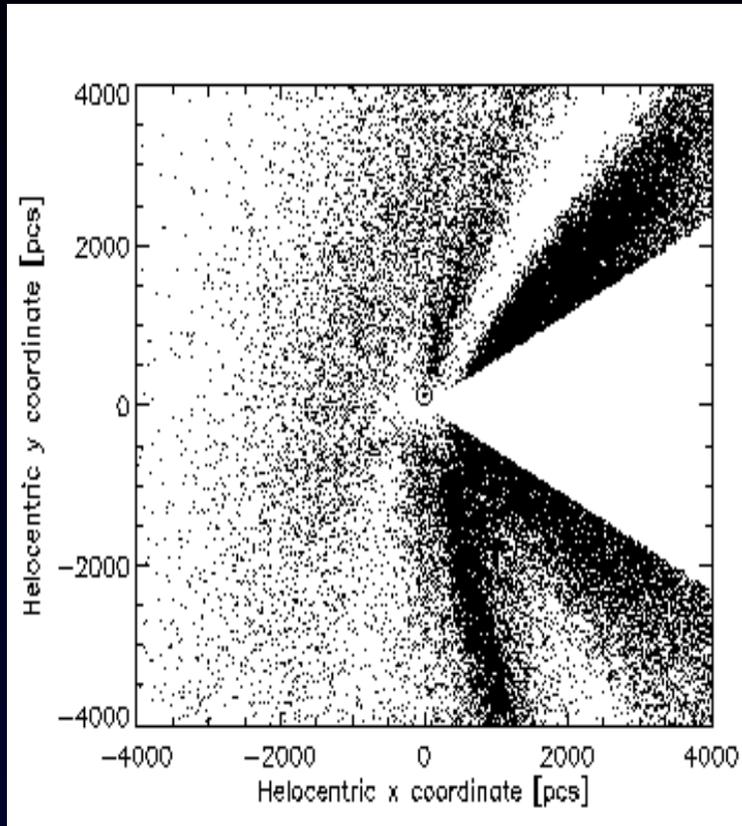


La science de Gaia

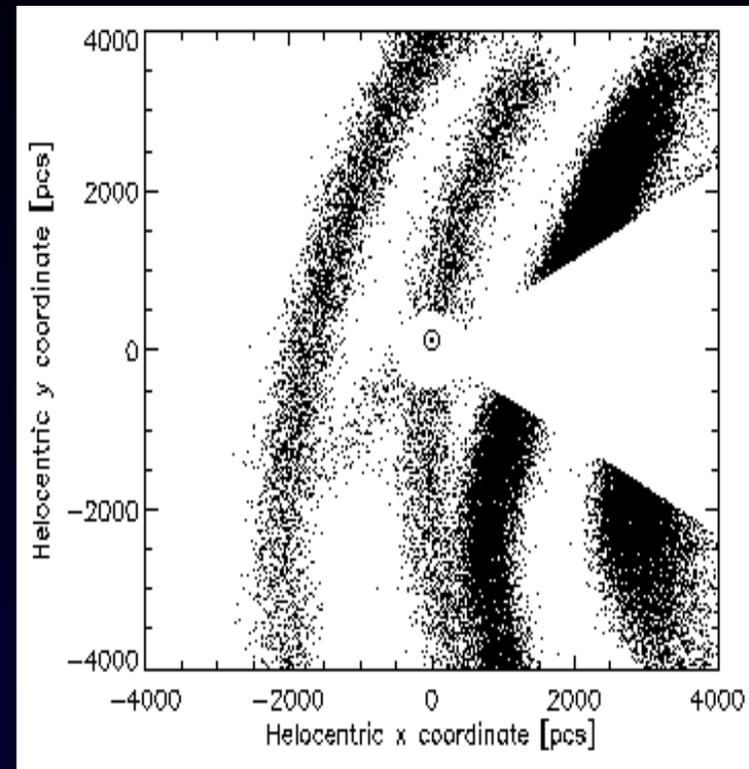
Pierre Angulaire de l'ESA

Les bras spiraux vus par Gaia

- *Survey synthétique* de 50 000 étoiles OB



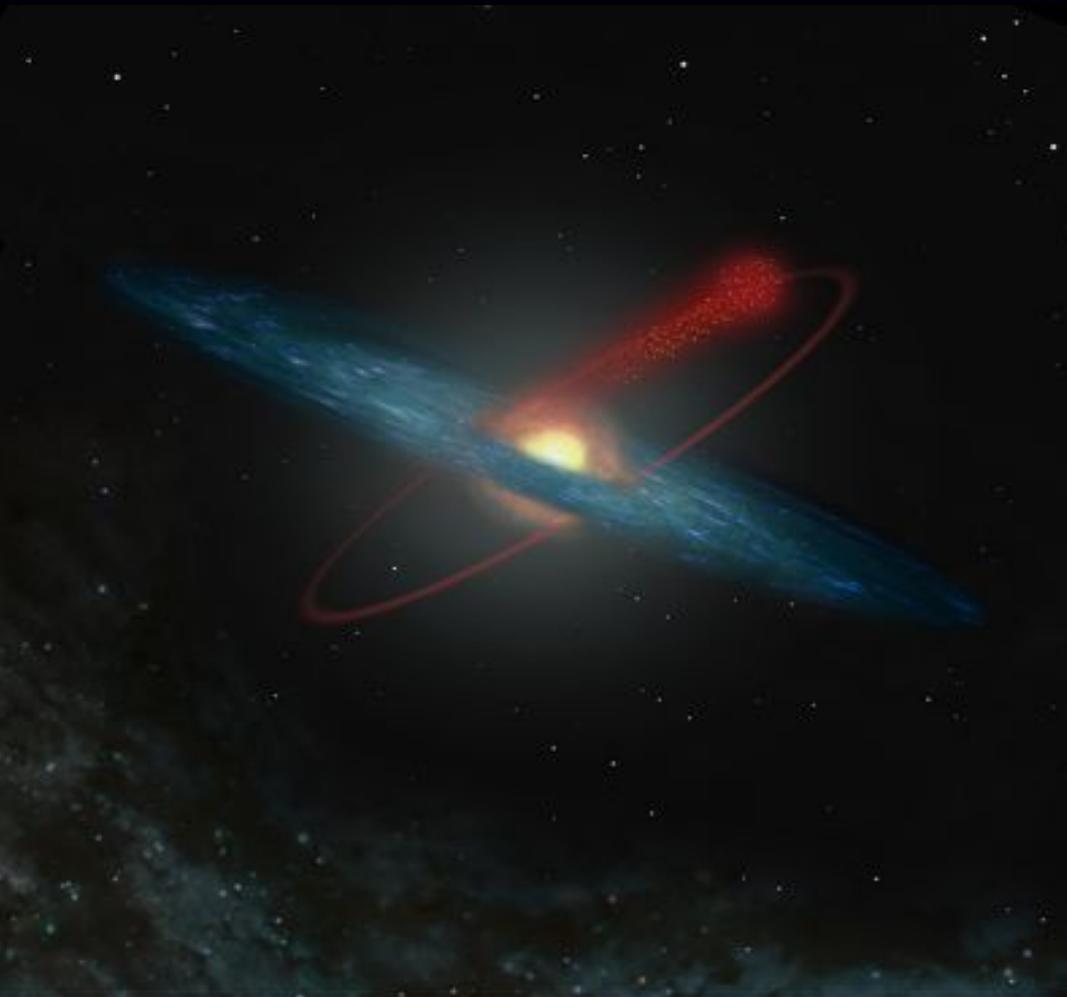
distances photométriques



distances Gaia

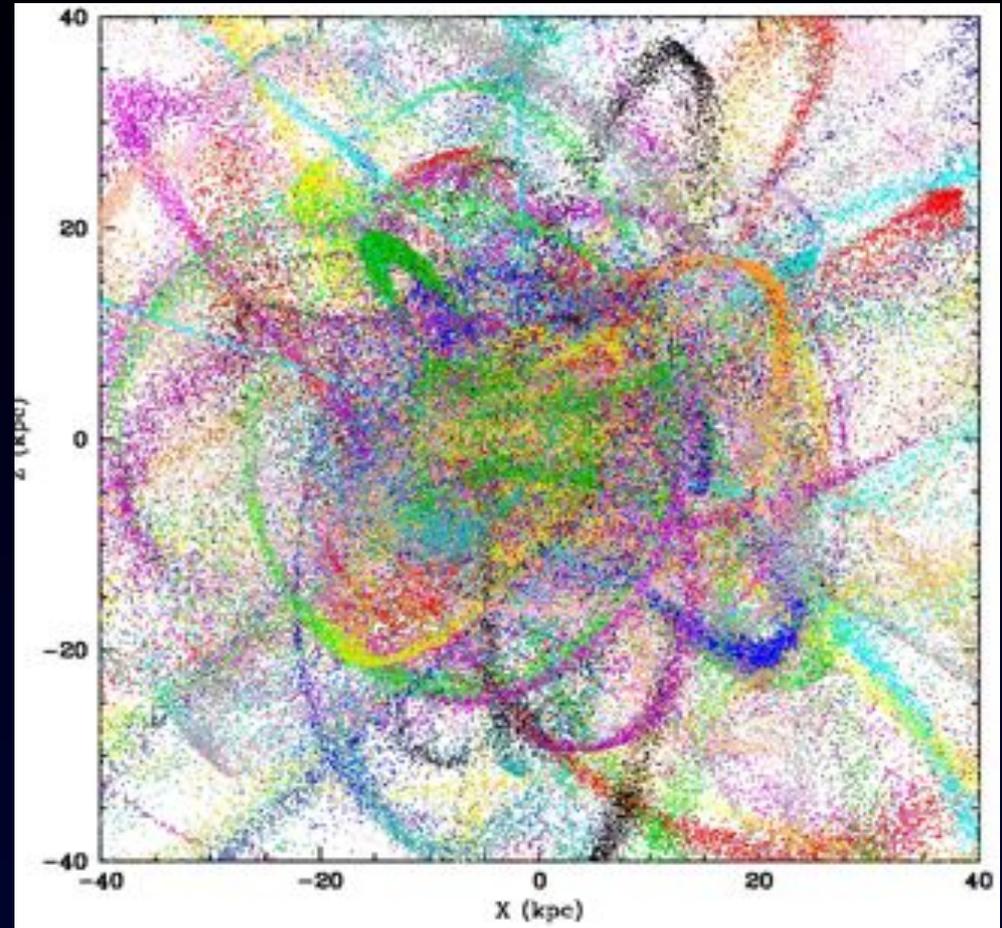
Drimmel, Smart & Lattanzi, 1997

Accrétion de galaxies



Messier 12 Losing Stars in the Milky Way
(Artist's Impression)

ESO PR Photo 04b/06 (February 7, 2006)



Simulation de l'accrétion de 100 galaxies satellites

Gaia va identifier les détails de sous-structures dans l'espace des positions et vitesses

Planètes extrasolaires

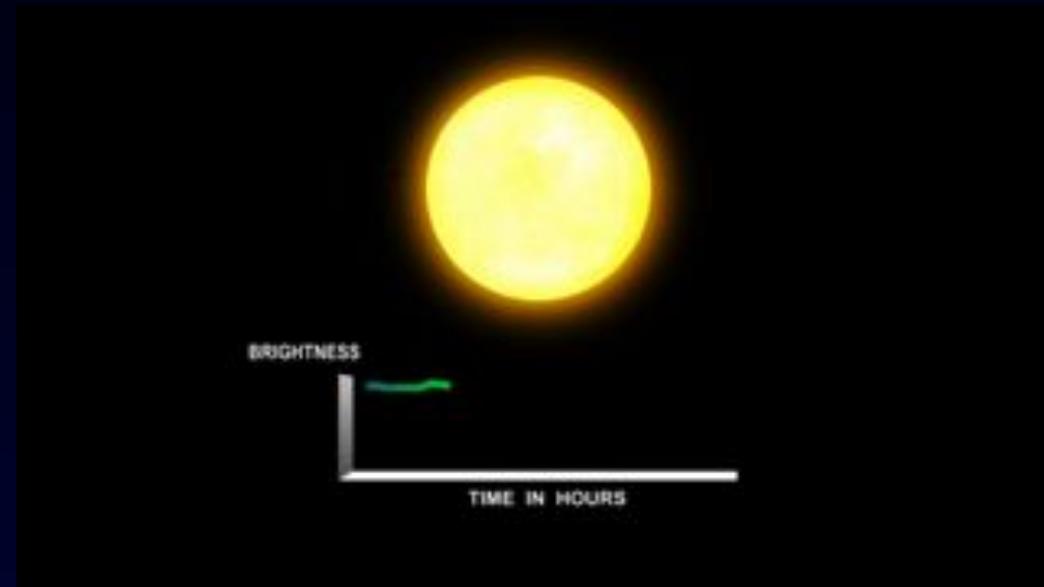
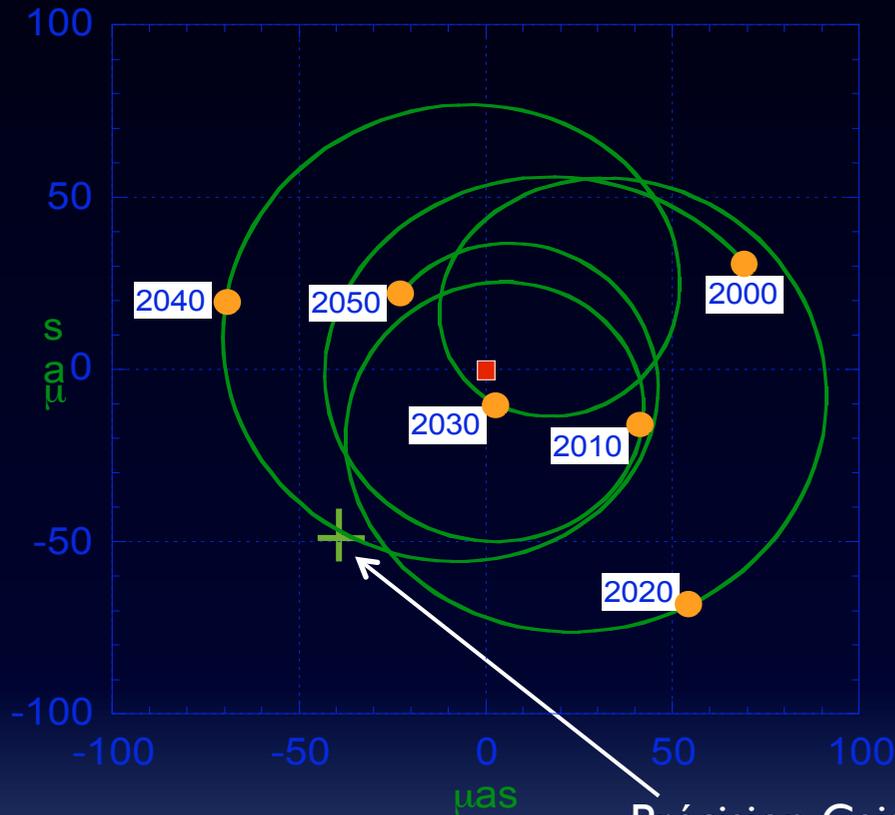
□ Astrométrie

□ > 5000 détections (2000 orbites)

□ Photométrie

4000 - 40000 détections de transit

Mouvement du Soleil à 10 pc





Gaia: une révolution ...

- ❑ Sur la connaissance de notre Galaxie et de ses voisines
- ❑ Sur la formation et l'évolution cinématique et chimique des différentes populations et de notre Galaxie dans son ensemble
- ❑ Sur la dynamique de notre Galaxie et du Groupe Local, et la distribution de la matière sombre
- ❑ Sur la physique de tous les types d'étoiles, même les plus rares, ou dans les phases d'évolution les plus rapides
- ❑ Sur la dynamique et la physique des astéroïdes

De la vraie 3D d'ici 2020!

