Gaia explore la Voie Lactée



F. Mignard

UCA/CNRS/ Observatoire de la Côte d'Azur

Conférence du Bureau des Longitudes

15 mai 2019

Sommaire



- Gaia objectifs, méthodes
- Résultats de la DR2
- Quelques exploitations scientifiques
- Gaia et sa place dans l'histoire de l'astronomie

Dernière planche conférence du 4 janvier 2017

La suite du programme

- Gaia continue sa mission jusqu'en juin 2019
  - il y aura probablement une extension
- Prochaine livraison de résultats dans 12 à 16 mois
  - catalogue complet avec > 1 milliard de distances stellaires
  - mouvement propre pour toutes les étoiles
  - couleur, vitesse radiale
  - objets du système solaire

Dernière planche conférence du 4 janvier 2017

La Mission Gaia

- Mission spatiale de l'Agence Spatiale Européenne
- Lancement le 19 décembre 2013
- Objectif : Etudier le contenu, l'histoire et l'évolution de la Voie Lactée
- Méthodes :
  - position, distance et mouvement des étoiles
  - éclat et composition de leur lumière
- Observation de > 1 milliard d'étoiles
  - mesure des distances par la méthode *géométrique* ➔ 0" 000 01
  - vitesses radiales, couleurs, composition chimique



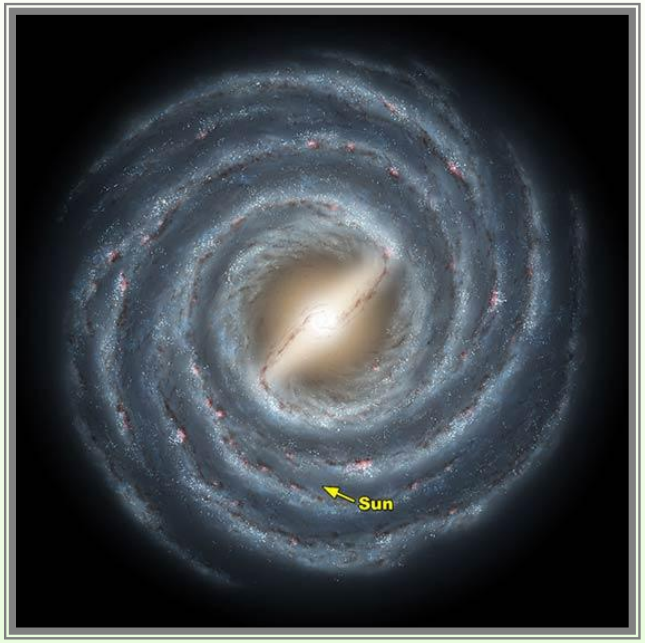
~ 1 pièce de monnaie sur la Lune !

La Voie Lactée



La Voie Lactée : vision moderne

- La Voie Lactée est notre Galaxie
  - c'est juste une parmi des centaines de milliards



- Elle contient :
  - des étoiles (~ 200 milliards)
  - du gaz
  - des poussières
  - de la matière sombre

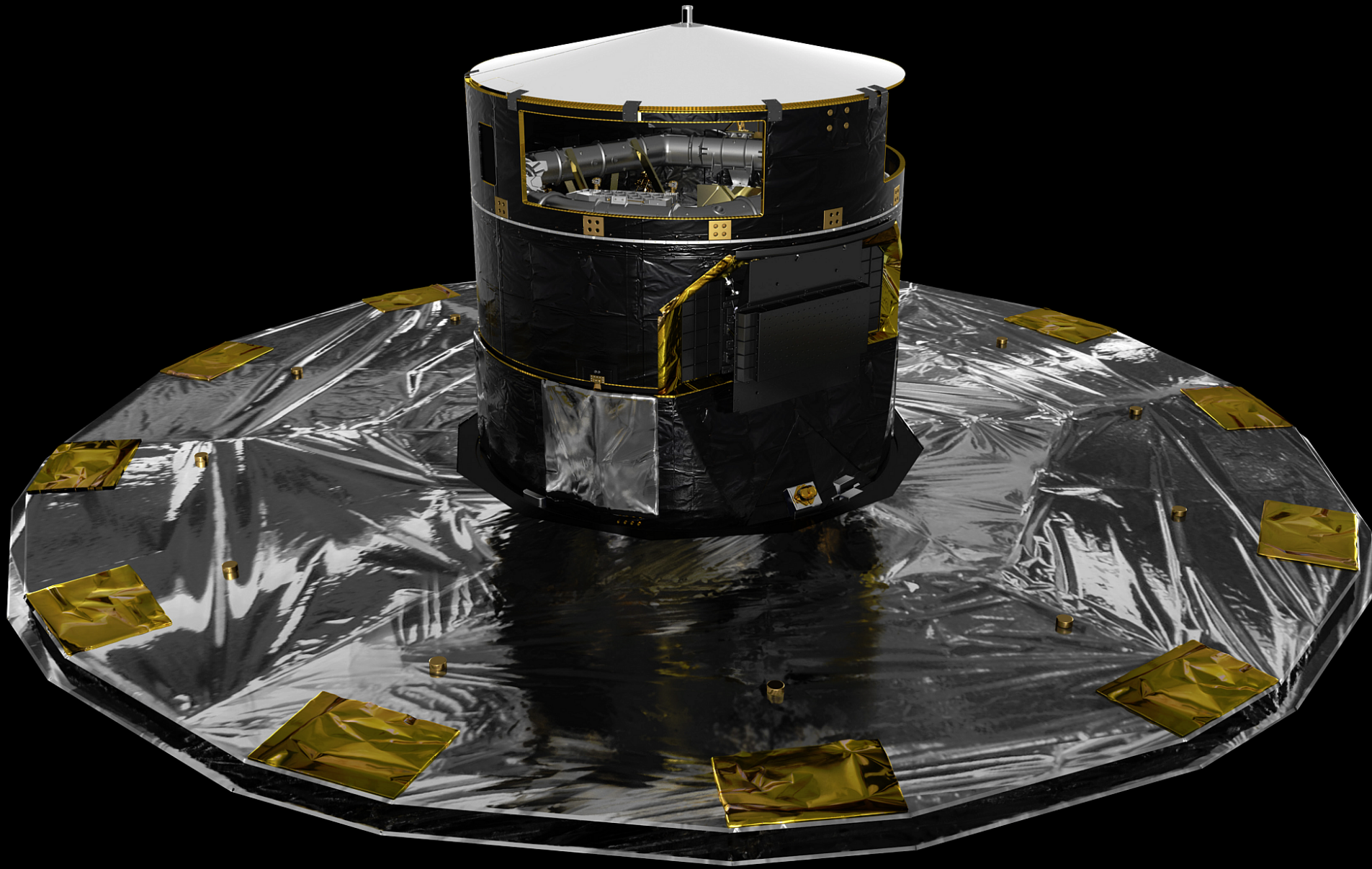
- Son diamètre est environ de 100 000 années lumière
  - le Système solaire est à 30,000 années lumière du centre

Gaia dans les étoiles



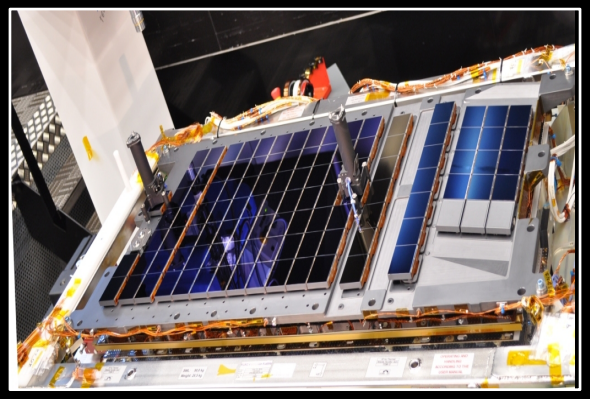

19 Décembre 2013, 09:12:18 UTC, Kourou

Une vue réaliste de Gaia



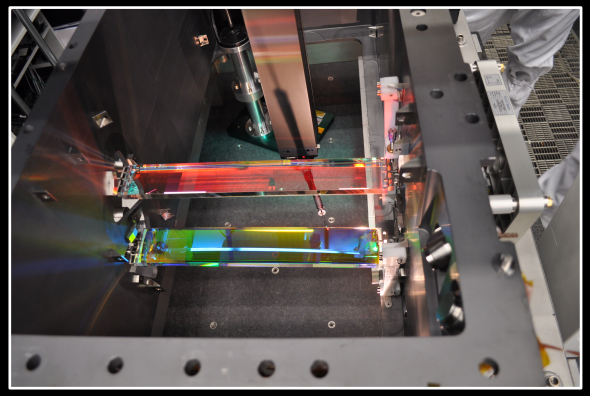
Credit : EADS/Astrium (Airbus Defense & Space)

Deux télescopes – Trois instruments



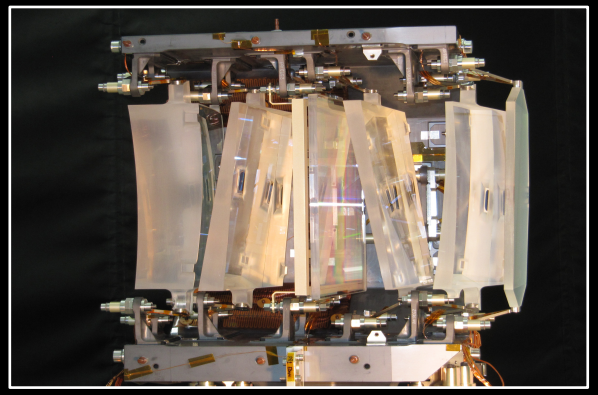
Mesures de position

- $G < 21$
- Cinq paramètres de position
- 70 passages par étoile



Mesures d'éclat

- Dans le rouge
- Dans le bleu



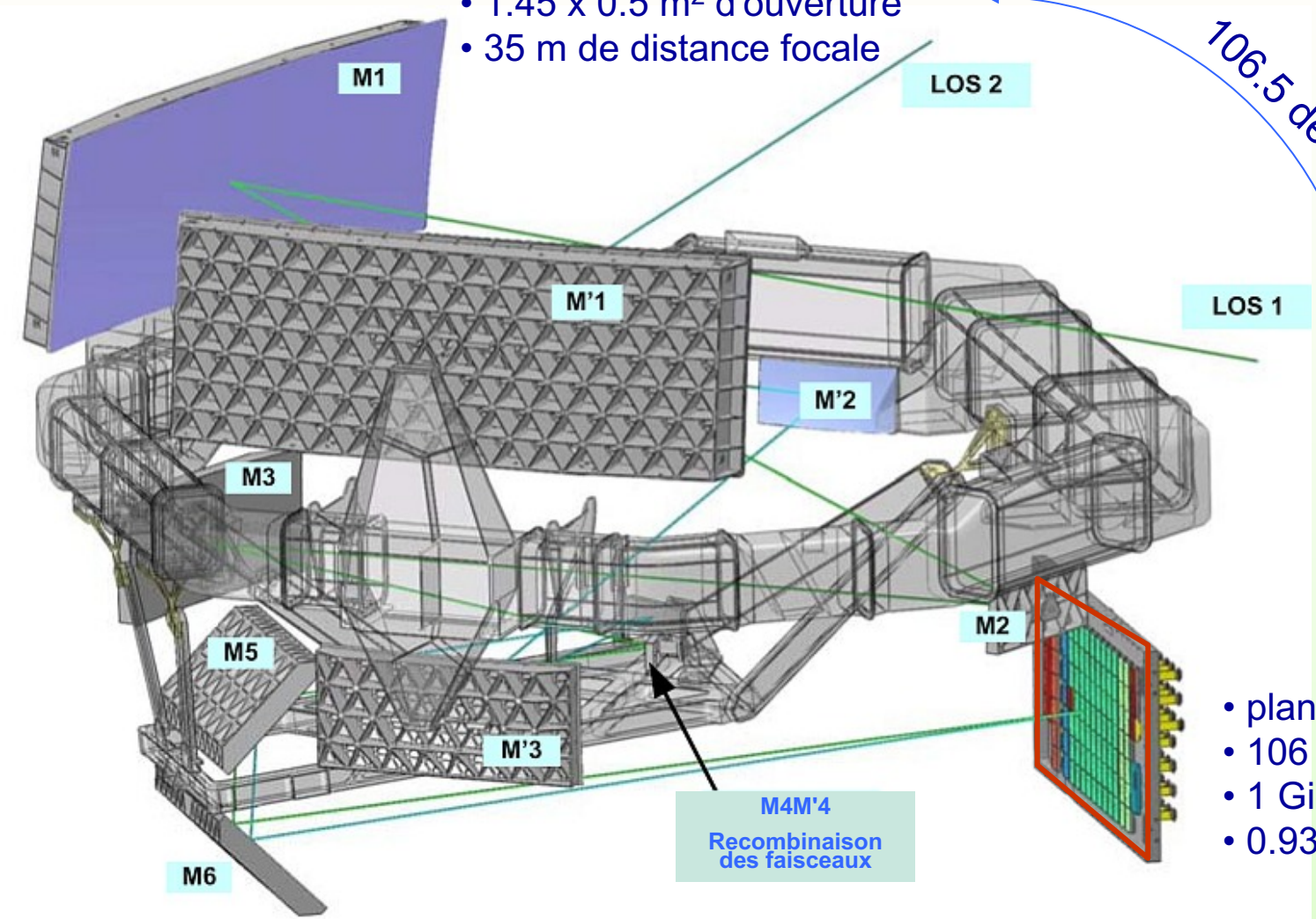
Mesures de spectre

- Vitesses radiales
- Composition chimique

Crédit : D. Katz

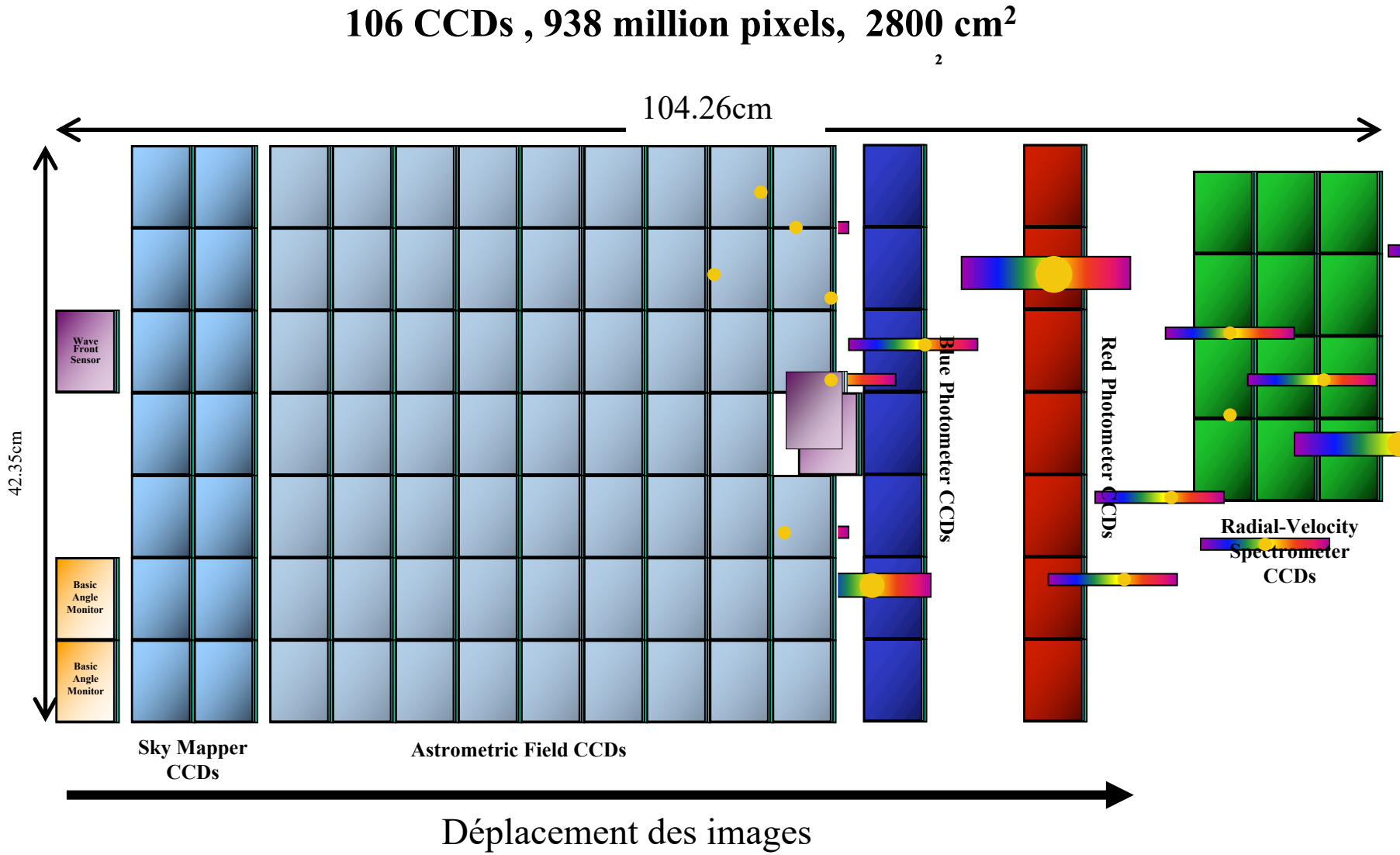
Gaia : télescopes et détecteur

- 2 telescopes à optique hors-axe
- 1.45 x 0.5 m^2 d'ouverture
- 35 m de distance focale



- plan focal unique
- 106 CCDs
- 1 Gigapixel
- 0.93 x 0.42 m^2

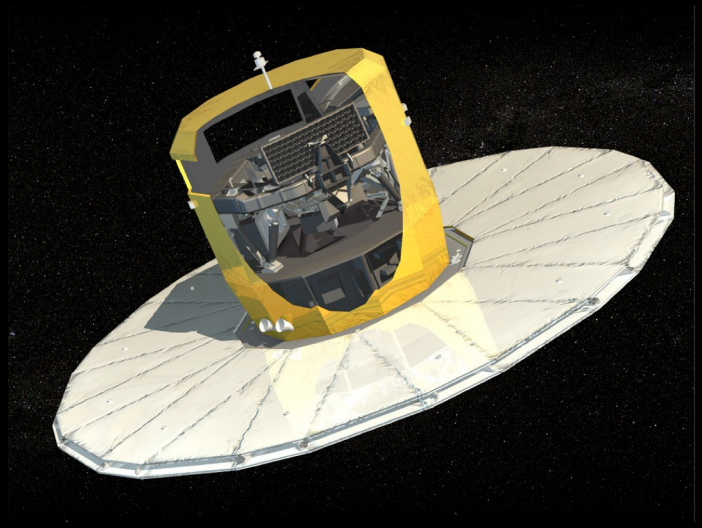
Plan focal et détection

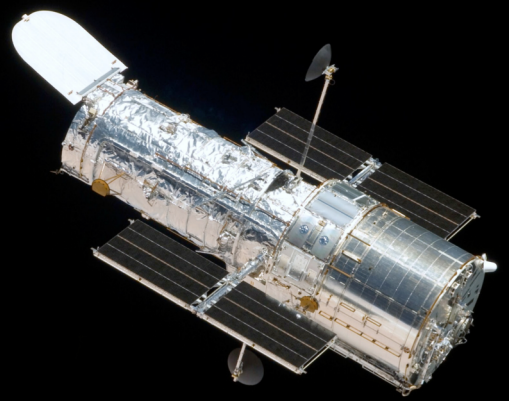


Résolution spatiale

Capacité à séparer les étoiles

Gaia ~ HST



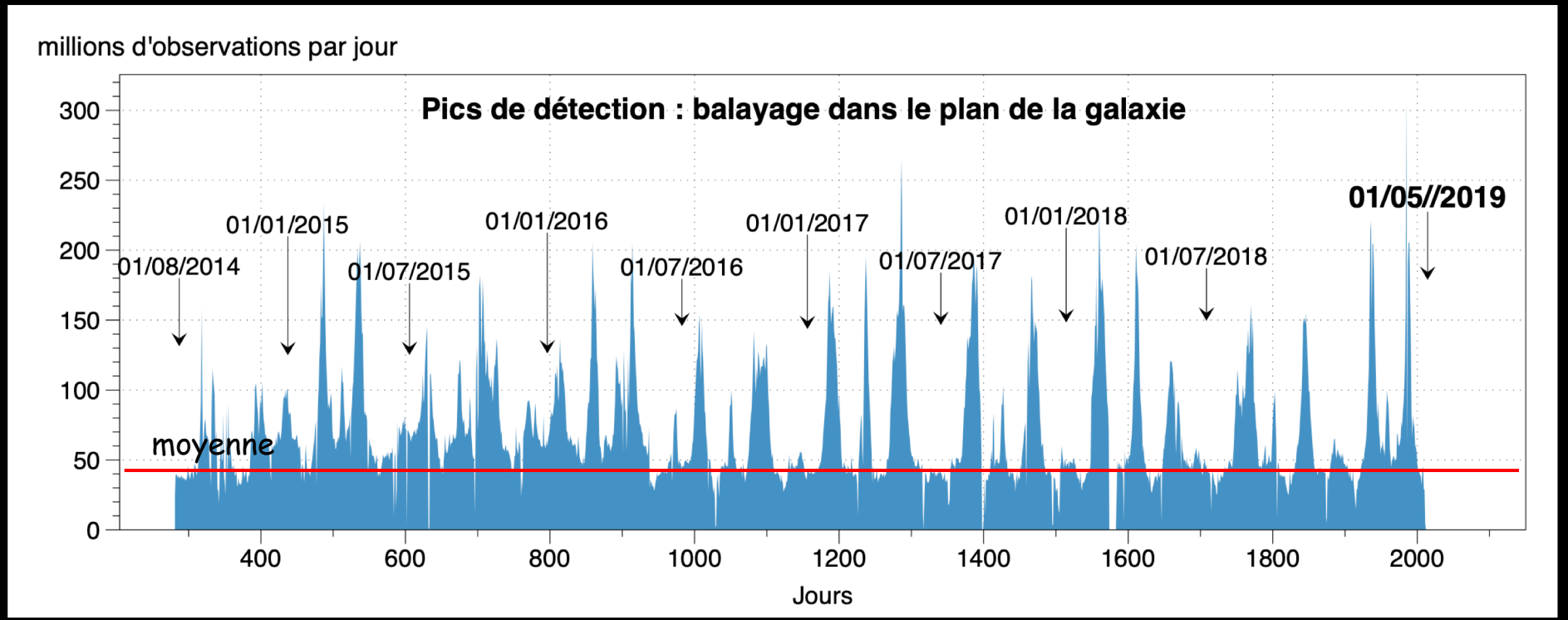


Une journée de la vie de Gaia

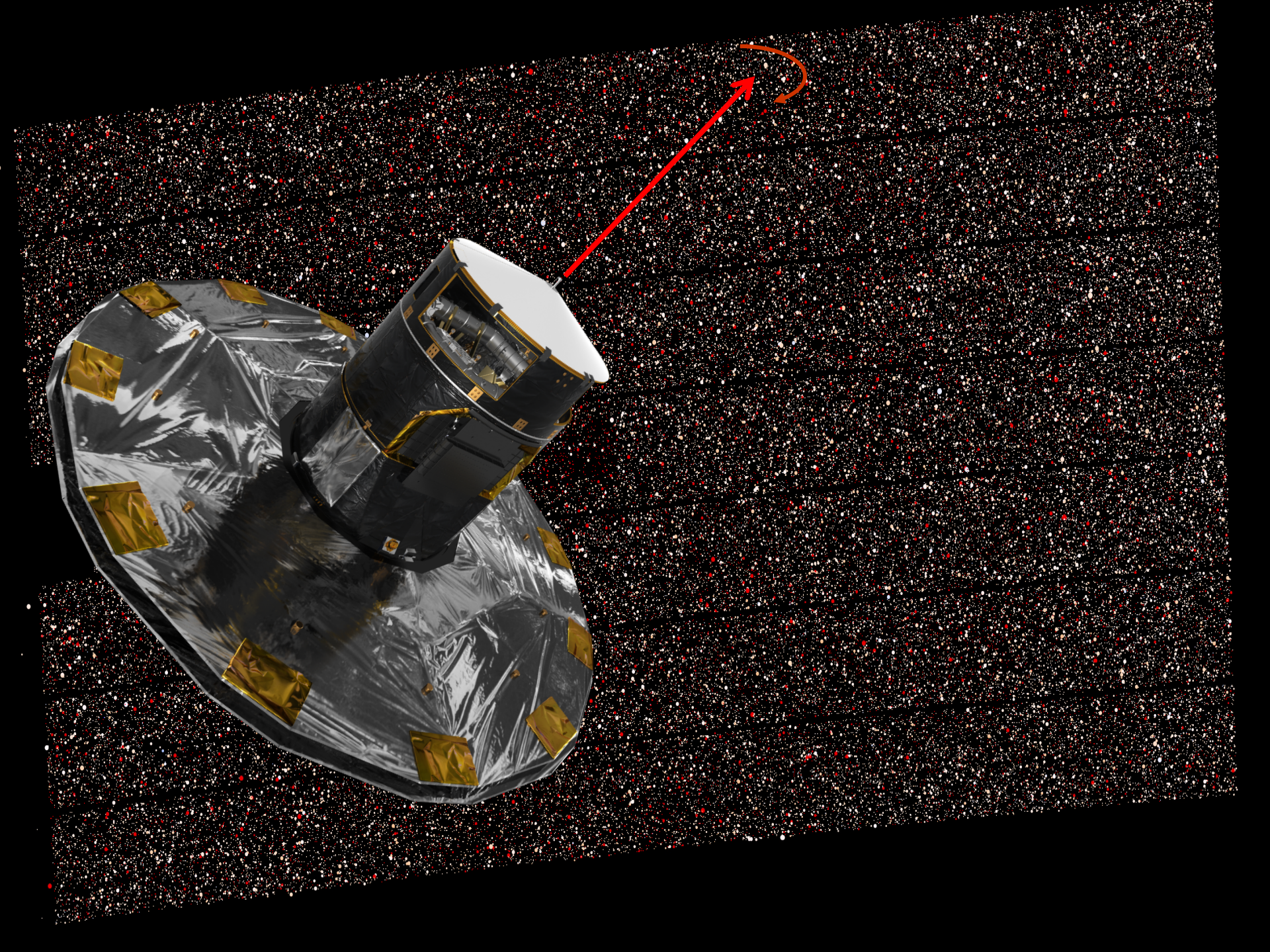
- 24h d'exploration du ciel en continu
  - ~ 40 millions d'étoiles détectées
    - ~ 500 par seconde
  - 500 millions de mesures de position
  - 80 millions de mesures d'éclat et de couleur
  - 13 millions de vitesses radiales
  - 40 Giga Octets de volume de données

Données obtenues sur 57 mois

- Du 25 juillet 2014 au 01 mai 2019 (1740 jours)
  - 125 milliards de détections (sources détectées à bord)
  - 1250 milliards de mesures astrométriques
  - 250 milliards de mesures photométriques
  - 25 milliards de mesures spectroscopiques
  - 3 milliards de sources dans la catalogue de travail

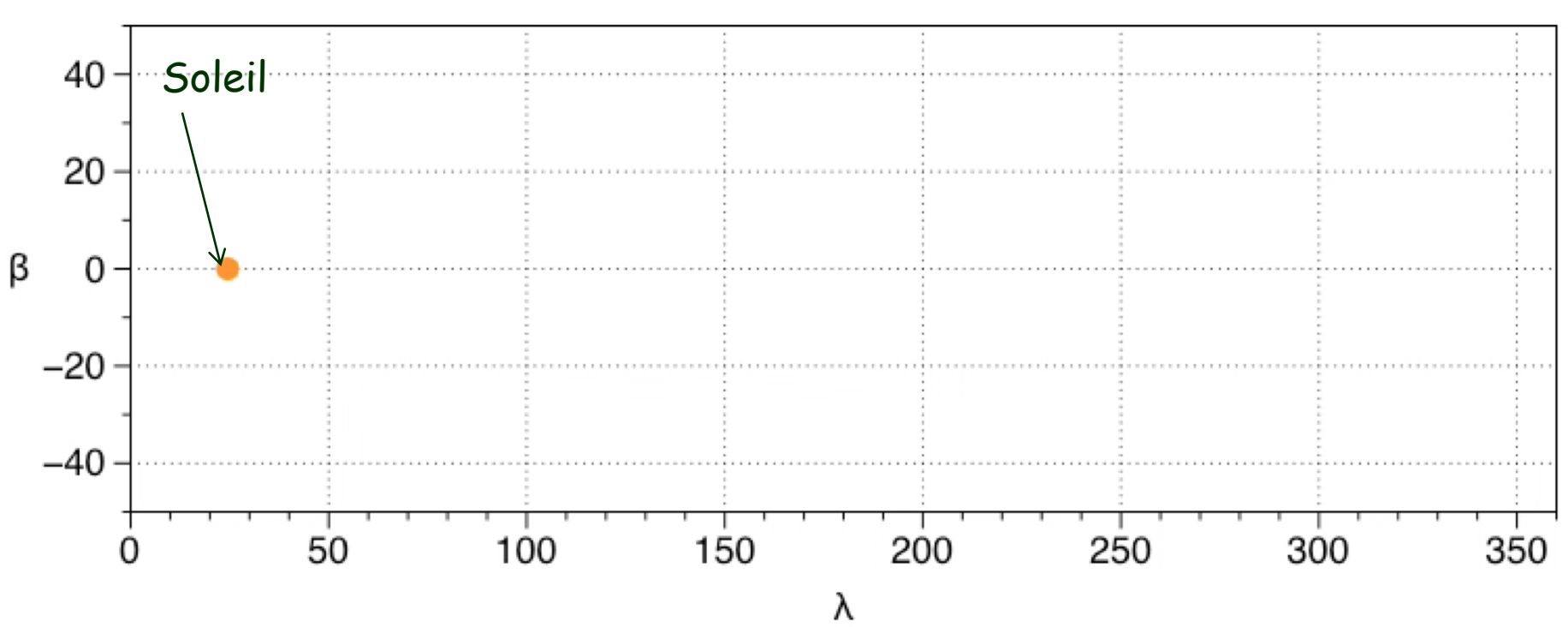


Credit : ESA/Gaia/DPAC – F. Mignard



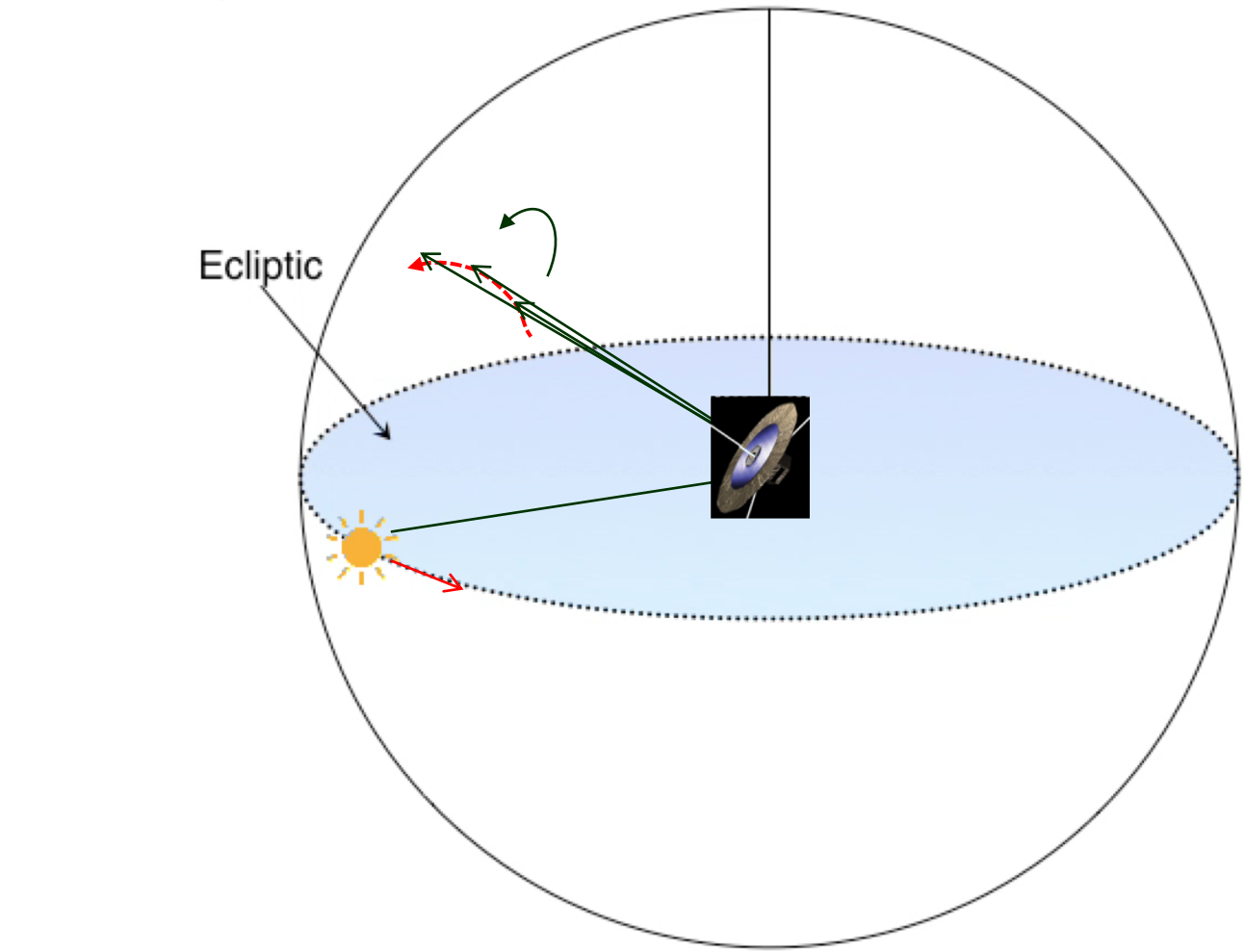
Gaia: exploration du ciel (coordonnées écliptiques)

Trace de l'axe de rotation sur le ciel en 400 jours



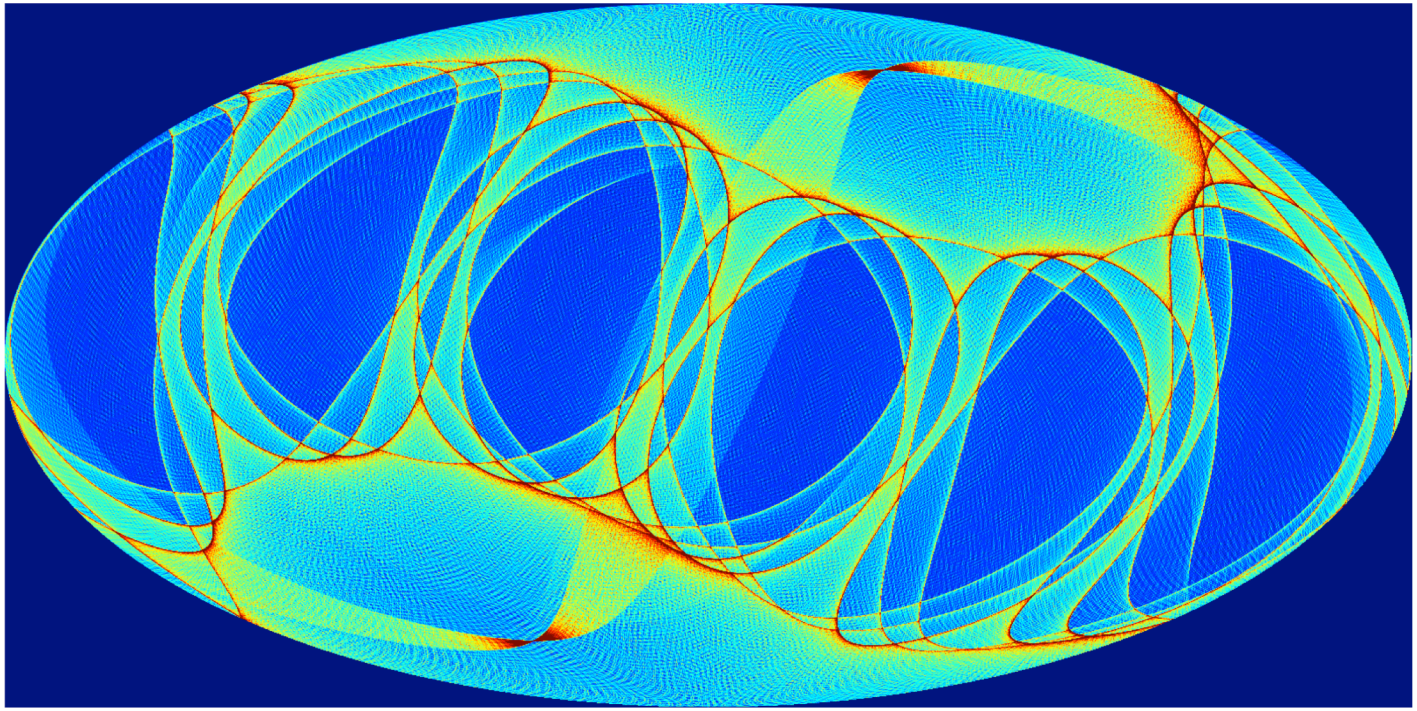
F. Mignard

Gaia: Exploration du ciel



Gaia: exploration du ciel

Nombre d'observations pour la DR2 (22 mois)

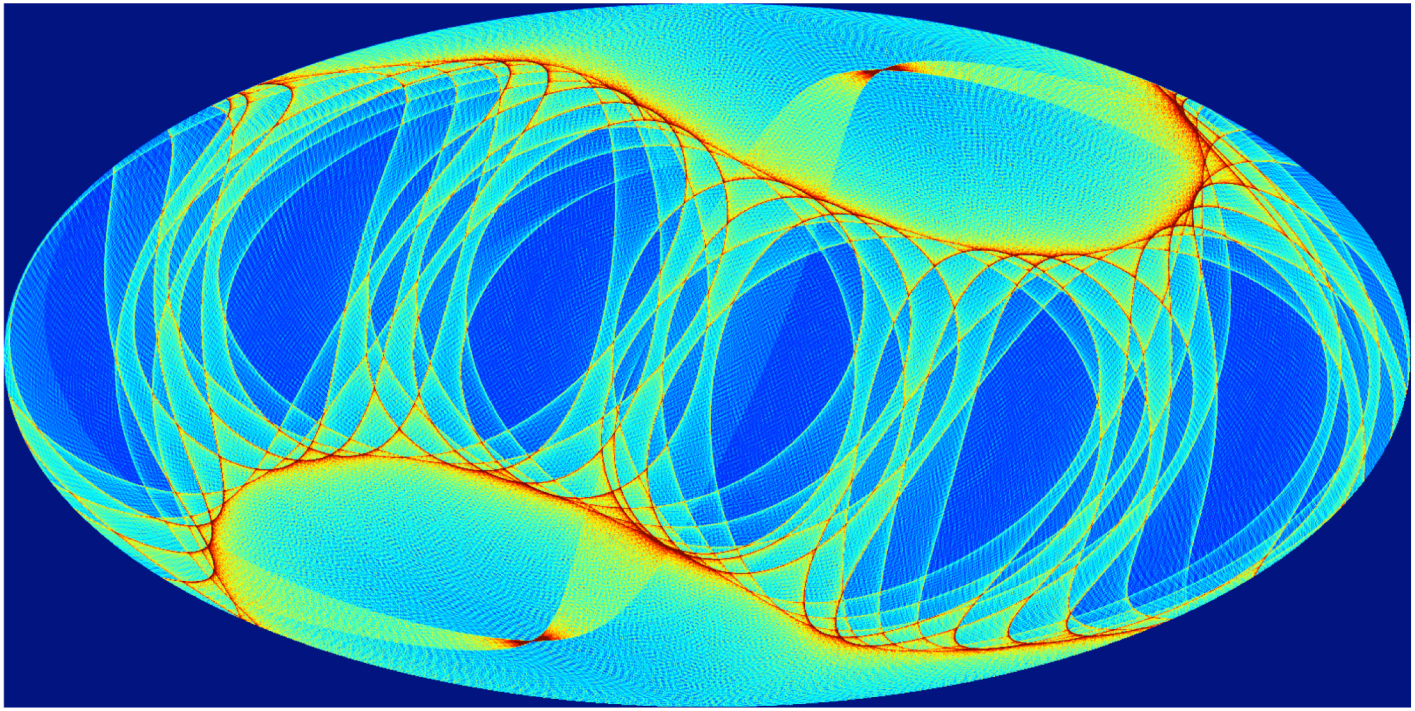


Coordonnées équatoriales

Credit : ESA/Gaia/DPAC – F. Mignard

Gaia: Nombre d'observations

DR3 (35 mois)

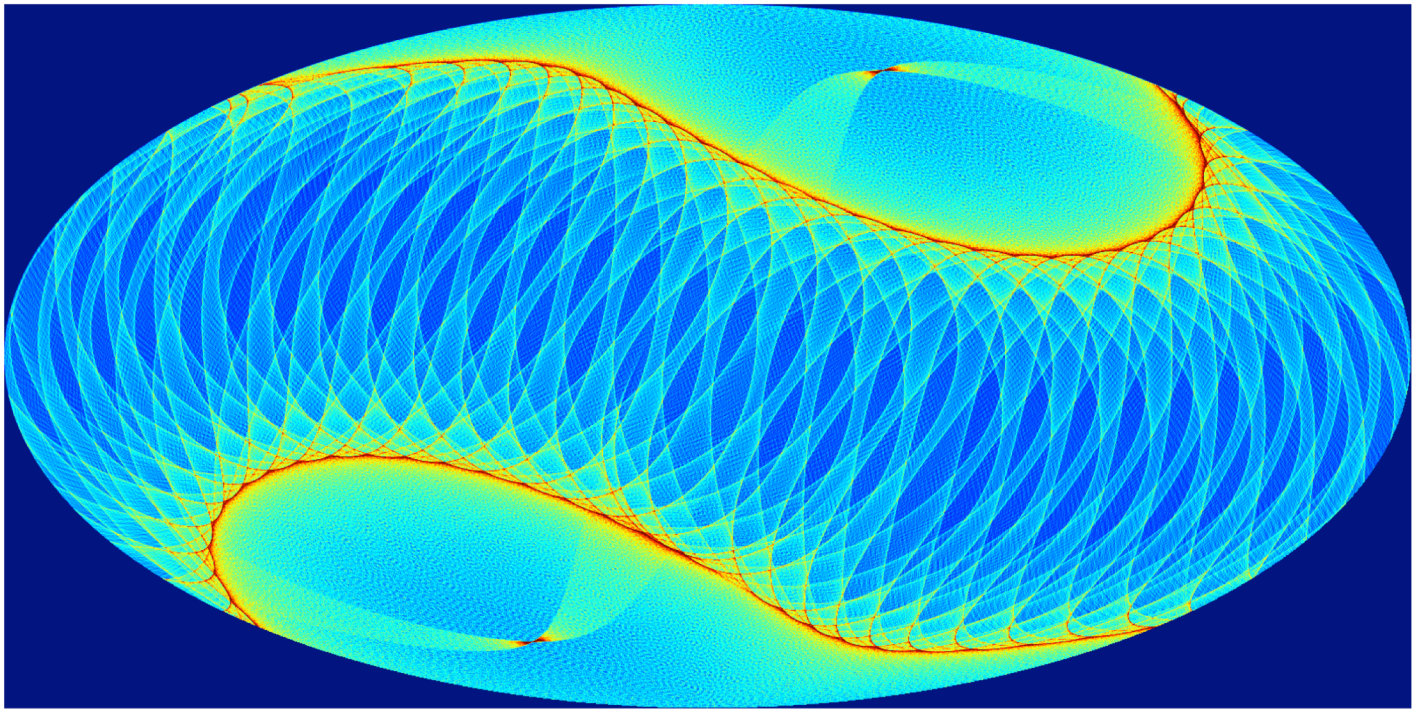


Coordonnées équatoriales

Credit : ESA/Gaia/DPAC – F. Mignard

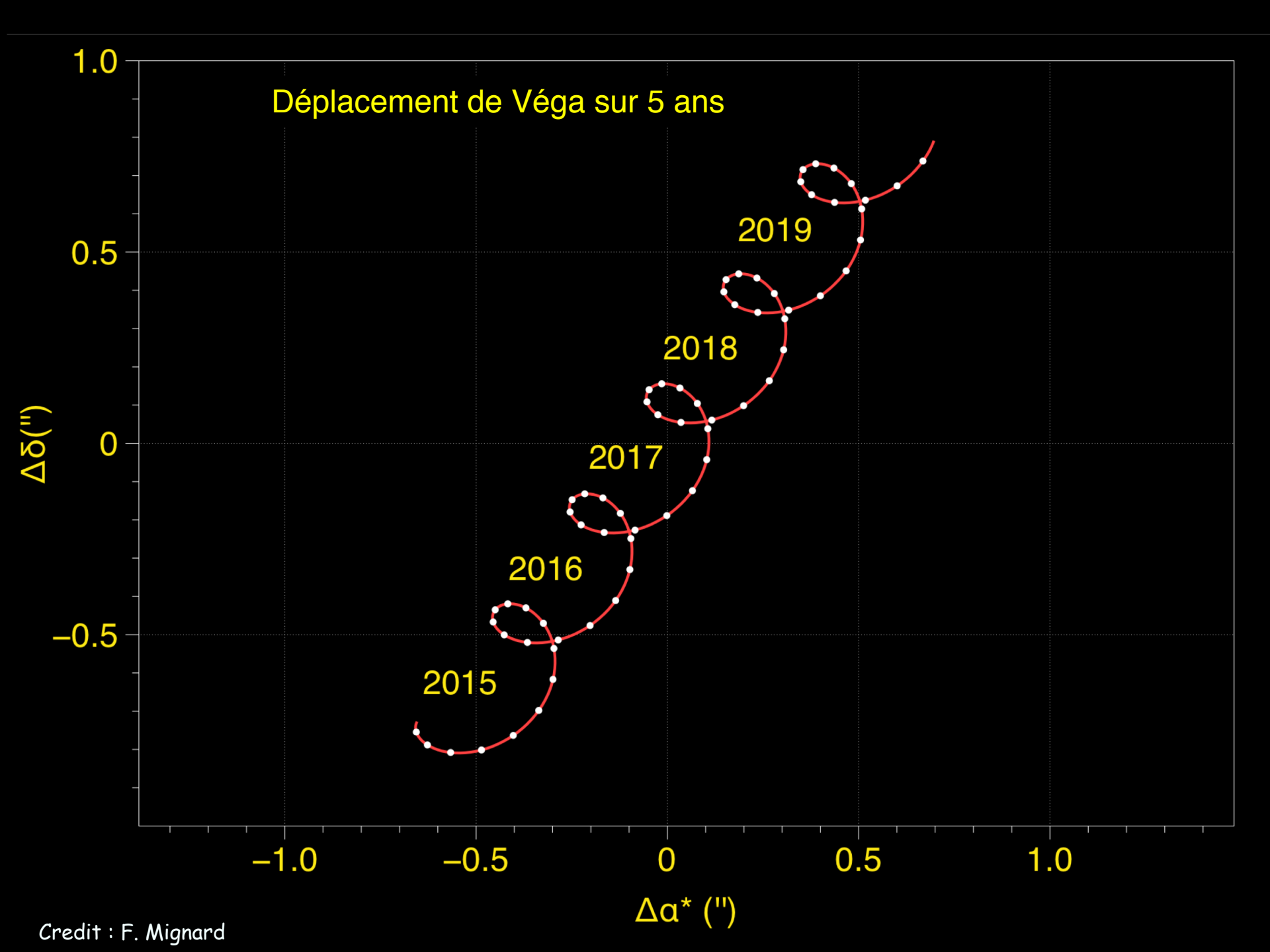
Gaia: Nombre d'observations

Après 5 années de mission

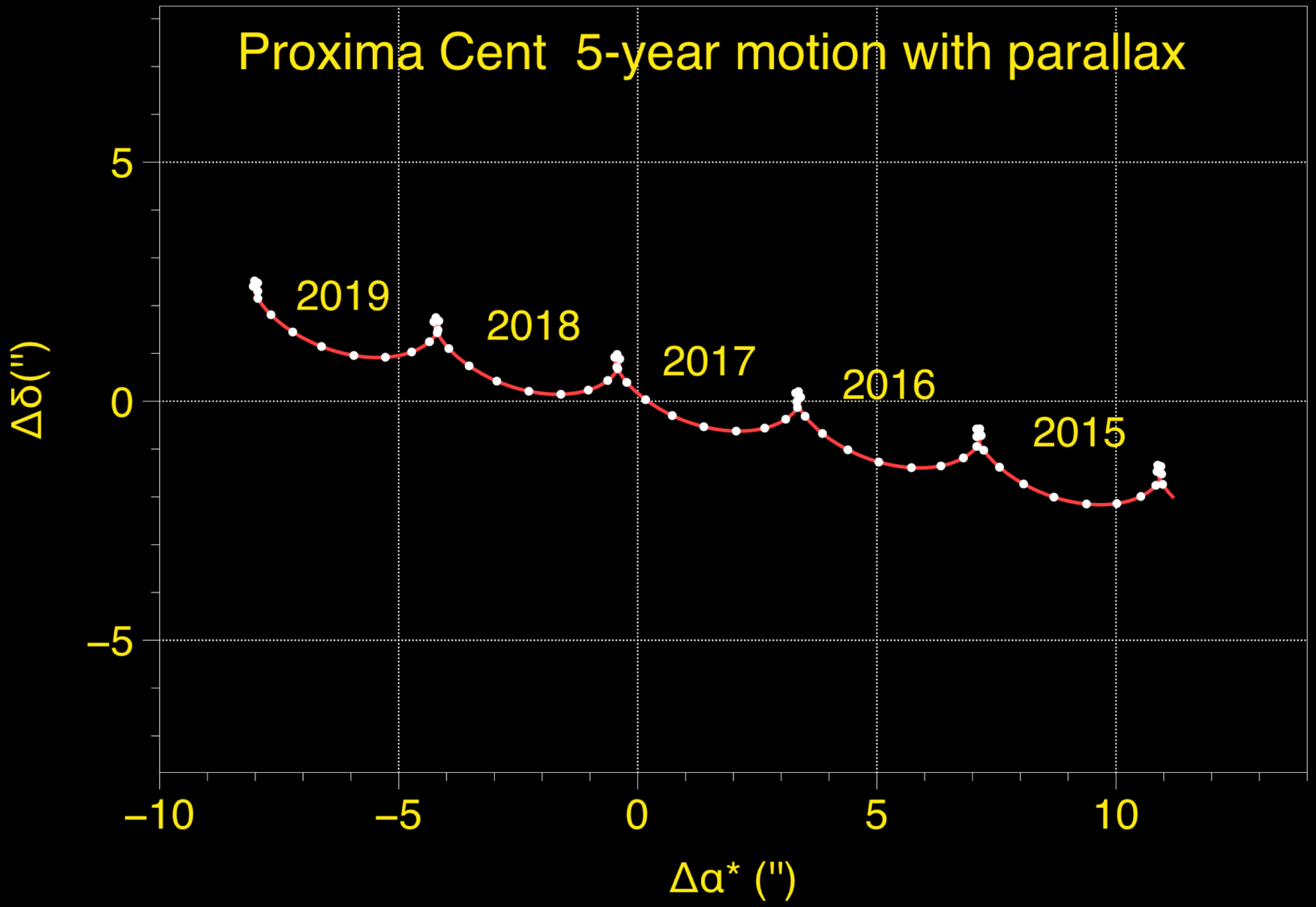


Coordonnées équatoriales

Credit : ESA/Gaia/DPAC – F. Mignard


Déplacement de Véga sur 5 ans
2019
2018
2017
2016
2015
1.0
0.5
0
−0.5
−1.0
−0.5
0
0.5
1.0
Δδ(")
Δα* (")
Credit : F. Mignard

Déplacement de Proxima Centauri



Credit : F. Mignard

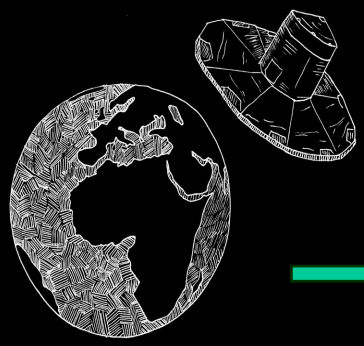
Mercredi 25 avril 2018

Gaia DR2

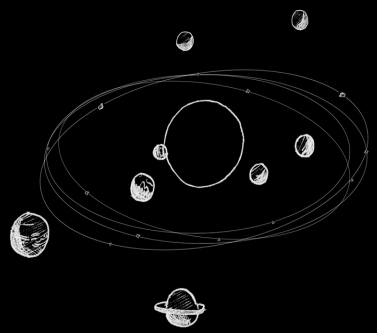




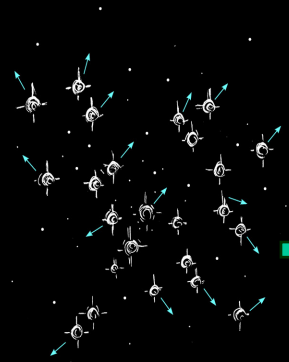




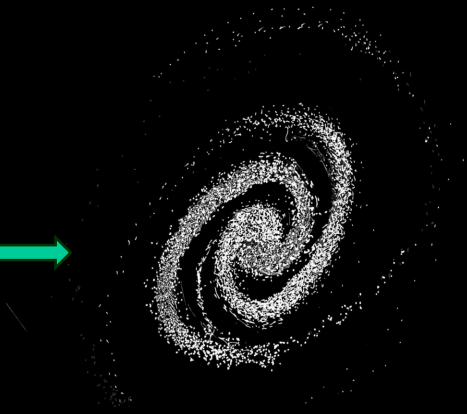
Terre et Gaia



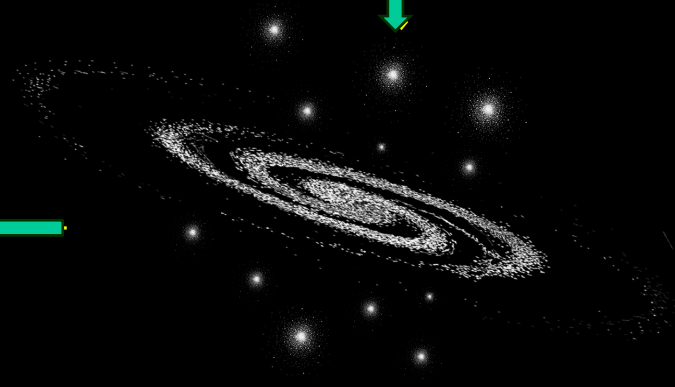
Système solaire



Etoiles



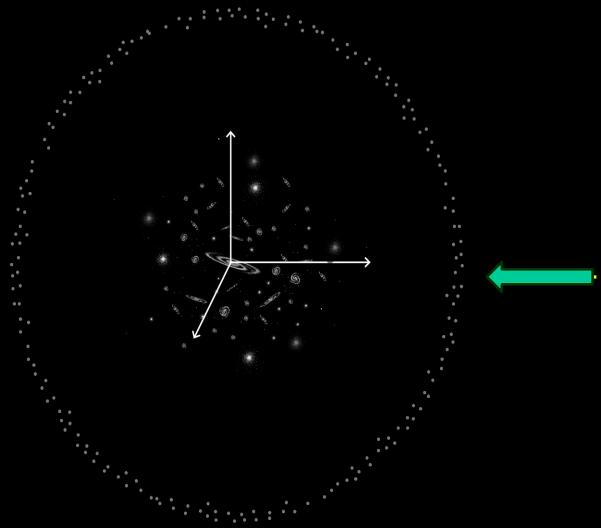
Voie Lactée



Amas globulaires



Galaxies naines



Quasars

Le deuxième Catalogue Gaia : quantité, qualité, diversité

esa

556 869
Quasars

Position sur le ciel
et brillance
1 692 919 135

Température
De surface
161 497 595

Photométrie
rouge
1 383 551 713

1 381 964 755
Photométrie
bleue

Parallaxes et
Mouvements propres
1 331 909 727

Rayons et
luminosités
76 956 778

Objets du
Système solaire
14 099

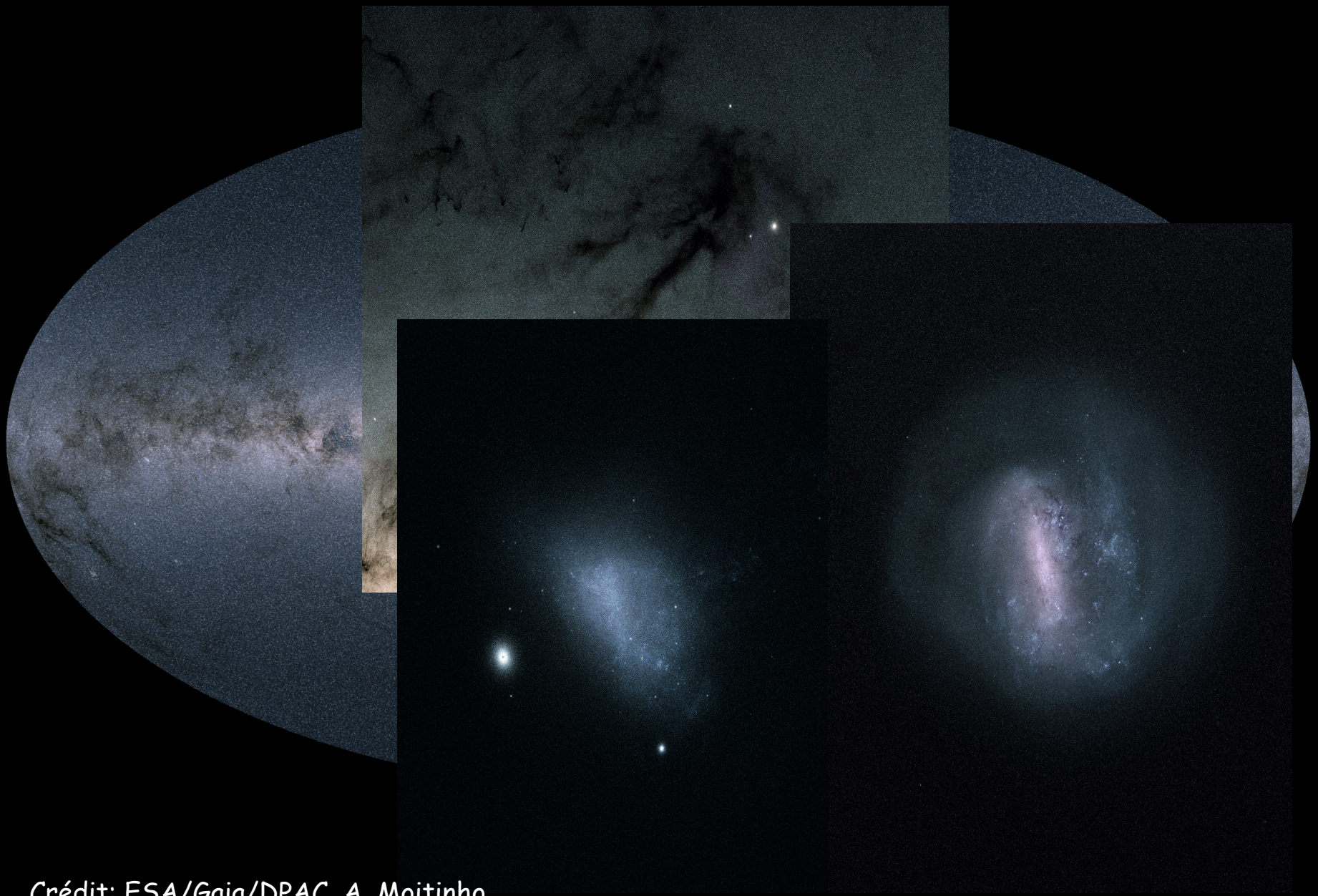
Vitesses
radiales
7 224 631

550 737
Étoiles variables

87 733 672
Quantité de poussière
le long de la ligne de visée

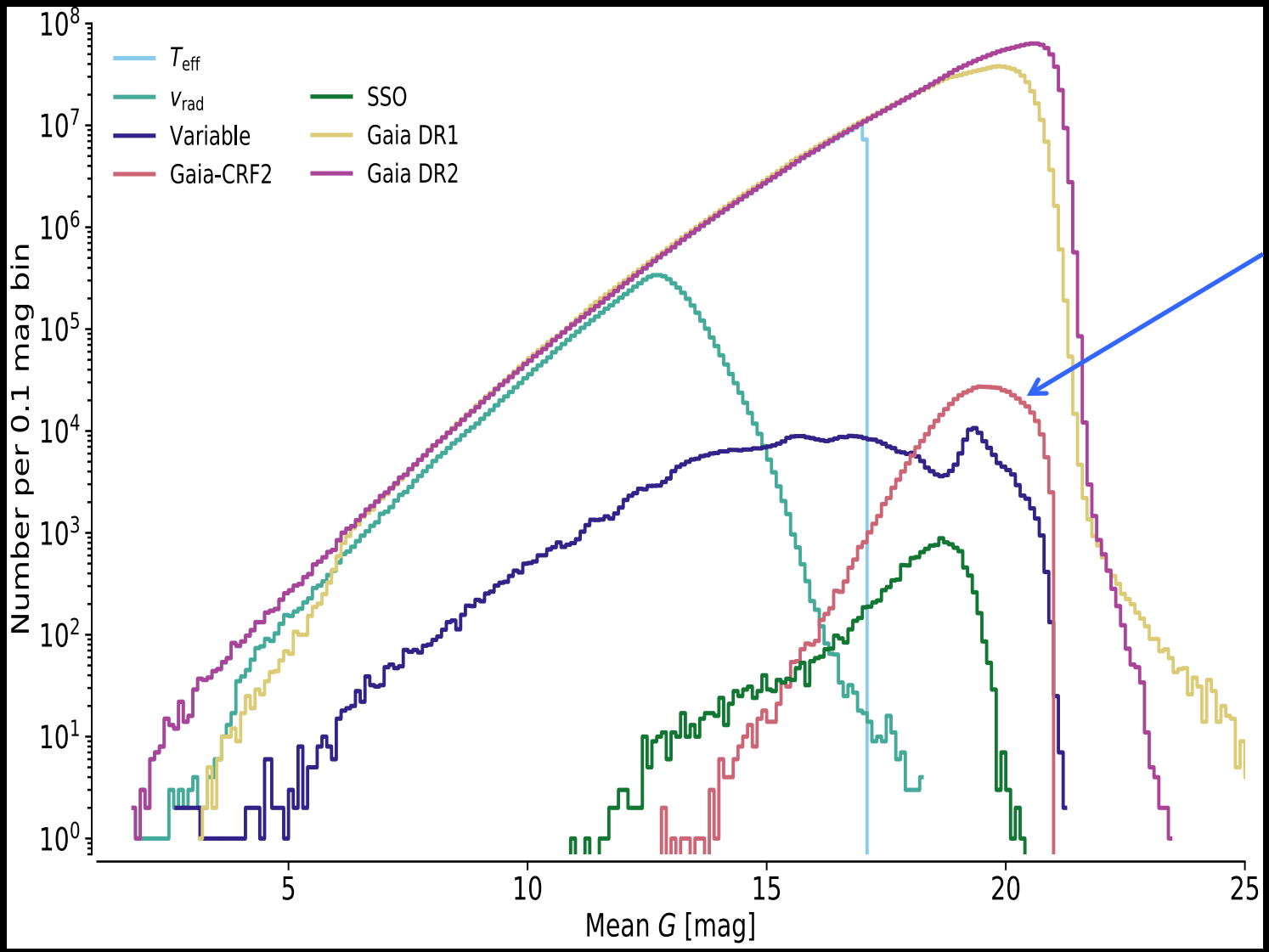
European Space Agency

le ciel en couleur avec Gaia



Crédit: ESA/Gaia/DPAC, A. Moitinho

Magnitude Distribution in DR2



Gaia-CRF2: first optical reference frame based solely on extragalactic sources

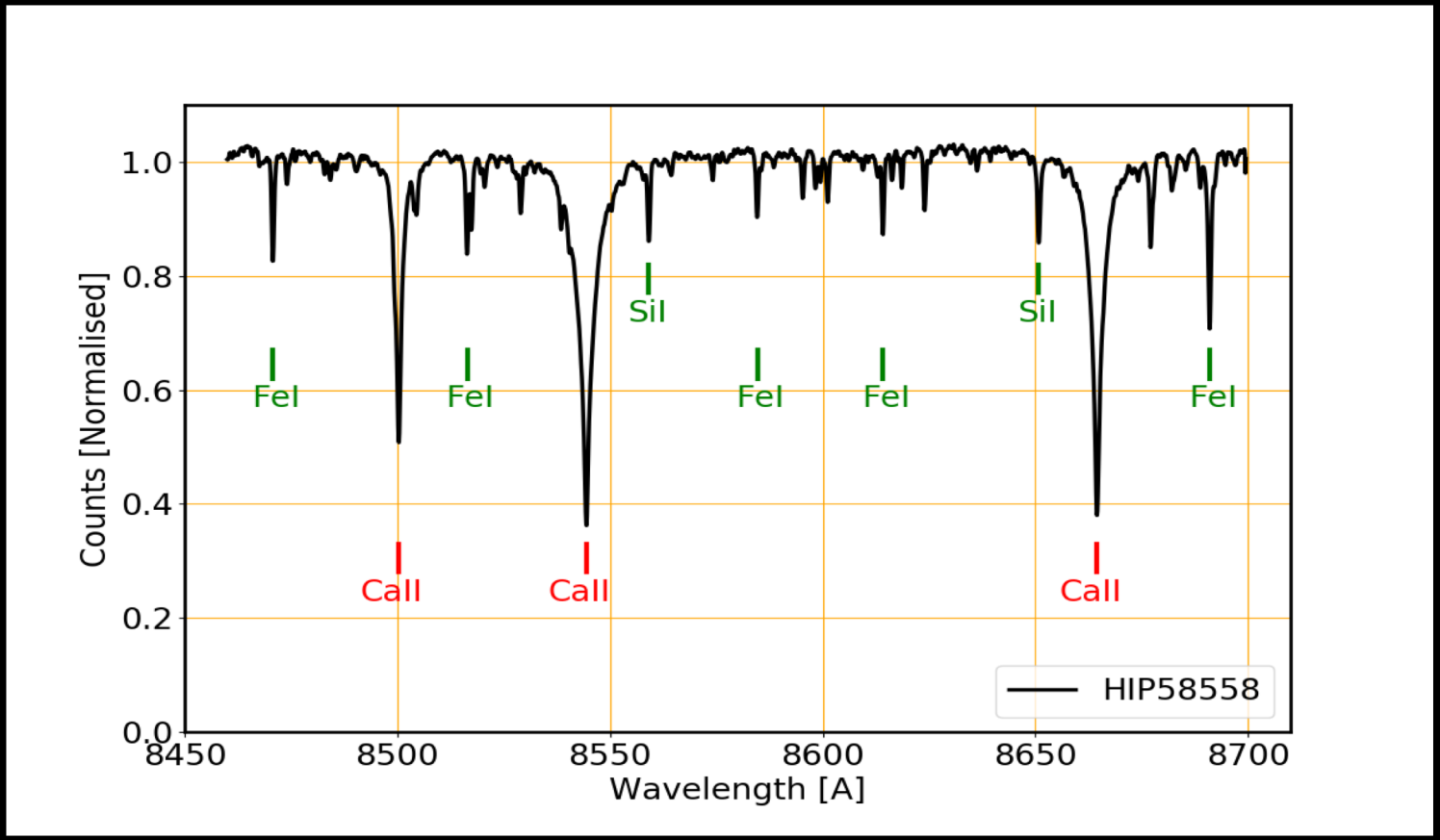
DR2 : Preformances astrométriques

- Incertitudes astrométriques selon la magnitude

	$\mathbf{G = 13}$	$\mathbf{G = 15}$	$\mathbf{G = 18}$	$\mathbf{G = 20}$
$\sigma_{\rm pos}(\mu{\rm as})$	20	30	150	550
$\sigma_{\varpi}(\mu{\rm as})$	30	40	170	650
$\sigma_{\mu_\alpha}(\mu{\rm as/yr})$	50	60	300	1200
$\sigma_{\mu_\delta}(\mu{\rm as/yr})$	50	55	250	1000

Gaia collaboration. 2018

Mesurer la vitesse radiale

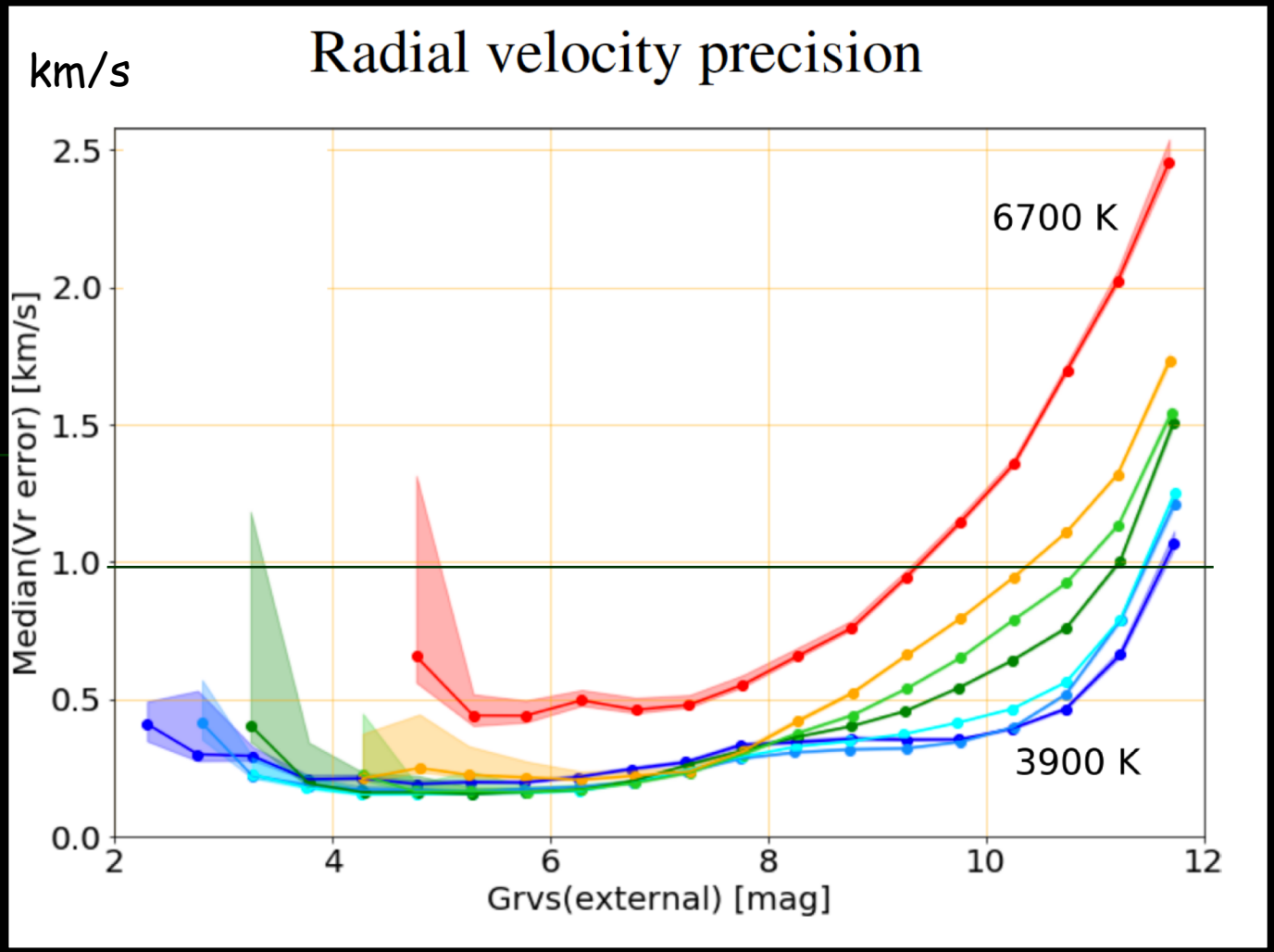


Déplacement Doppler-Fizeau des raies spectrales

Crédit : D. Katz

Précision des vitesses radiales

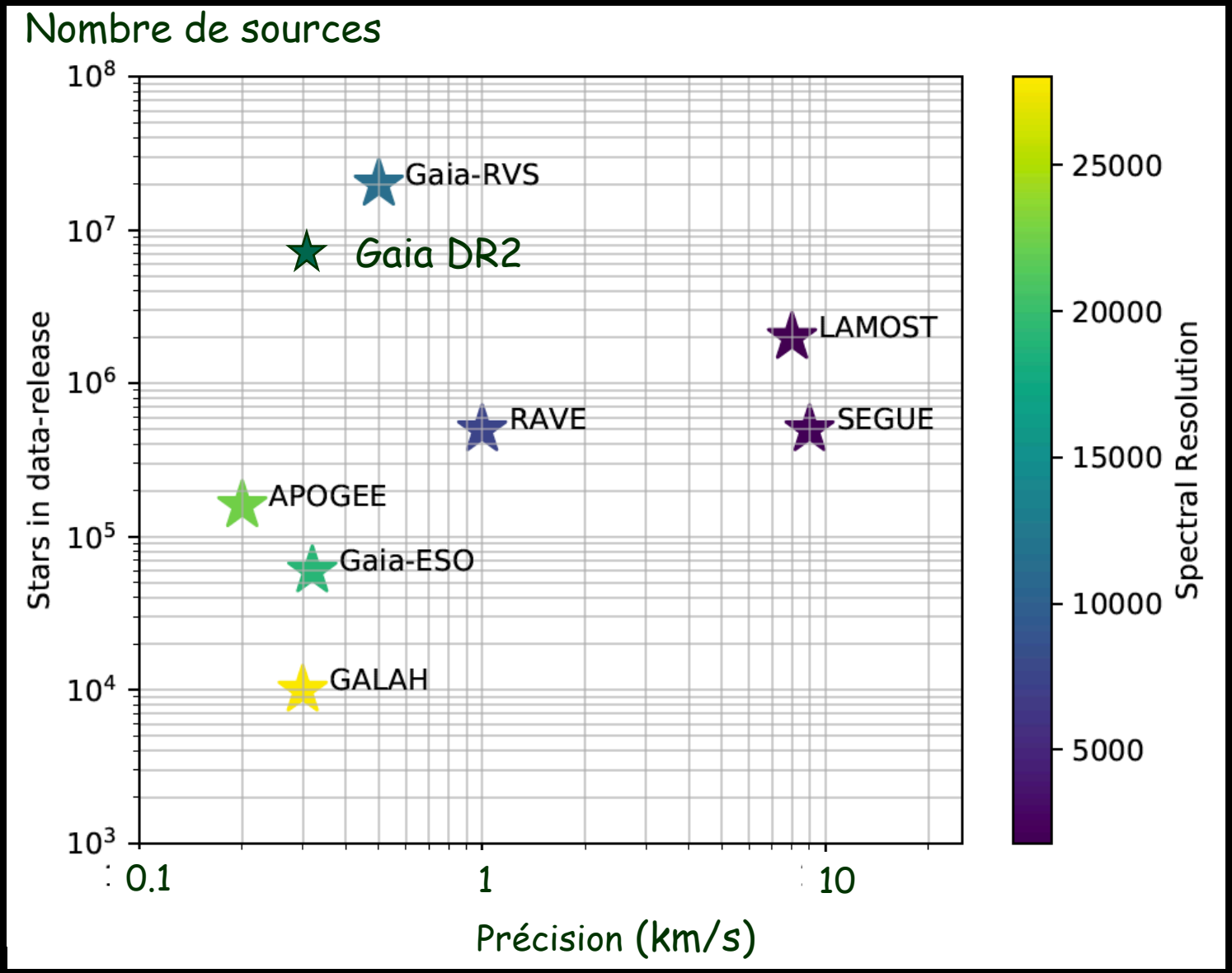
- ~ 7.2 M d'étoiles 3550 K < T < 6900 K



CU6 team, 2017

VITESSE RADIALE

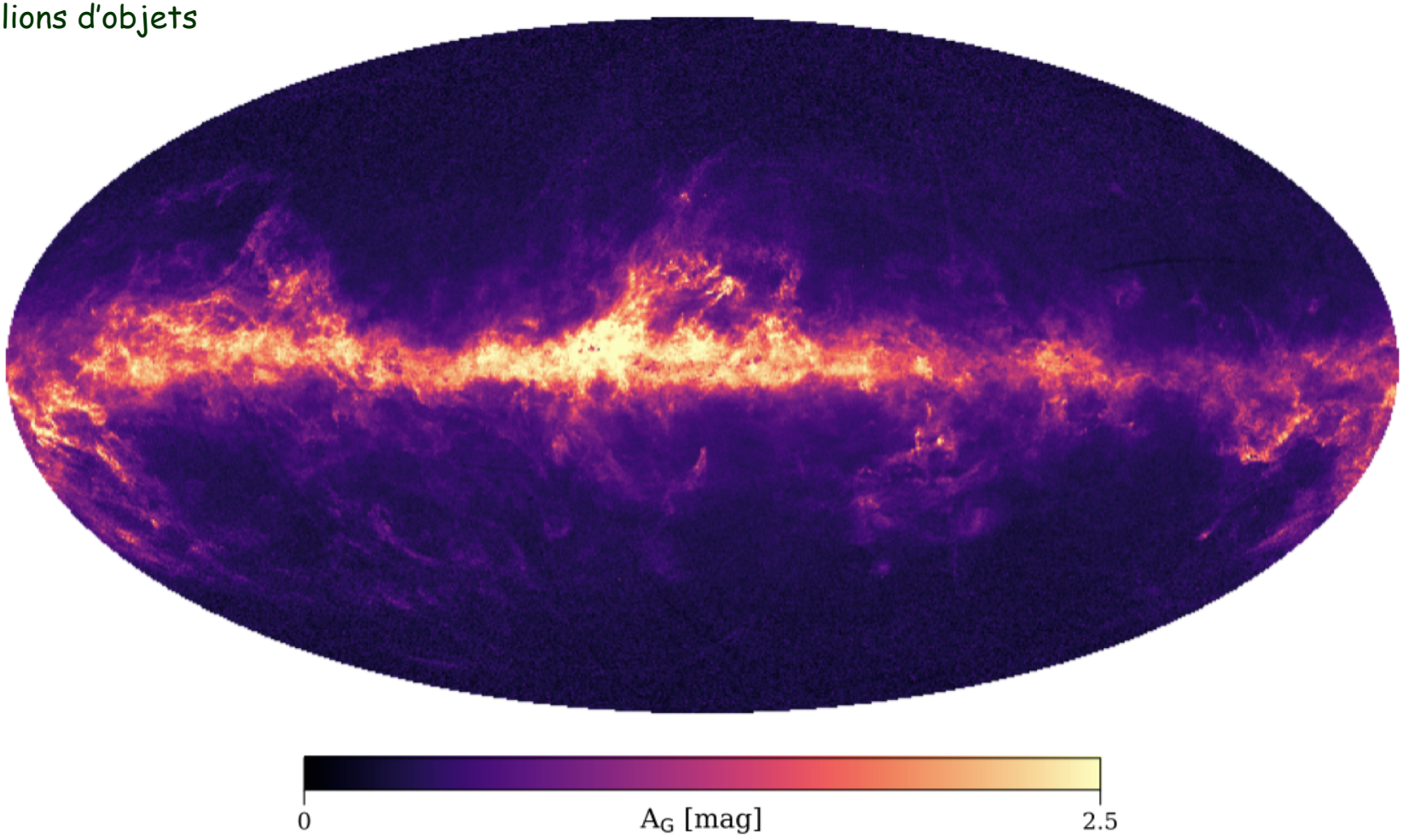
- Comparaison aux données venant des observations au sol



Credit : G. Kordopatis

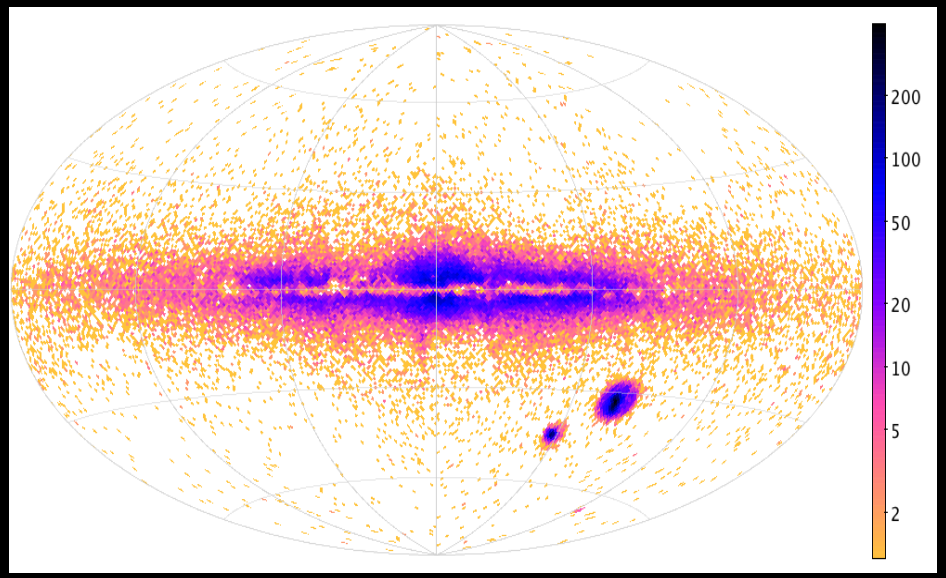
Carte d'extinction interstellaire

88 millions d'objets

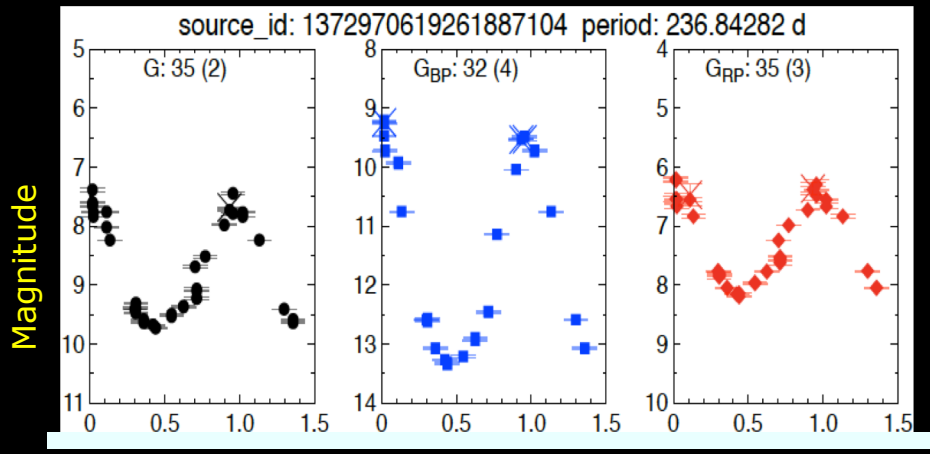


crédit : *ESA/Gaia/DPAC, M. Fouesneau*

Les étoiles variables avec Gaia DR2



Distribution des variables à longue période



Exemple de courbe repliée dans les 3 bandes

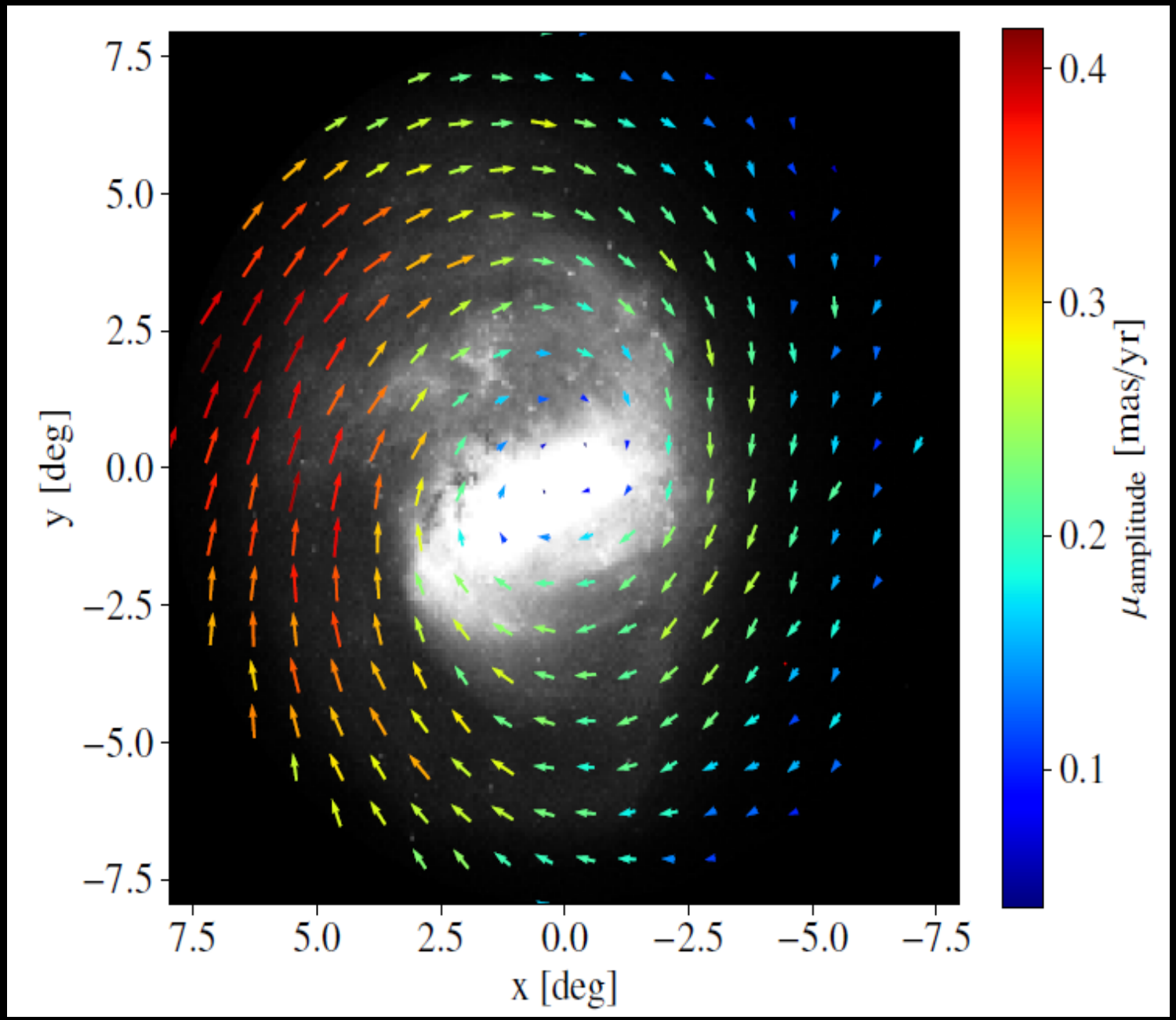
- 550,000+ étoiles variables identifiées (beauoup plus à venir)
  - variabilité en 3 bandes photométriques pour 70%
- Classe de variabilité et périodes
  - RR Lyrae, Cepheids, δ Scuti, SX Phoenicis, Mira, etc.

Le Grand Nuage de Magellan



crédit : ESA/Gaia/DPAC A. Moitinho / A. F. Silva / M. Barros / C. Barata, University of Lisbon,

Le Grand Nuage de Magellan



Rotation du Grand Nuage de Magellan

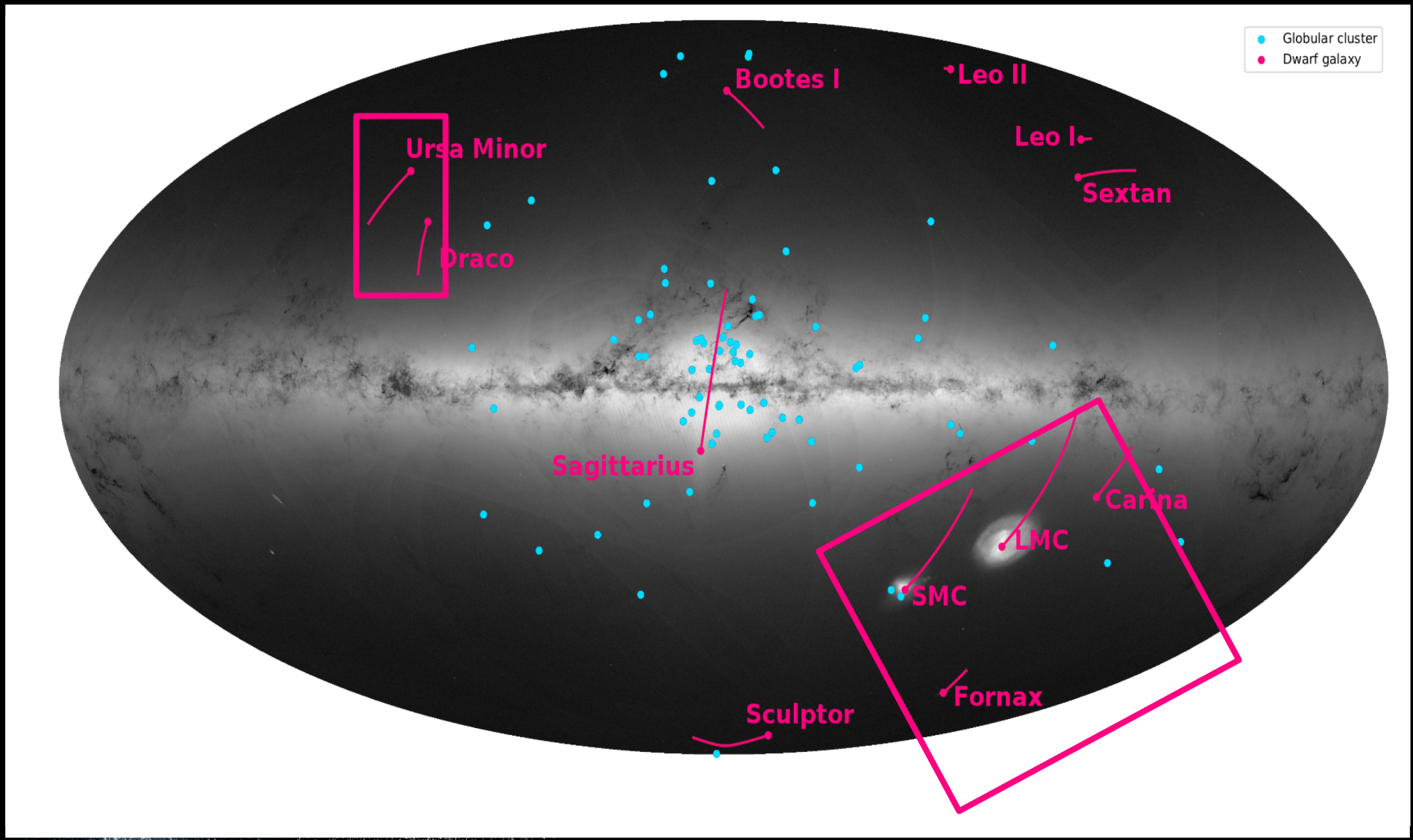


Credit : ESA/Gaia/DPAC

Des ondes dans la Voie Lactée



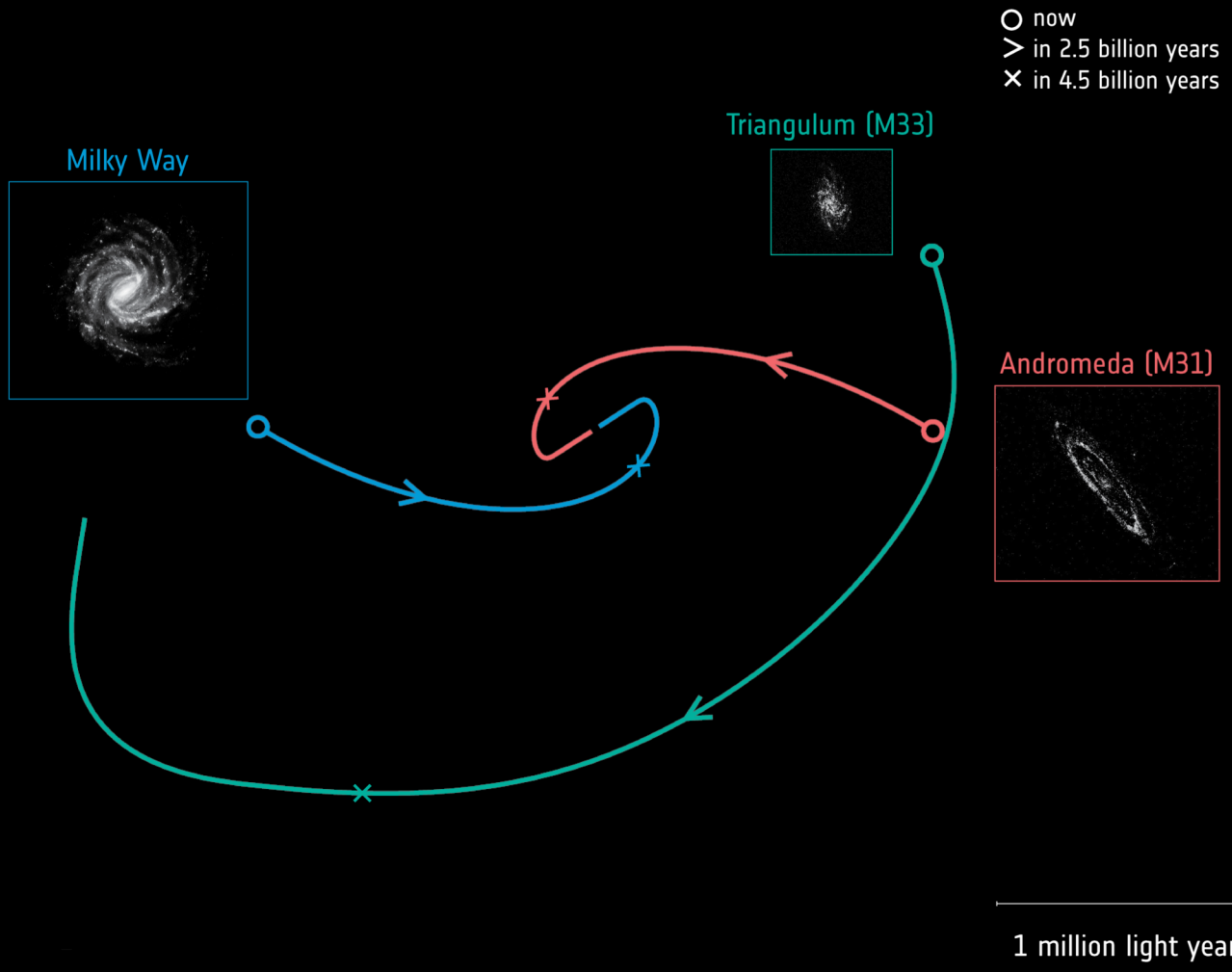
crédit : ESA/Gaia/DPAC T. Antoja, *A. Helmi*



crédit : ESA/Gaia/DPAC *Amina Helmi, Maarten Breddels*

Au-delà de la Voie Lactée

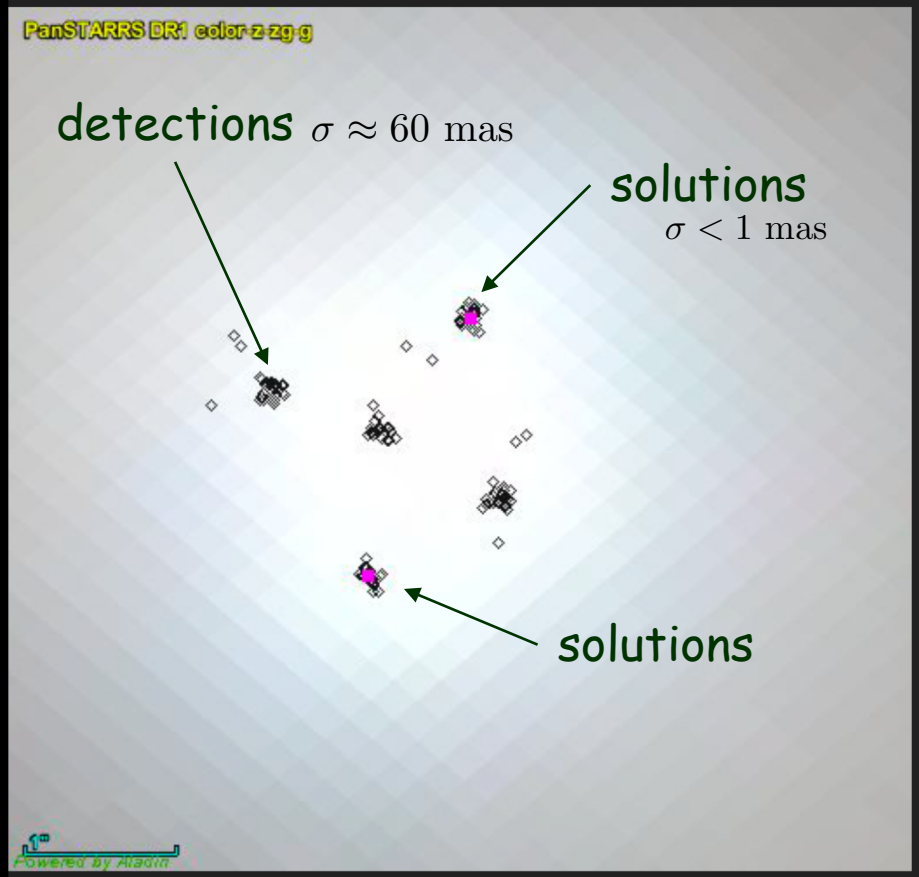
M31 et M 33

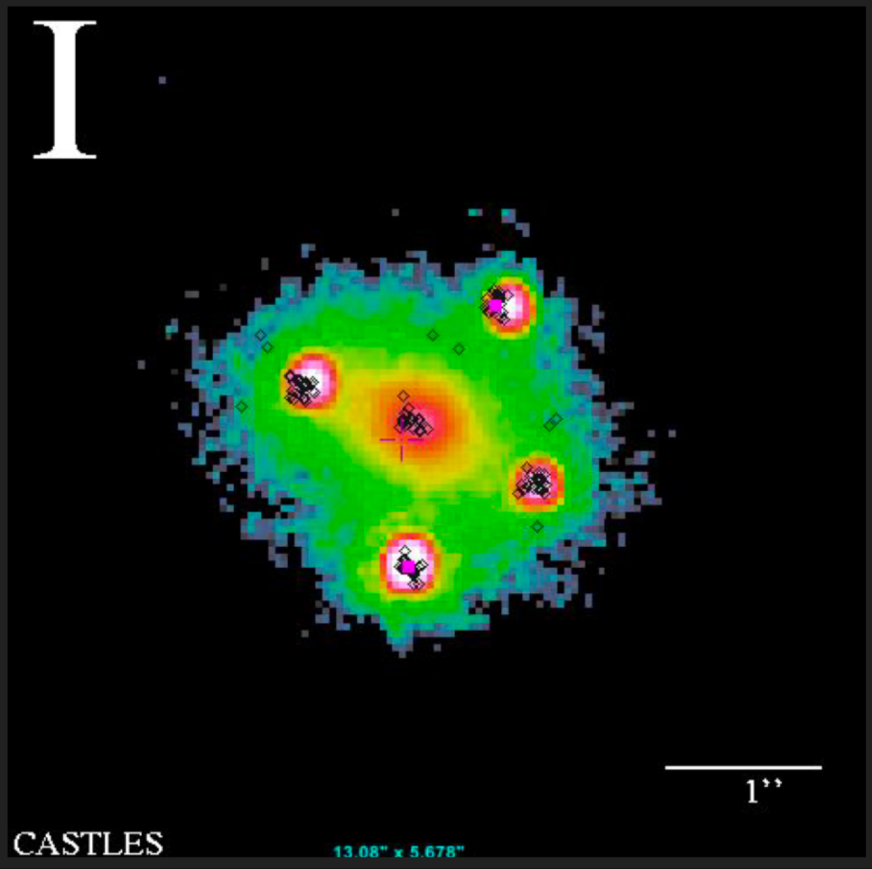


Lentilles gravitationnelles

- Exploite la résolution spatiale de Gaia

Q2237

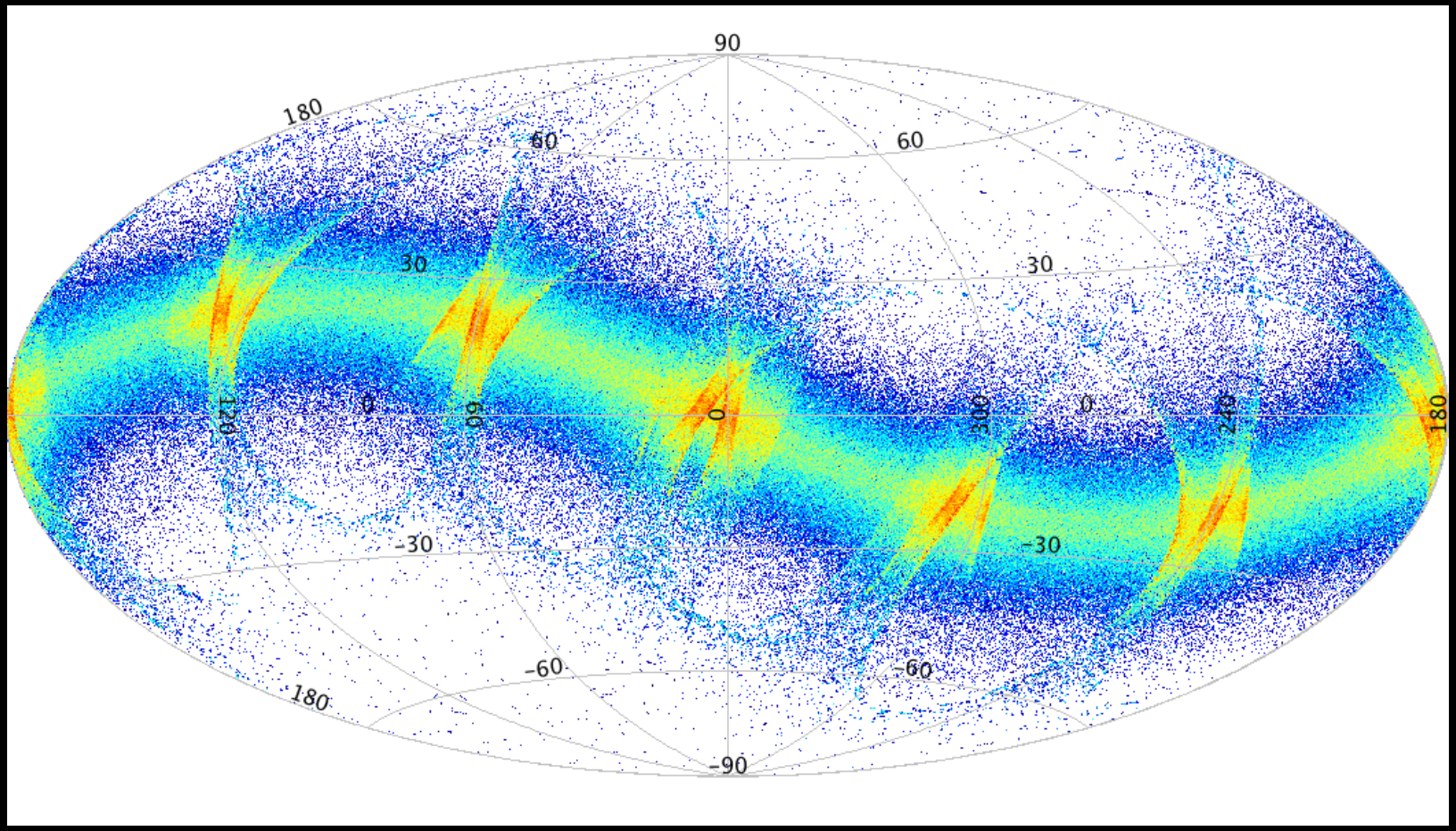




Ducourant et al.,

Astéroïdes observés par Gaia

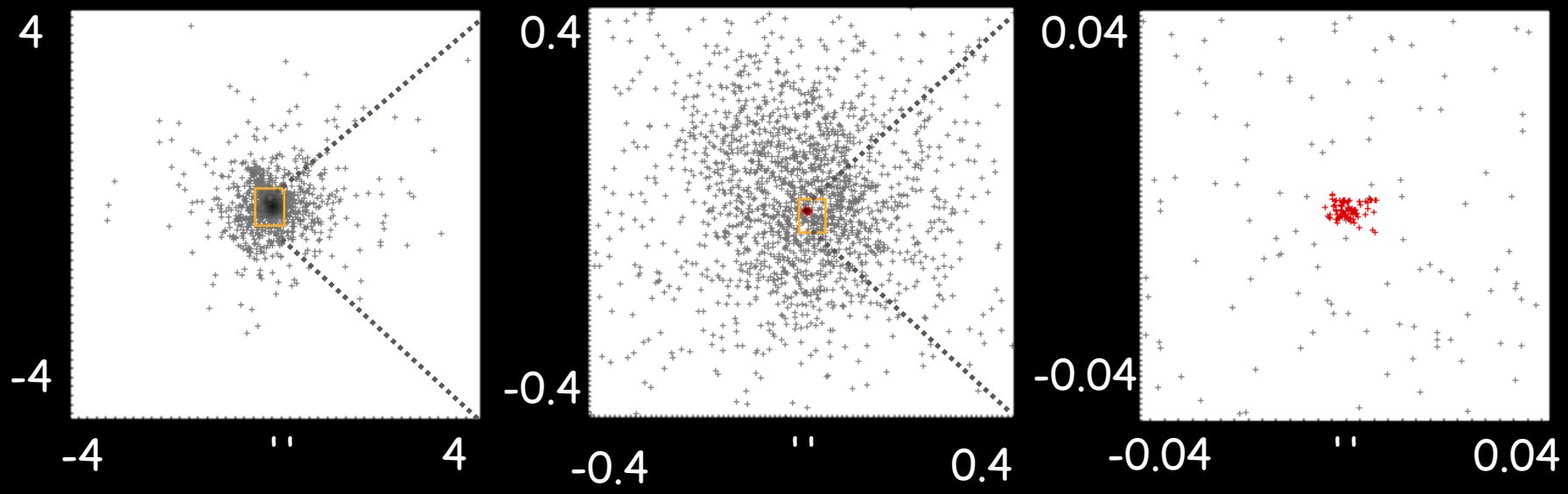
- ~ 14,000 planètes régulièrement observées
- 350,000 mesures durant les 22 mois



Credit : F. Mignard

Qualité des mesures Gaia

- Comparaison des mesures anciennes (gris) aux mesures Gaia (rouge)
- Avec Gaia : amélioration x 100

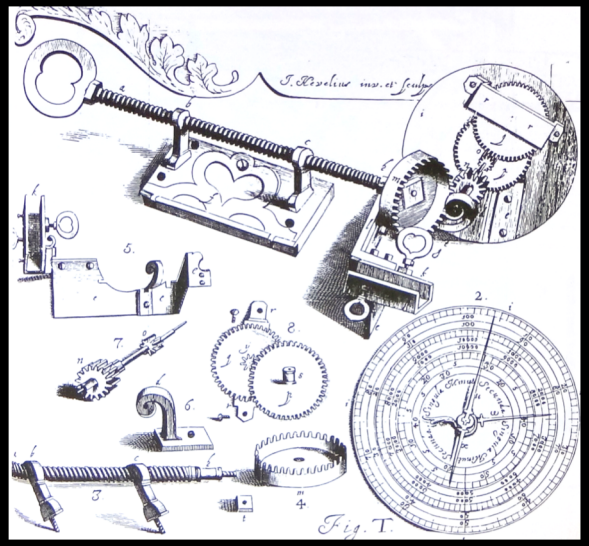


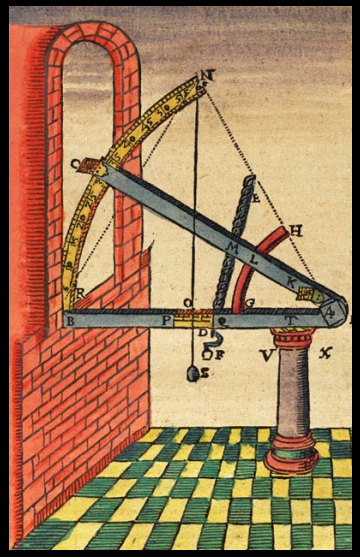
Credit : P. Tanga

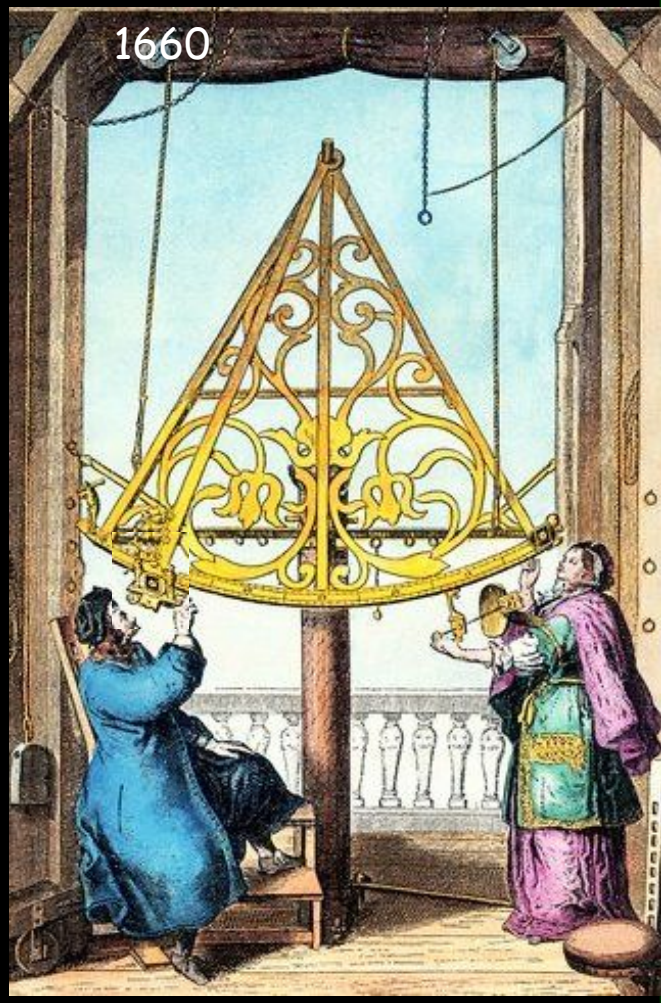
Place de Gaia dans l'histoire de l'astronomie ?



Quadrant de Tycho Brahé

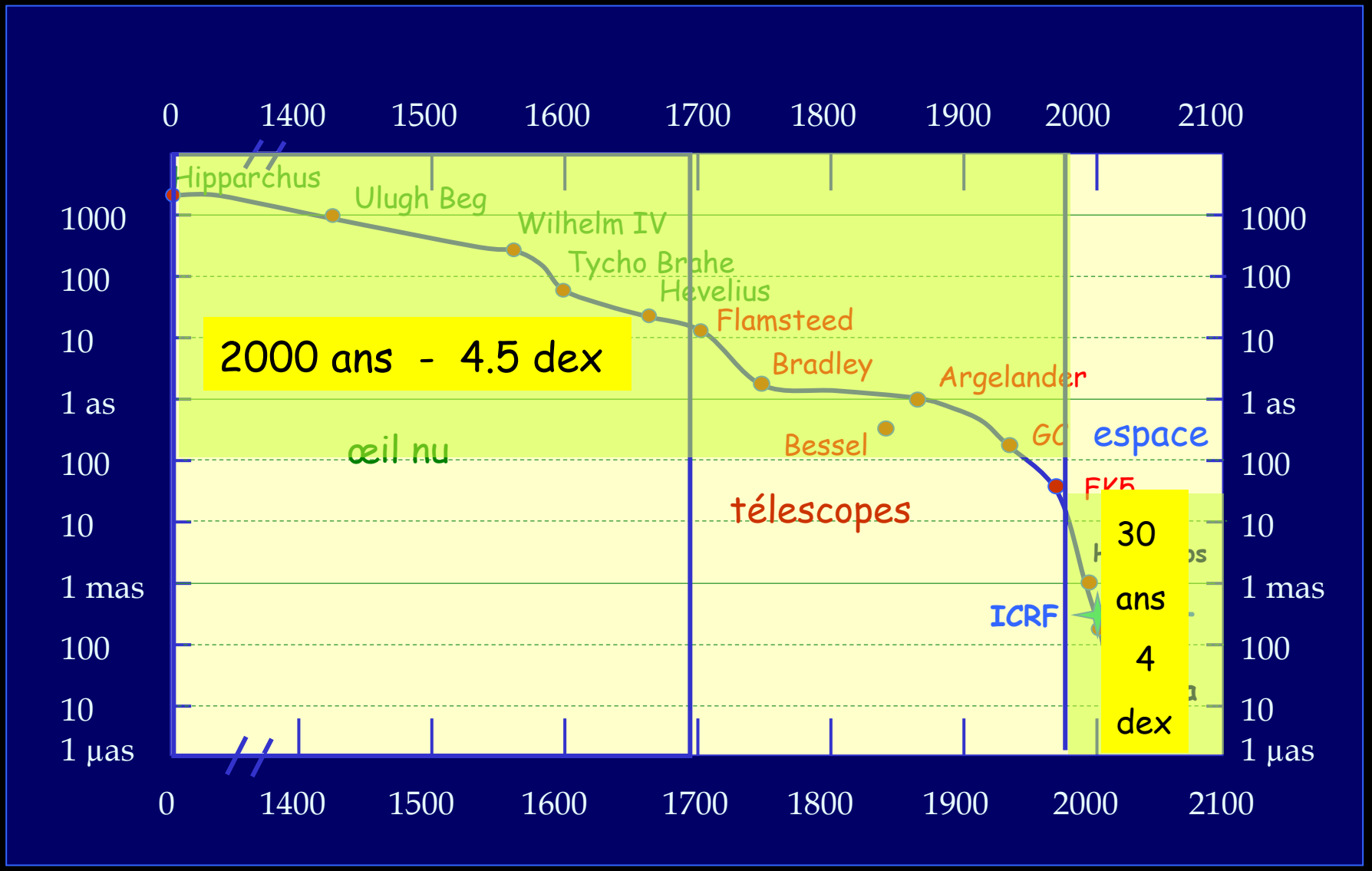






Sextant de Hevelius

L'âge d'or de l'astrométrie



GAIA DANS L'HISTOIRE

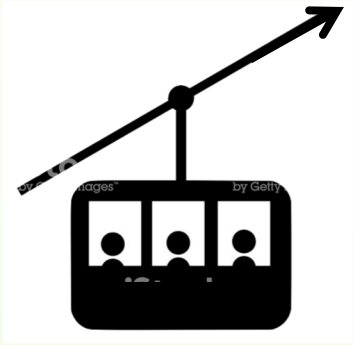
	1900	1980	2018
recensement du ciel	800,000	20 millions	1.7 milliard
sources de référence	350	1500	550,000
distances stellaires	100	10,000	1.3 milliard
mouvements stellaires	1000	250,000	1.3 milliard
vitesses radiales	50	30,000	7.2 millions
étoiles à éclat variable	300	15,000	500,000
températures des étoiles	10,000	300,000	150 millions

APPRÉCIER LE GAIN EN PRÉCISION

Une étoile moyenne de Gaia, de magnitude ~ 18

précision

2018 0"0002



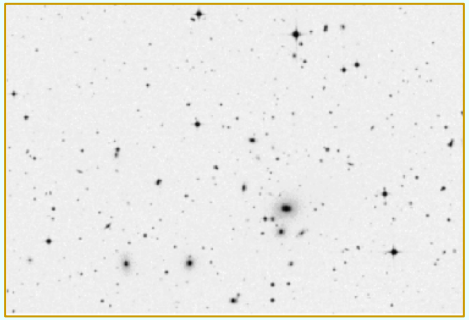
× 1000

2000 0"2

÷ 100

1600 20 "

Epoque





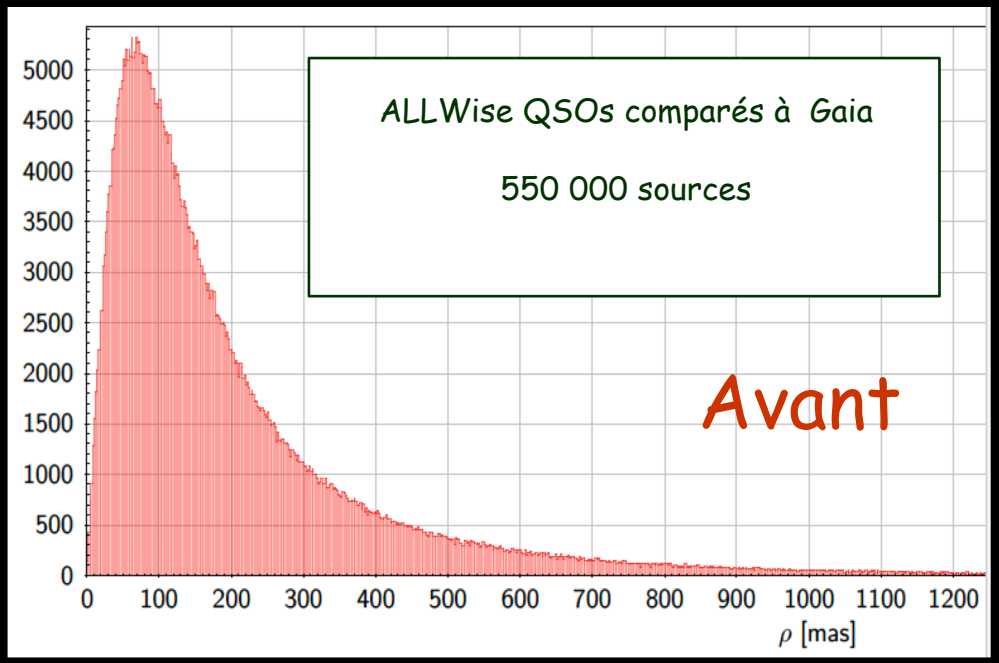
Catalogues stellaires

- Nombreux types de catalogues dans l'histoire
  - inventaire de ce qui se trouve sur la voute céleste ➔ Gaia
    - étiquettes sur les objets pour les retrouver
    - distinguer les étoiles des autres sources
      - complet jusqu'à une certaine magnitude
      - pas d'exigence de grande précision
  - référence de position pour se repérer dans le ciel ➔ Gaia
    - rattachés au Soleil ou aux quasars
    - observations fondamentales (on repart de 'zéro')
      - exigences ultimes en matière de précision
      - la qualité l'emporte sur la quantité
  - catalogues spécialisés : V_r, étoiles variables, spectres …. ➔ Gaia

Les inventaires anciens et modernes

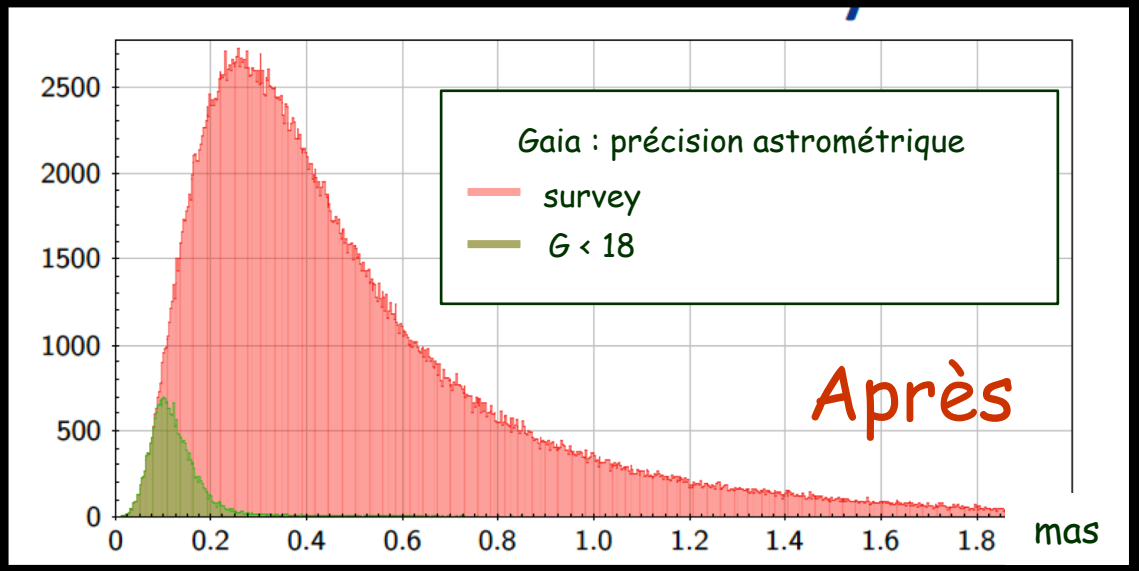
Nom	Epoque	N. étoiles	mag <	Précision
Ptolémée	II^e siècle	1030	6	0.3 °
Flamsteed	1700	2934	7	20 ″
Lacaille	1750	10 000	7	5 ″
Lalande	1800	48 000	9	3 ″
BD	1860	450 000	9.5	20 ″
CD	1900	600 000	10	20 ″
CPD	1900	450 000	11	5 ″
Carte du Ciel	1950	2 M	12	0.5 ″
Tycho 2	2000	2.5 M	11.5	50 mas
2MASS	2000	300 M	15 (IR)	500 mas
USNO B1	2000	1000 M	21	200 mas
Gaia	2015	1700 M	21	0.2 mas
LSST	2030 ?	15 B	24	5 mas

Quasars: régime minceur avec Gaia



précision astrométrique x 500

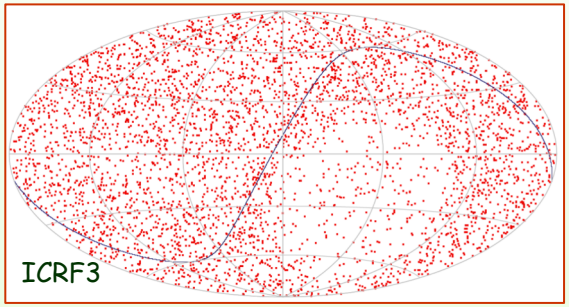
150 mas ➔ 0.3 mas

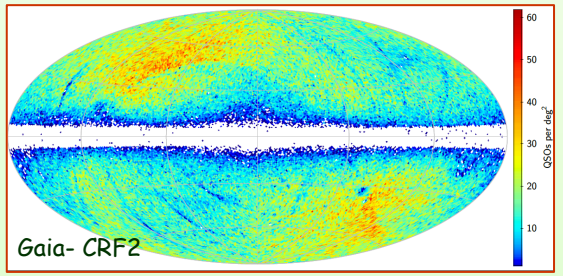


Les catalogues de référence astrométrique

Nom	Epoque	N. étoiles	mag <	Précision
Lacaille	1760	397	7	10 ″
Maskelyne	1774	36	5	5 ″
Piazzi	1818	220	6	2 ″
Bessel	1830	36	5	1 ″
Argelander	1869	160	6	1 ″
Auwers	1879	539	6	0.5 ″
FK4	1963	1535	7.5	0.2 ″
FK5	1988	1535	7.5	40 mas
Hipparcos[1]	1996	100 000	11.5	1 mas
ICRF1 (Radio)	1998	620	-	2 mas
ICRF2 (Radio)	2009	3400	-	0.6 mas
ICRF3 (Radio)	2018	4500	-	0.2 mas
Gaia QSOs	2018	550 000	21	0.4 mas
Gaia QSOs $G < 18$	2018	27 000	18	0.12 mas

(1) quasi-fondamental



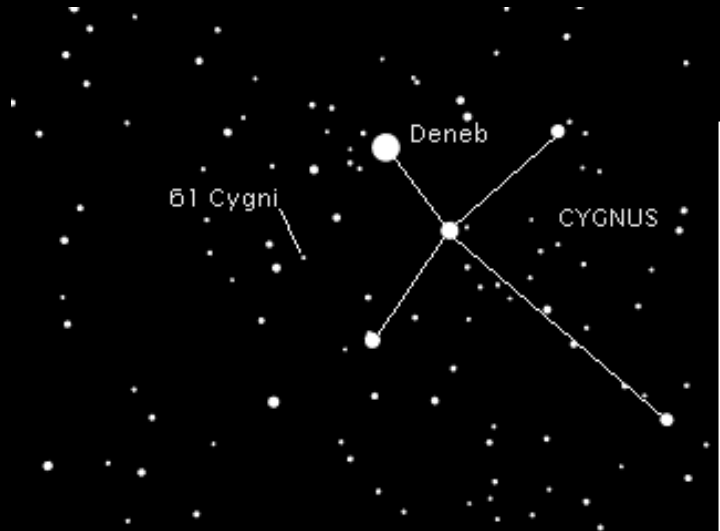


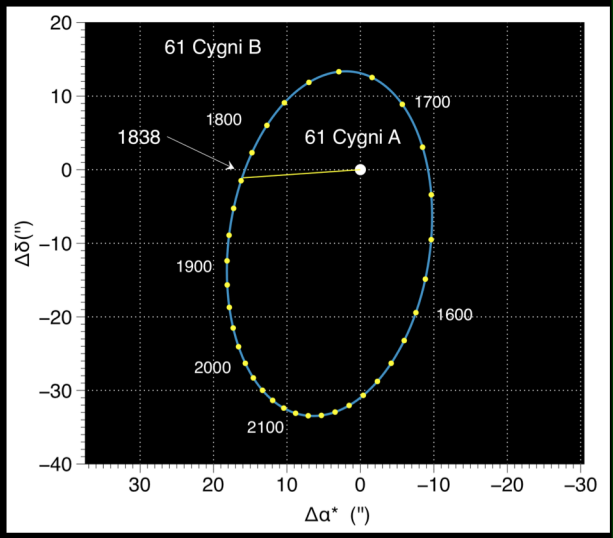
Observatoire de la CÔTE d'AZUR

Parallaxes : première mesure crédible en 1838



F. Bessel (1784-1846)





ASTRONOMISCHE NACHRICHTEN.

№. 365. 366.

Bestimmung der Entfernung des 61sten Sterns des Schwans.

Von Herrn Geheimen-Rath und Ritter *Bessel*.

Parallaxe(s) de 61 Cygni

Bessel 1838 $0''.314$ – **10.4 al**

Bessel 1840 $0''.348$ – **9.4 al**



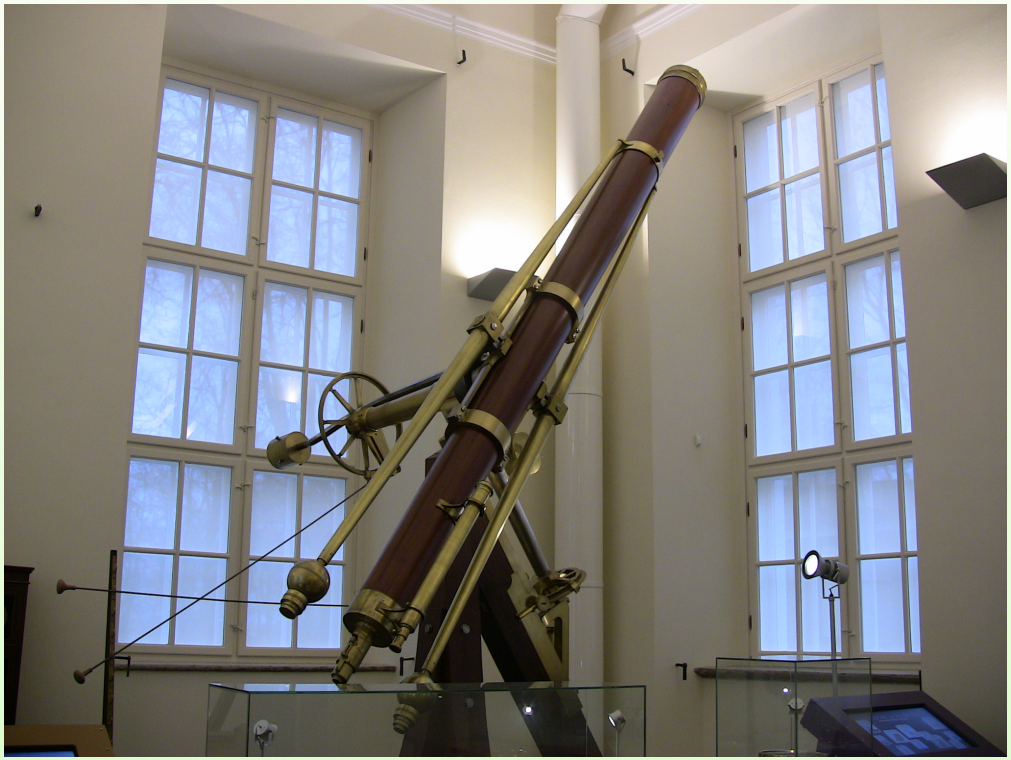
F. Bessel (1784-1846)

Autres déterminations

			Parallaxe	Distance (moderne)
• 1839	W. Struve	Vega	0".262 ± 0.02	12.5 al (25.3)
• 1840	Henderson	α Cent	0".976 ± 0.06	3.2 al (4.3)
• 1842	Lindenau	polaire	0".144 ± 0.06	22.6 al (431)

Lunette de l'observatoire de Dorpat (Estonie) utilisée par W. Struve pour la parallaxe (distance) de Véga

Optique de Fraunhofer



Distances des étoiles : 1900-1950

Nº. I. THE PARALLAX OF 248 STARS OF THE REGION AROUND B.D. + 35,4013 CONTAINED ON PHOTOGRAPHS PREPARED BY A. DONNER, PROFESSOR OF ASTRONOMY AND DIRECTOR OF THE OBSERVATORY AT HELSINGFORS,

MEASURED AND DISCUSSED BY PROF. J. C. KAPTEYN.

GRONINGEN. — HOITSEMA BROTHERS. — 1900.

THE

ASTRONOMICAL JOURNAL.

FOUNDED BY B. A. GOULD.

VOL. XXVI. NOS. 618-619.

ALBANY, N.Y., 1910 OCTOBER 28. NOS. 18-19

DETERMINATIONS OF STELLAR PARALLAX,

[From Photographs Taken at the Cambridge Observatory (England) by Arthur R. Hinks and the Writer.]

By HENRY NORRIS RUSSELL.

CATALOGUE DE PARALLAXES STELLAIRES;

PAR M. G. BIGOURDAN.

Jusque vers le second tiers du siècle dernier, la détermination des parallaxes stellaires a défié la précision
atteindre au moyen des instruments les plus
on sait aujourd'hui que certaines étoiles ont

ASTRONOMISCHE NACHRICHTEN.

Nº 2915-16.

Uebersicht der in den letzten 60 Jahren ausgeführten Bestimmungen von Fixsternparallaxen.

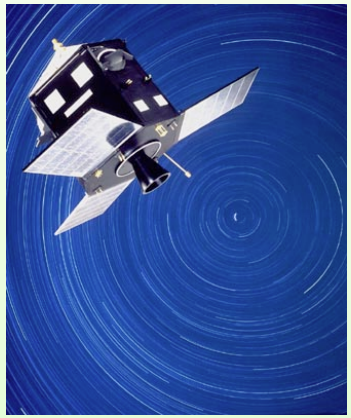
Von *J. A. C. Oudemans.*

Une ère nouvelle pour les parallaxes

année	nombre	
1840	3	61 Cygni, Vega, α Cent
1850	20	C.A.F. Peters
1890	45	Ch. André (astron. stell.)
1910	300	dont 52 avec la photograhie
1925	2000	plaques photos
1965	6000	Catalogue de Yale
1990	8000	juste avant Hipparcos
1996	120 000	Hipparcos
2018	1 300 M	Gaia
2025	1 800 M	Gaia



F. Schlesinger
1871-1943



- Avant Gaia :
  - étoiles relativement proches
  - faible nombre comparé aux catalogues d'inventaire
  - travail considérable avec un faible rendement

Vitesses radiales

- Essais de mesure des vitesses radiales dès 1868 (Sir W. Huggins)
- Déplacement des raies en raison du mouvement sur la ligne de visée
  - effet Doppler-Fizeau
  - principe énoncé dès 1841 (Doppler) et compris par Fizeau pour la lumière
- Difficultés :
  - extrême petitesse du déplacement
  - besoin d'un spectre de référence
- Premières mesures annoncées à la Royal Society en 1868
  - V_r Sirius = + 47 km/s (aujourd'hui – 7.6 km/s)
- Progrès considérables avec la photographie
  - spectrographe
  - En 1890 H. Vogel obtient ~ – 15 km/s
- technique nouvelle et fondamentale
  - V_r + mouvement propre = ~ distance



W. Huggins 1824-1910

Vitesses radiales

Année	nombre	
1870		Premiers programmes à Greenwich
1892	50	Première liste de Vogel (Potsdam) $\sigma = 2.5\,\mathrm{km\,s^{-1}}$
1920	2 000	+ 250 /an
1931	7 000	1$^{\mathrm{er}}$ Catalogue général des Vr
1955	15 000	Prisme objectif
2000	50 000	Multiplexage, fibres (60% Hipparcos sans Vr)
2015	500 000	Grands relevés $I < 12, \sigma = 1.5\,\mathrm{km\,s^{-1}}$
2018	8 M	Gaia $\sigma = 0.5\,\mathrm{km\,s^{-1}} (G < 12)$
2021	40 M	Gaia $(G < 14)$
2025	100 M	Gaia $(G < 16$ + variabilité$)$



H. Fizeau 1819-1896



H. Vogel 1841-1907

- Avant Gaia :
  - faible nombre comparé aux catalogues d'inventaire
  - travail exigeant en terme de ressources
  - difficile d'avoir des étoiles > 9 mag

Mouvement réel des étoiles

ID HIP	Pos: ICRS – J1991.25 α deg	δ deg	Par. π mas	Prop. Motion $\mu_{\alpha*}$ mas/yr	μ_δ	Standard errors $\sigma_{\alpha*}$ mas	σ_δ	σ_π	$\sigma_{\mu_{\alpha*}}$ mas/yr	σ_{μ_δ}	Soln. F1 %	F2	Multiplicity Sce	θ deg	ρ "	σ_ρ "	ΔHp mag	σ mag
1	8	9	11	12	13	14	15	16	17	18	29	30		63	64	65	66	67
1338	4.18700521	41.06905721	18.92	190.14	27.75	4.4	3.6	6.6	6.3	4.5	21	2.93	TYC	331	9.922	0.013	1.15	0.03
18045	57.84982093	−25.93298679	21.42	273.72	167.93	2.8	2.5	4.3	2.9	3.1	33	2.61	SS2					
27464	87.24506095	63.69702032	4.12	5.07	−98.19	9.3	11.7	16.0	10.3	13.7	16	4.38	TYC	259	4.180	0.023	0.32	0.03
31132	97.98452970	−27.72950422	17.95	21.31	217.87	1.8	1.7	2.6	2.2	2.3	6	4.80	TYC					
34226	106.43757563	26.14031575	21.74	18.58	−10.54	11.7	6.6	12.0	13.1	9.7	40	2.93	HIC	213	1.666	0.015	0.07	0.01
35311	109.41026120	−29.01434479	7.92	−4.53	−7.01	6.1	8.4	11.4	7.7	11.5	8	1.27	SS2	161	8.311	0.018	0.80	0.02
41884	128.10658000	−0.95292566	−2.02	−6.15	13.79	2.6	2.8	3.7	3.4	2.8	36	3.49						
51496	157.76458366	−21.64374499	21.86	240.98	−355.39	3.4	2.9	3.1	3.1	2.6	36	3.40	TYC					
59154	181.96462412	−75.92111154	68.10	−159.60	−107.29	5.4	11.1	7.4	6.4	15.6	60	2.06	TYC	268	1.042	0.009	0.06	0.01
81402	249.38478619	−5.50508816	24.33	−104.04	12.86	9.2	7.5	9.3	15.4	14.0	9	2.11	TYC	10	6.726	0.008	0.05	0.02
81694	250.32376113	30.10980007	75.41	−96.76	86.94	6.8	12.8	11.6	9.1	16.4	35	2.31	TYC	155	0.595	0.015	0.78	0.02
86405	264.83534539	−75.07618015	−1.24	6.63	−7.45	4.4	4.5	6.5	5.1	5.4	19	2.87						
98713	300.75640066	−76.13312308	14.78	188.39	−169.99	1.2	1.6	1.9	1.4	1.8	21	4.04	TYC					



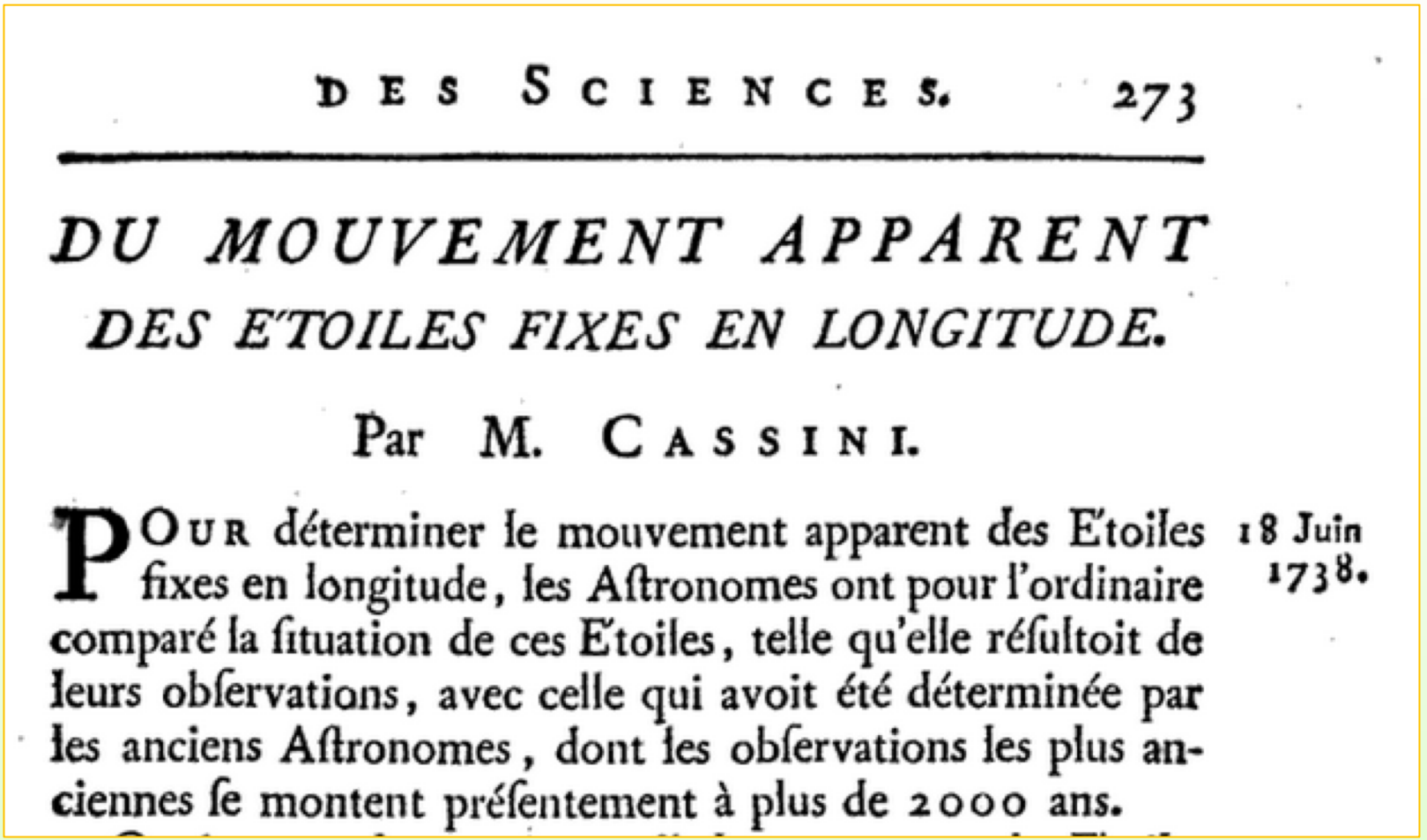


E. Halley (1656-1742)

- La sphère céleste était appelée par les anciens 'sphère des fixes'
  - il n'y avait aucun changement apparent au cours du temps
  - les étoiles restaient à la même place les unes par rapport aux autres
    - Ptolémée (II^e siècle) le montre par des mesures 'précises'.
  - l'ensemble tournait autour de la Terre en 24h
- Grosse surprise en 1718 lorsque l'astronome E. Halley annonce les déplacement de quelques étoiles brillantes

J. Cassini et le mouvement des étoiles

- Question discutée durant tout le 17e et 18e siècle



DES SCIENCES. 273

DU MOUVEMENT APPARENT DES ETOILES FIXES EN LONGITUDE.

Par M. CASSINI I.

POUR déterminer le mouvement apparent des Etoiles fixes en longitude, les Aſtronomes ont pour l'ordinaire comparé la ſituation de ces Etoiles, telle qu'elle réſultoit de leurs obſervations, avec celle qui avoit été déterminée par les anciens Aſtronomes, dont les obſervations les plus anciennes ſe montent préſentement à plus de 2000 ans. 18 Juin 1738.

Mouvements propres

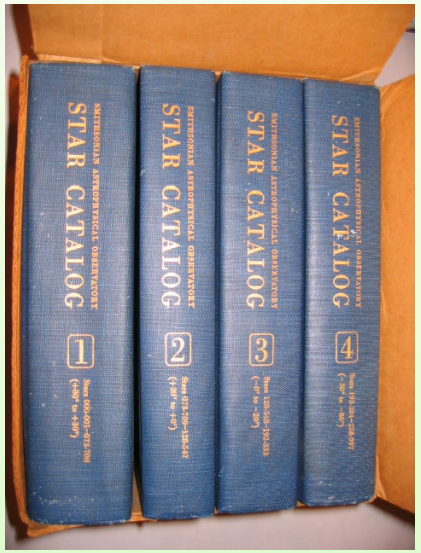
Année	nombre	
1738	1	J. Cassini
1760	15	T. Mayer
1790	36	N. Maskelyne
1835	390	Argelander, $\mu > 100$ mas
1856	3200	Mädler, (Etoiles de Brad
1939	33 000	Gal. Cat., $V < 7.5$ $\sigma \approx 1$
1966	260 000	SAO $\sigma \approx 15$ mas/a
1990	400 000	PPM $\sigma \approx 4$ mas/a
1996	120 000	Hipparcos $\sigma \approx 1$ mas/a
2002	2.5 M	Tycho-2 $\sigma \approx 2.5$ mas/a
2018	1.3 B	Gaia $\sigma \approx 0.3$ mas/a @ $G = 18$
2025	1.7 B	Gaia $\sigma \approx 0.03$ mas/a @ $G = 18$

THE GENERAL CATALOGUE OF STELLAR POSITIONS AND PROPER MOTIONS

By RALPH E. WILSON

Mount Wilson Observatory
Carnegie Institute of Washington

THE recent completion, through the joint efforts of the Carnegie Institute of Washington and the Dudley Observatory of Albany, of the General Catalogue of the positions and proper motions of 33,342 stars marks an epoch in the history of astronomy of position. This work employed an average of twenty persons continuously for over thirty years and its total cost exceeded $1,000,000. The results



La suite de la mission

- Mission d'observations prévue jusqu'en juin 2019
  - soit 5 ans de mesures (130 milliards de détection)
  - il faut encore au moins 2 à 3 ans de traitement
  - prochain catalogue en ~ décembre 2020

- Mais Gaia peut fonctionner plus longtemps
  - jusqu'en 2023-24 si tout va bien
  - il y a déjà une extension ferme jusqu'en 2020
  - extension probable jusqu'en 2023



Contenu envisagé pour la DR3

- Catalogue astrom/photom pour 1.8 milliard de sources
- Vitesses radiales pour ~ 40 M
- Données étoiles variables ~ 10 M
- Paramètres astrophysiques des étoiles ~ 300 M
- Spectres Bp, Rp, Vr NEW
- Quasars et système de référence ~ 1 M
- Objets système solaire ~ 100,000
- Etoiles doubles et multiples NEW
- Imagerie petits champs NEW
- Classification des sources (étoiles, galaxies, quasars …) NEW




merci de votre attention
Christoph Ota