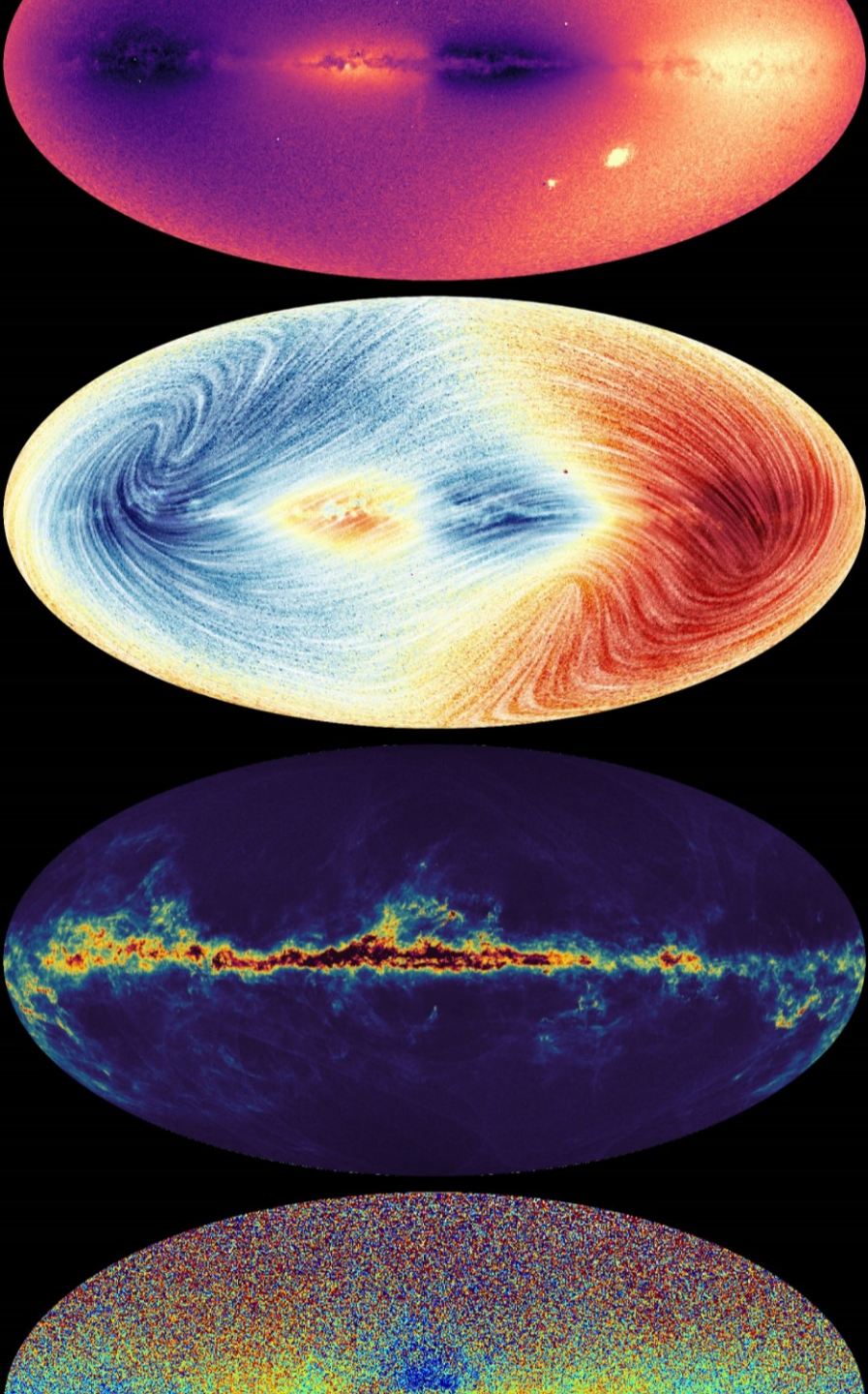


La mission astrométrique GAIA

Wilhem Roux (CNES, Toulouse)

Université Clermont Auvergne , Aubière

13/03/2024 à 20h30



Le CNES

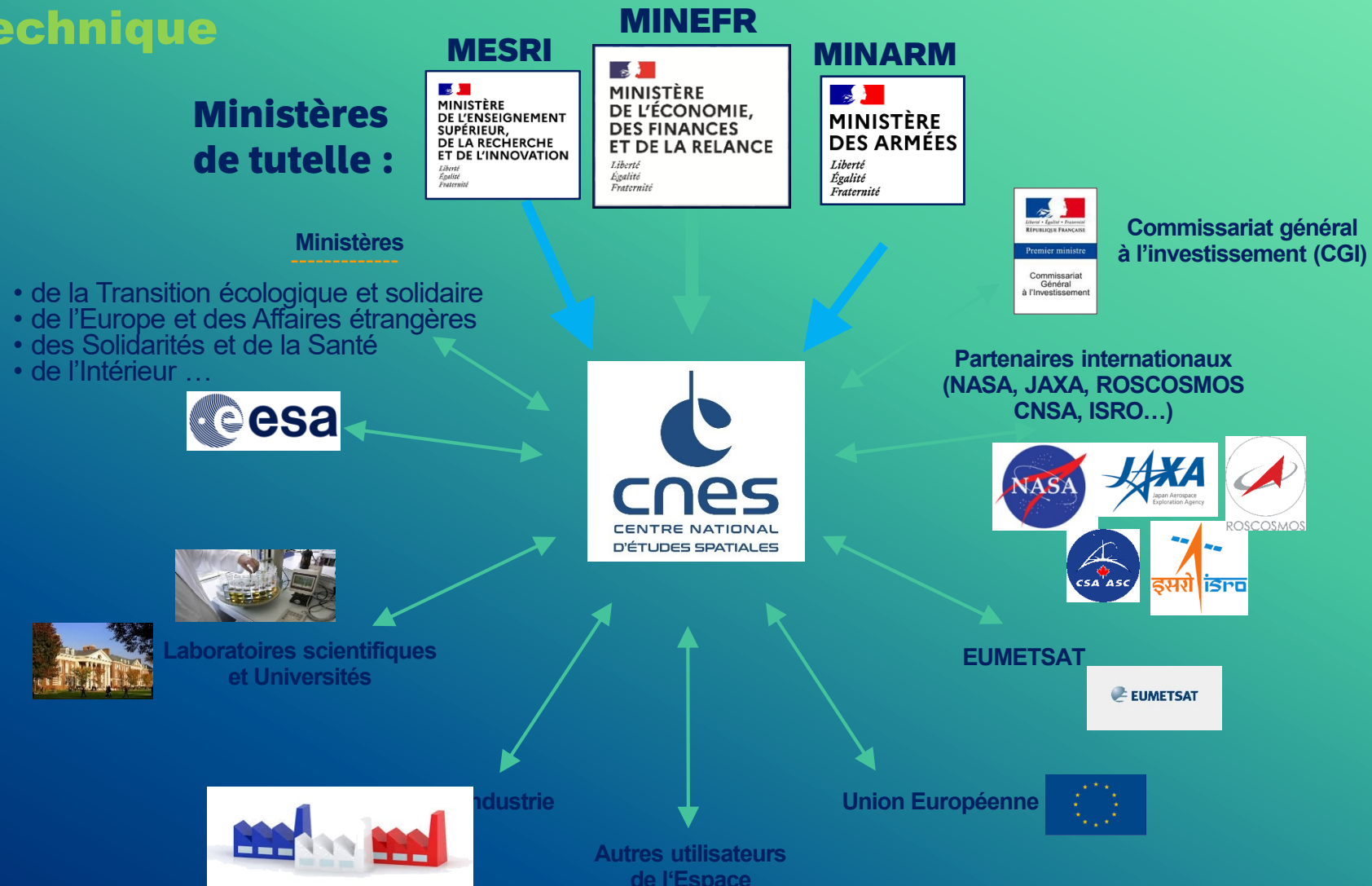
Agence de programmes et centre d'excellence technique

Créé en 1961, le CNES est un EPIC

(Etablissement Public scientifique et technique à caractère Industriel et Commercial)

Il propose au gouvernement la politique spatiale française et la met en œuvre au sein de l'Europe.

C'est un architecte système chargé d'innover et de concevoir les nouveaux systèmes spatiaux.



5

Domaines
d'intervention

ARIANE



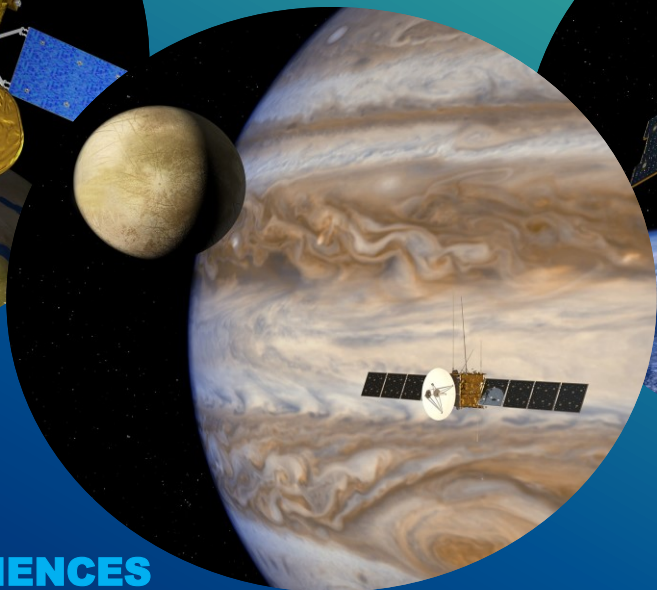
DÉFENSE



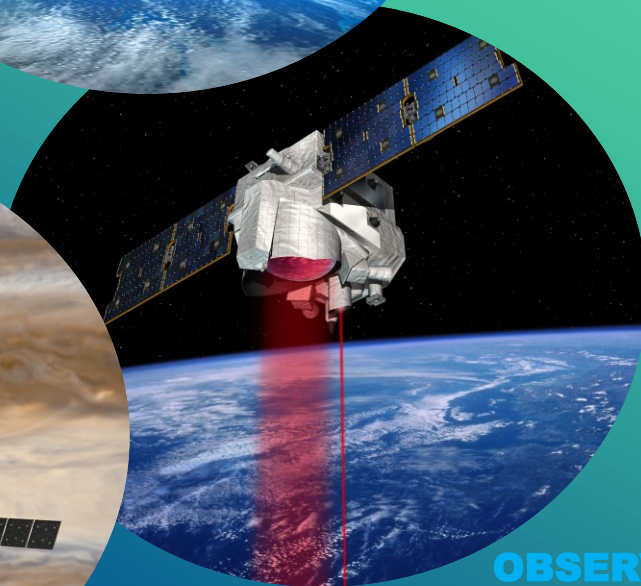
TÉLÉCOMMUNICATIONS



SCIENCES



OBSERVATION



Les sites

2,7
Mds €
budget

2^e
budget
mondial/hab

80%
revient à
l'industrie

PARIS (Les Halles) - 190 P

Siège du CNES

- Stratégie,
- Relations internationales,
- Administration



PARIS (Daumesnil) - 210 P

Lanceurs

Etude, conception, développement des systèmes de lancement (Ariane, Soyouz, Vega,)

Préparation du futur



TOULOUSE - 1720 P

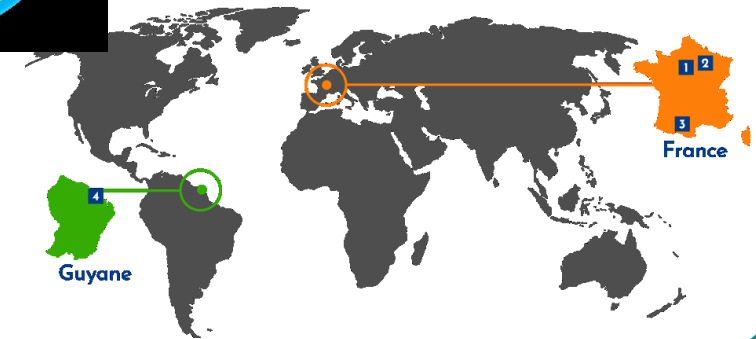
Centre Spatial de Toulouse

- Etude, conception, développement et contrôle des systèmes orbitaux
- Numérique et exploitation des données
- Préparation du futur
- Aire-sur-l'Adour : centre d'opération de ballons

GUYANE - 280 P

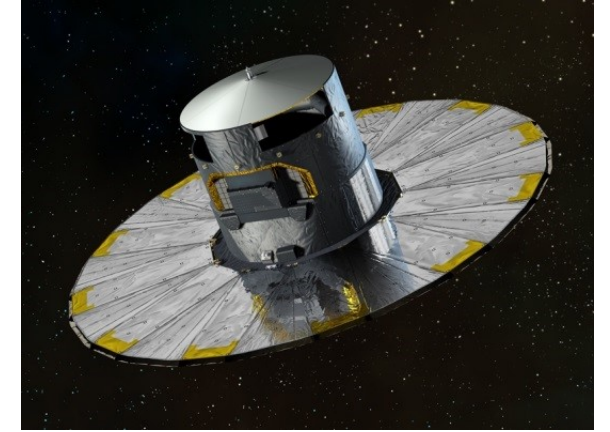
Centre Spatial Guyanais

- Ariane
- Soyouz
- Vega



4 centres
2,400
salariés

Sommaire



La mission

Le satellite

Les traitements de données

Les catalogues

Les résultats scientifiques

Objectifs de Gaia

Cartographier 1 milliard d'étoiles en 3D

- ❖ Soit moins de 1% de la Voie Lactée
- ❖ Mais 400 fois plus que le précédent catalogue (Hipparcos)

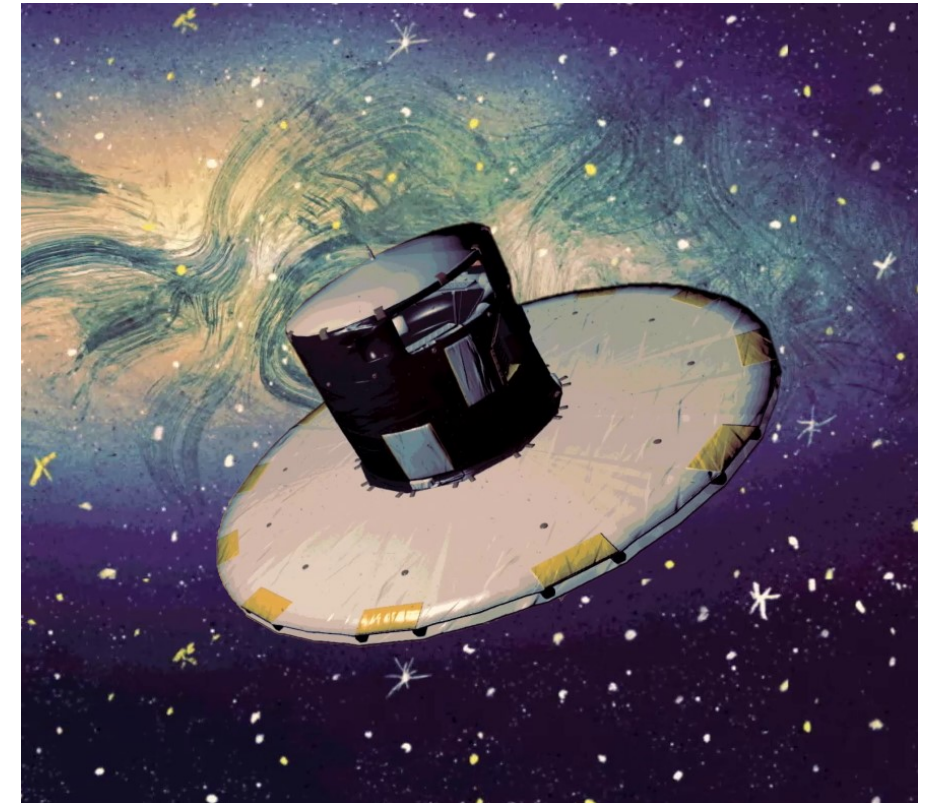
Pour chaque étoile, mesurer :

- ❖ Sa position (et distance) : **astrométrie**
- ❖ Sa lumière : **spectrométrie large bande + photométrie**
- ❖ Sa vitesse radiale : **spectrométrie bande étroite**
- ❖ Avec des précisions inégalées.

Résultat : une vue 3D dynamique à 6 paramètres

3 de position	α	δ	p
3 de vitesse	μ_α	μ_δ	v_r

+ des caractéristiques physiques



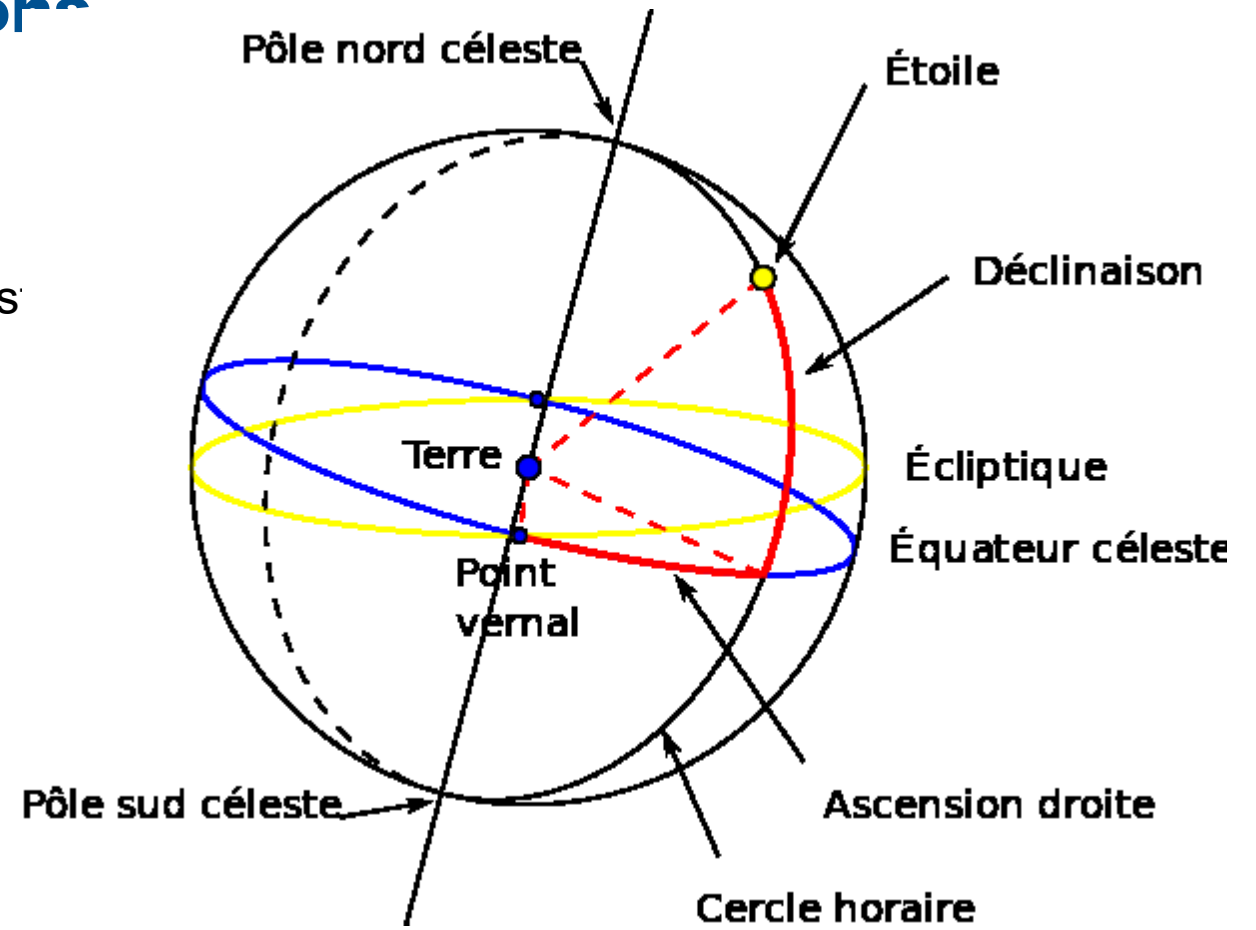
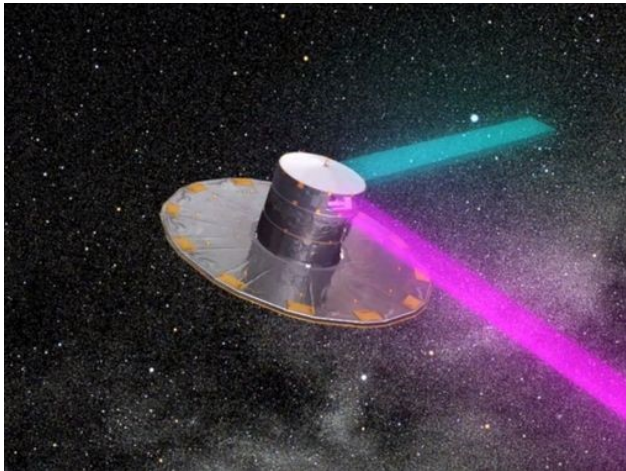
Astrométrie : mesurer des positions

Gaia **scanne** le ciel

- ❖ Ne prend pas de photos !
- ❖ A chaque fois qu'il voit une étoile (**transit**), il enregistre sa position

Positions = coordonnées célestes 2D

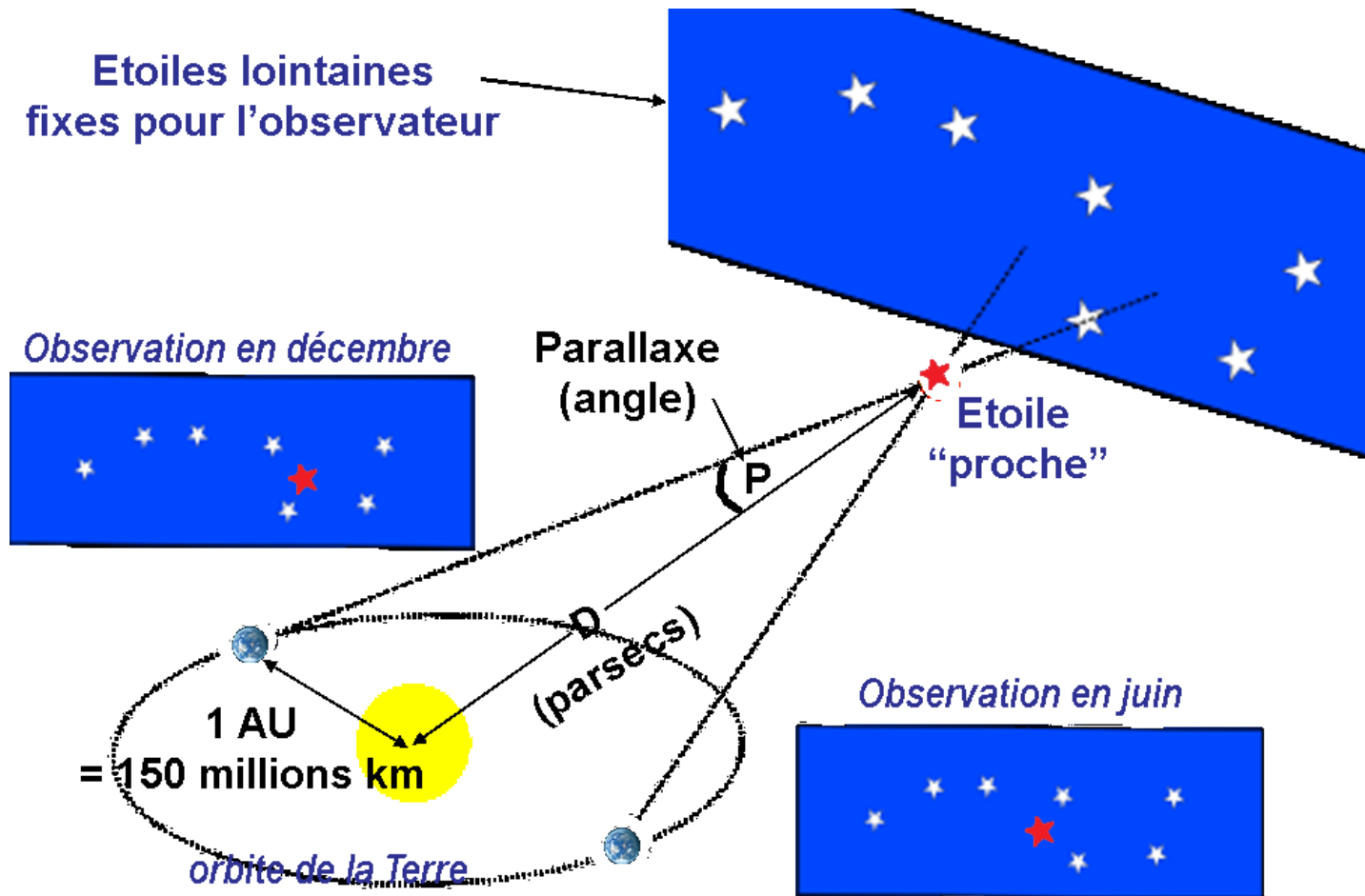
- ❖ Ascension droite (alpha) + déclinaison (delta)



α	δ	

La 3^e dimension avec la parallaxe

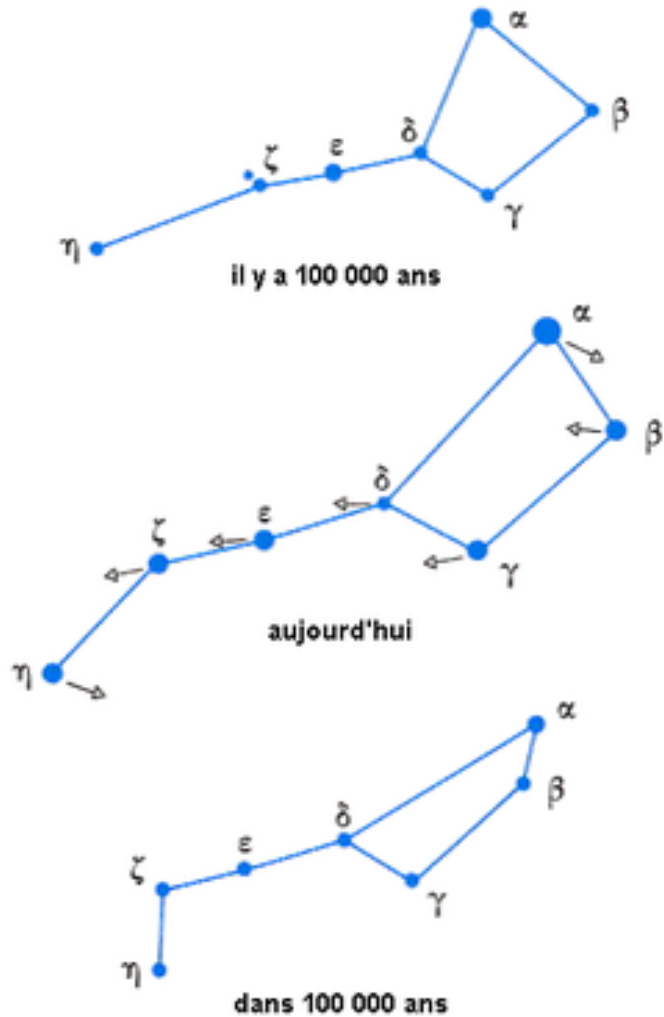
On mesure la position de l'étoile **à 6 mois d'écart**



$$D = \frac{R}{\tan(p)}$$

α	δ	p

Les étoiles bougent : mouvement propre



Vers l'astrométrie 5D

En mesurant de nombreuses fois la position d'une même étoile

- ❖ On obtient une courbe de son mouvement sur le ciel

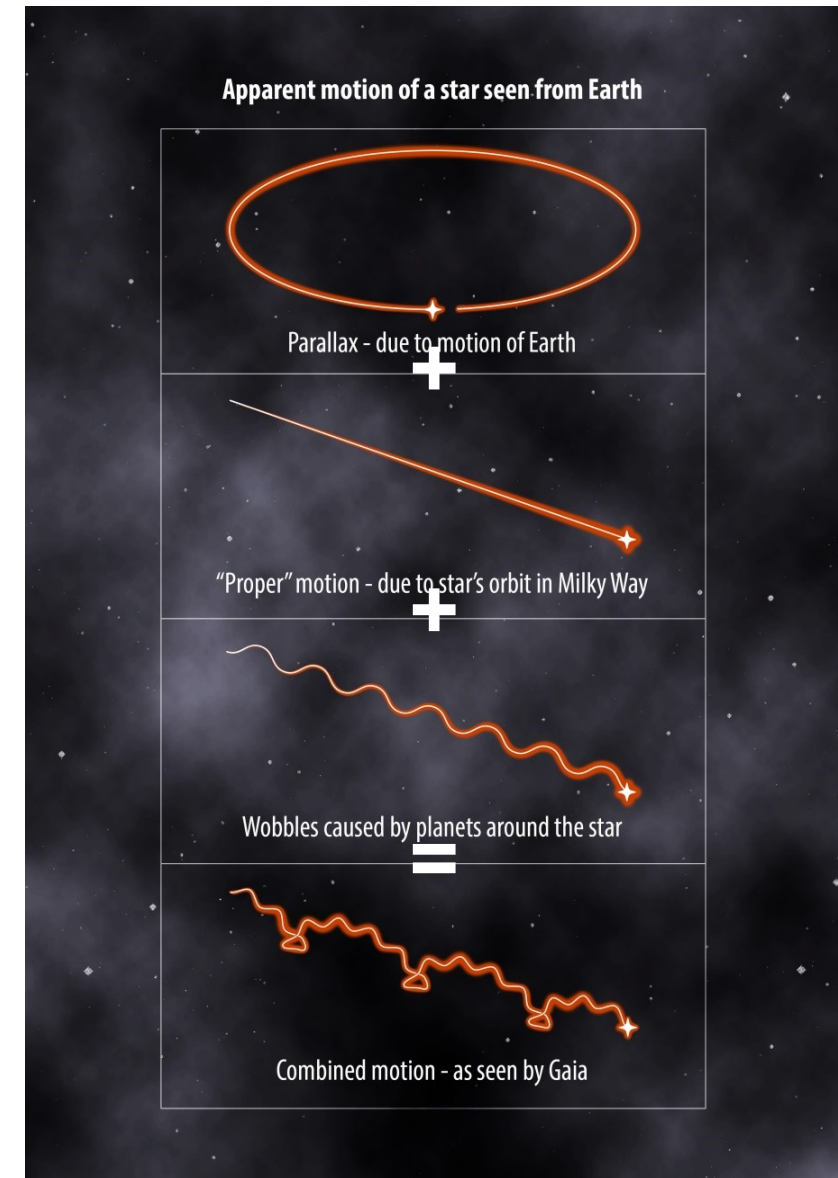
On en déduit :

- ❖ Sa parallaxe
- ❖ Son mouvement propre
- ❖ Et peut-être d'autres perturbations...

Il ne suffit pas d'avoir une bonne précision astrométrique, mais il faut aussi avoir **un maximum d'observations** pour un même objet

Plus la mission est longue et plus on peut détecter les faibles mouvements

α	δ	p
μ_α	μ_δ	



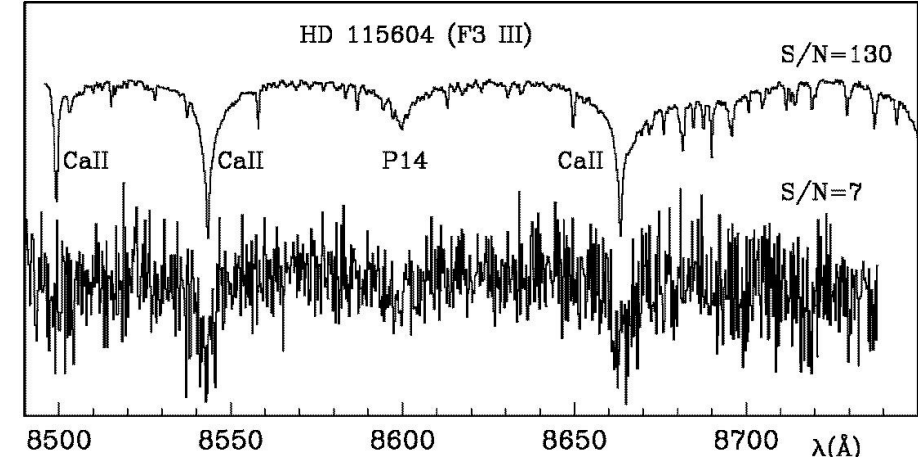
La 6^e dimension grâce au spectromètre bande étroite

Spectrométrie = étude des spectres

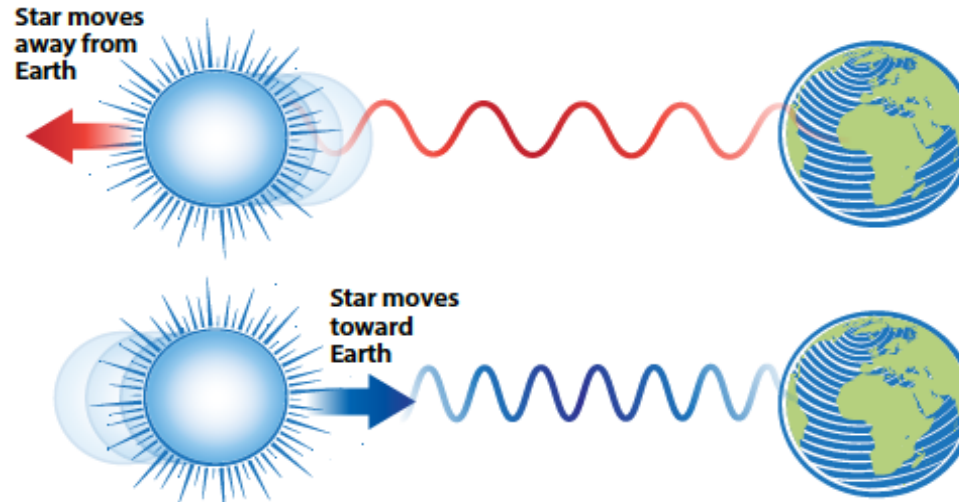
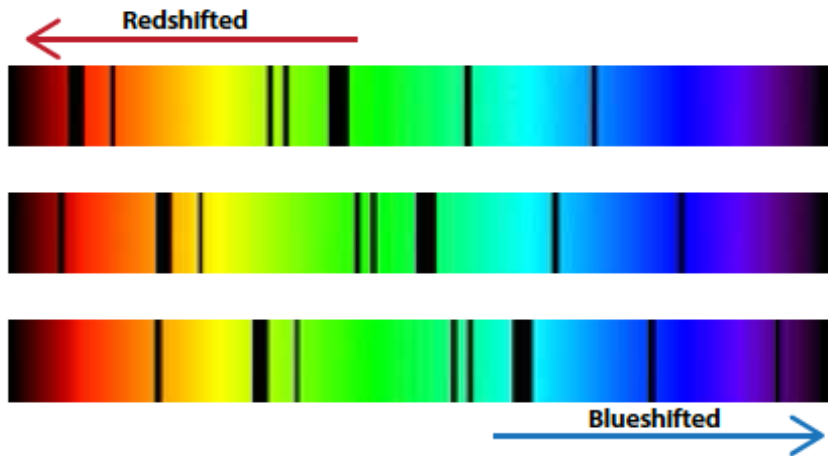
Par effet Doppler, on en déduit la dernière coordonnée de vitesse (vitesse radiale)

Mais limitée aux étoiles brillantes

Bande étroite mais très grande précision (raies Calcium)



The Doppler effect



α	δ	p
μ_α	μ_δ	v_r

La spectrométrie large bande pour compléter

Les spectres large bande permettent de déduire la nature de la source : étoile, galaxie, quasar...

Pour les étoiles, la couleur dominante du spectre indique sa **température** de surface :

❖ **bleu=chaud**, **rouge=froid** ! (Soleil = 5700K)

Connaissant sa distance (parallaxe), on en déduit le type de l'étoile (classification)

❖ Mais aussi ses caractéristiques physiques (masse, âge, rayon, métallicité...)

Avec le spectre bande étroite, on peut trouver ses propriétés chimiques (abondances de certains atomes)

Blue photometer:
330 - 680 nm

Red photometer:
640 - 1050 nm

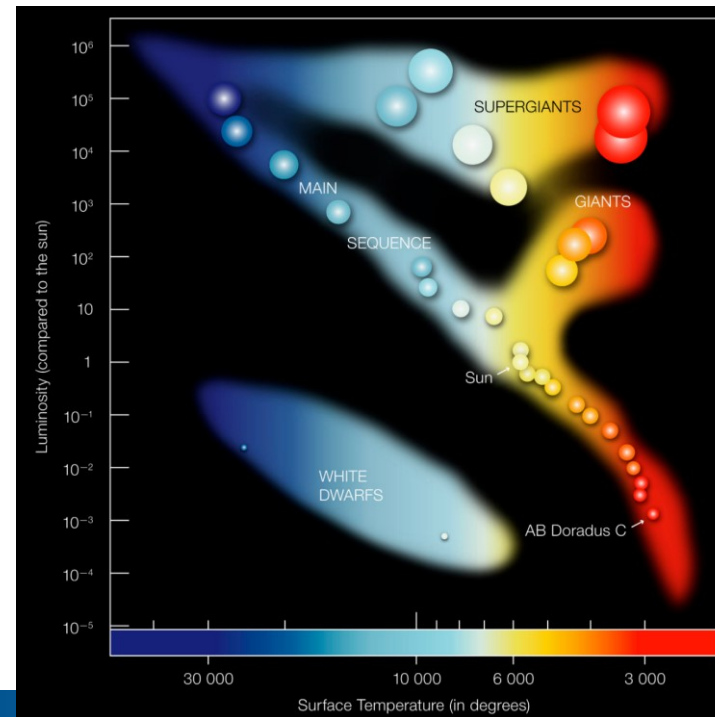
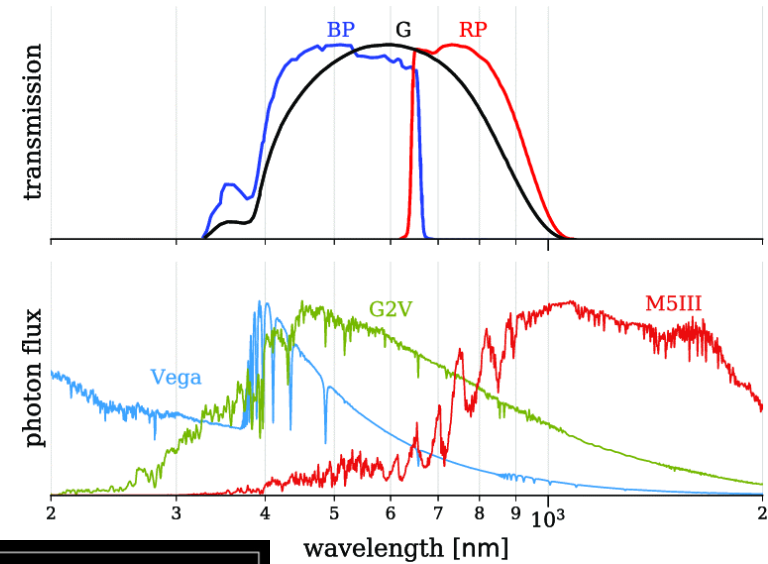


Diagramme Hertzsprung-Russell

Température VS Luminosité



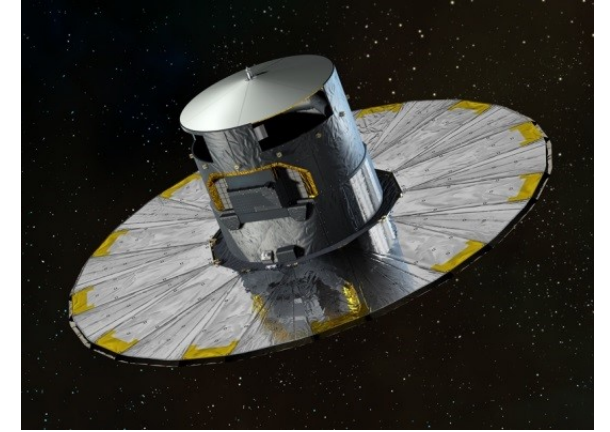
Encore plus loin...

Gaia détecte aussi:

- Les petits corps du système solaire (Solar System Objects) : astéroïdes, comètes...
- Les objets extragalactiques (hors Voie Lactée) : galaxies, quasars, étoiles des galaxies voisines...
- Les étoiles variables
- Les étoiles multiples (doubles, triples...)



Sommaire



La mission

Le satellite

Les traitements de données

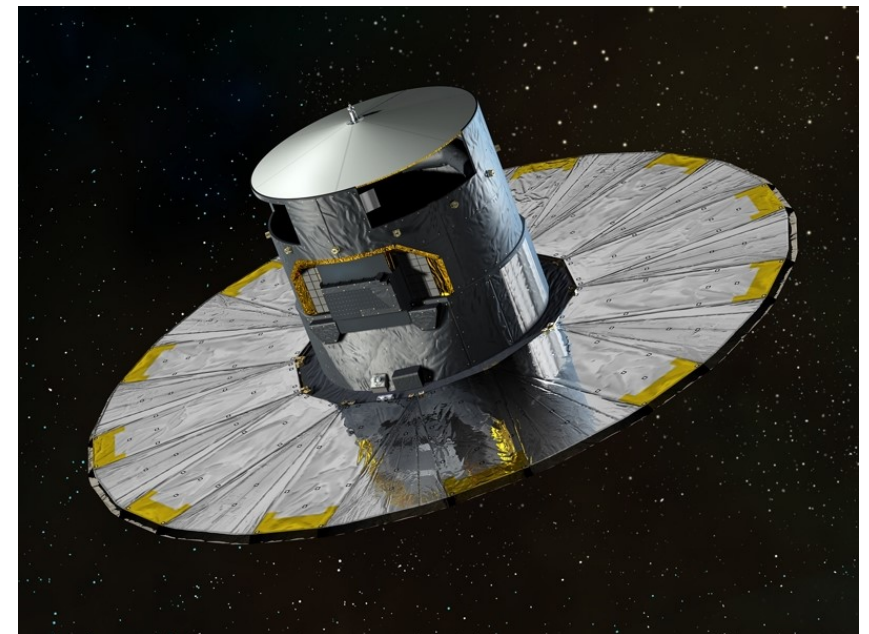
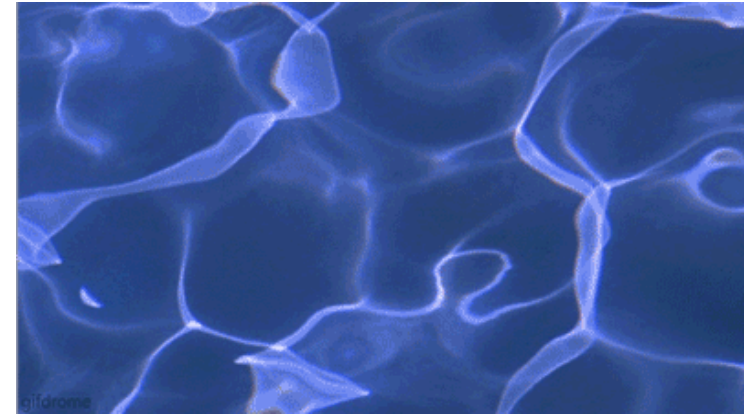
Les catalogues

Les résultats scientifiques

Pourquoi un satellite ?

Dans l'espace, les observations sont meilleures que sur terre :

- ❖ Nuit permanente
- ❖ Pas de perturbations atmosphériques
- ❖ Pas de nuages
- ❖ Il fait très froid => moins d'effets parasites dans l'électronique et l'optique
- ❖ Observations permanentes : pas besoin de se lever la nuit ou d'aller à l'autre bout du monde pour observer dans un télescope



Un double télescope

2 télescopes écartés de $106,5^\circ$

Deux miroirs primaires de $1,45 \times 0,5$ m

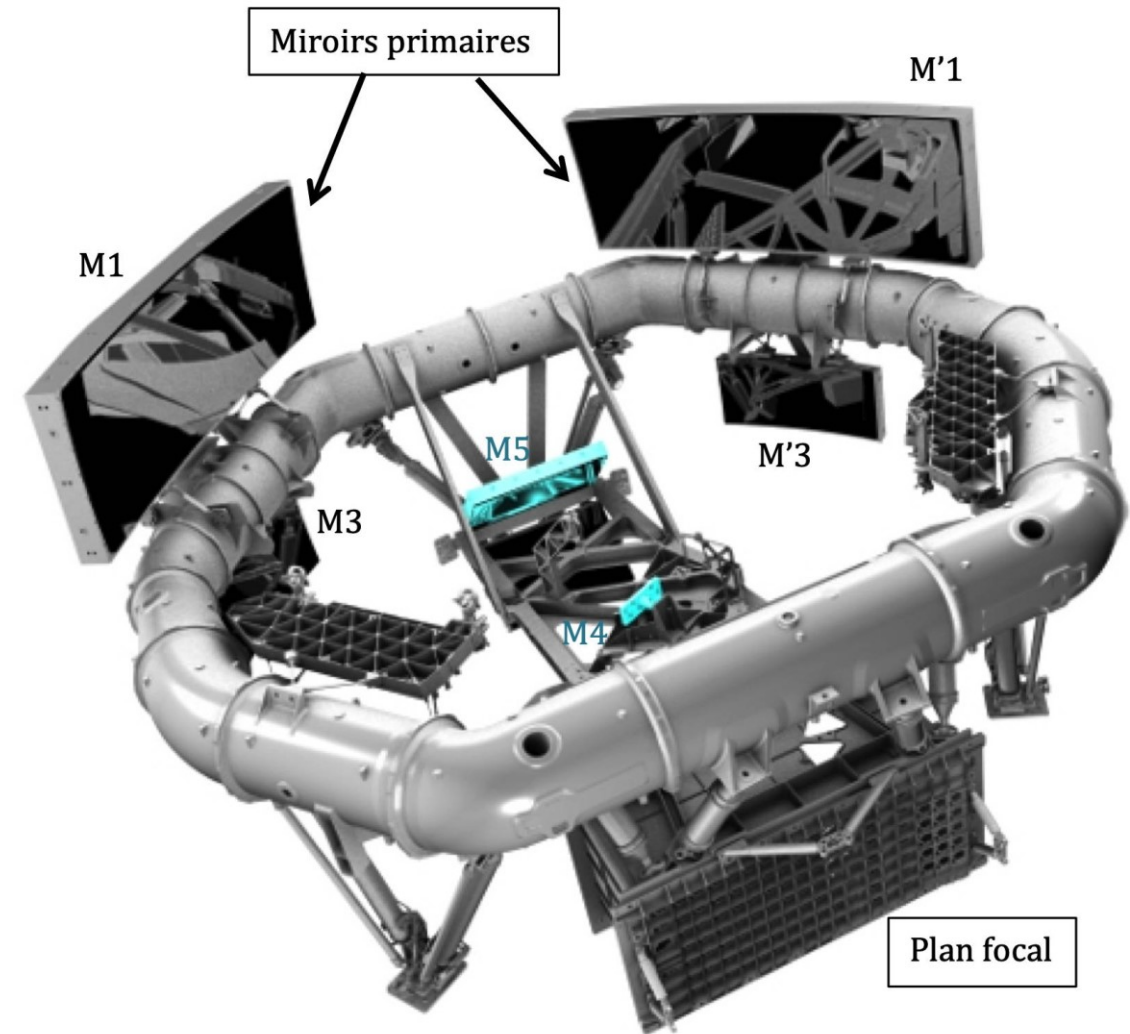
❖ Soit un champ de $1,7^\circ \times 0,6^\circ$ sur le ciel

Longueur focale équivalente : 35 m

Grâce à un total de 10 miroirs, la lumière est concentrée sur le « plan focal » => **2 images en 1 !**



Miroirs made in Haute-Garonne (Mersen Boostec, Bazet)



Le plan focal : presque 1 milliards de pixels

3 instruments en 1

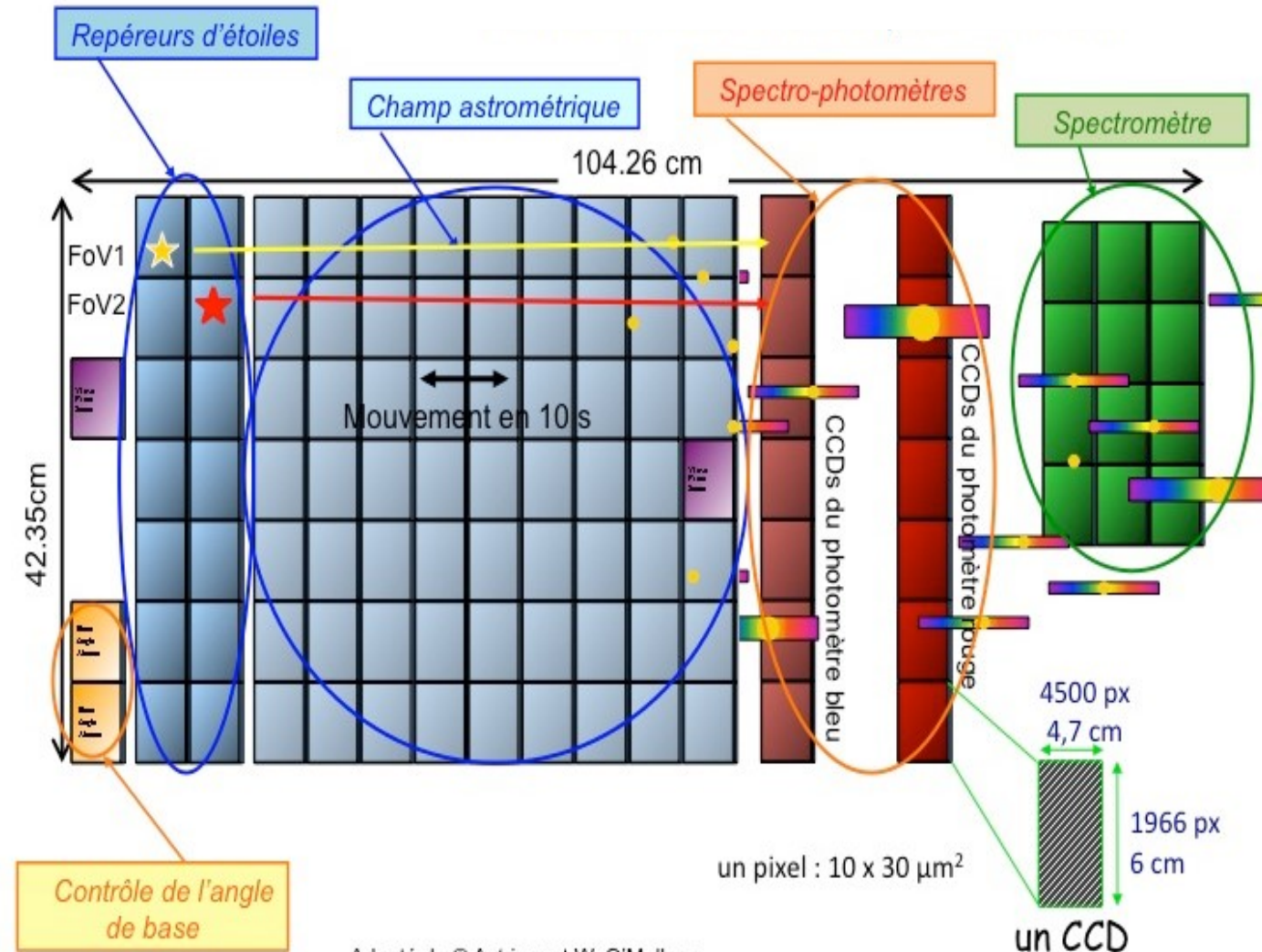
- ❖ Astromètre, photomètre, spectromètre
- ❖ et plus encore !

106 CCD, 938 millions de pixels au total

Le plus grand détecteur jamais envoyé dans l'espace



Plan focal made in Haute-Garonne (Astrium, Toulouse)



Adapté de © Astrium et W. O'Mullane

Architecture du satellite

3 mètres de haut

10 mètres de diamètre (déployé)

2 tonnes

- ❖ 920 kg pour la structure
- ❖ 710 kg pour les instruments
- ❖ 460 kg d'ergols (contrôle d'orbite) et de gaz froid (contrôle d'attitude)



Image: Astrium

[Publiée: 14/12/2011]

Crédit : Obs Paris Meudon



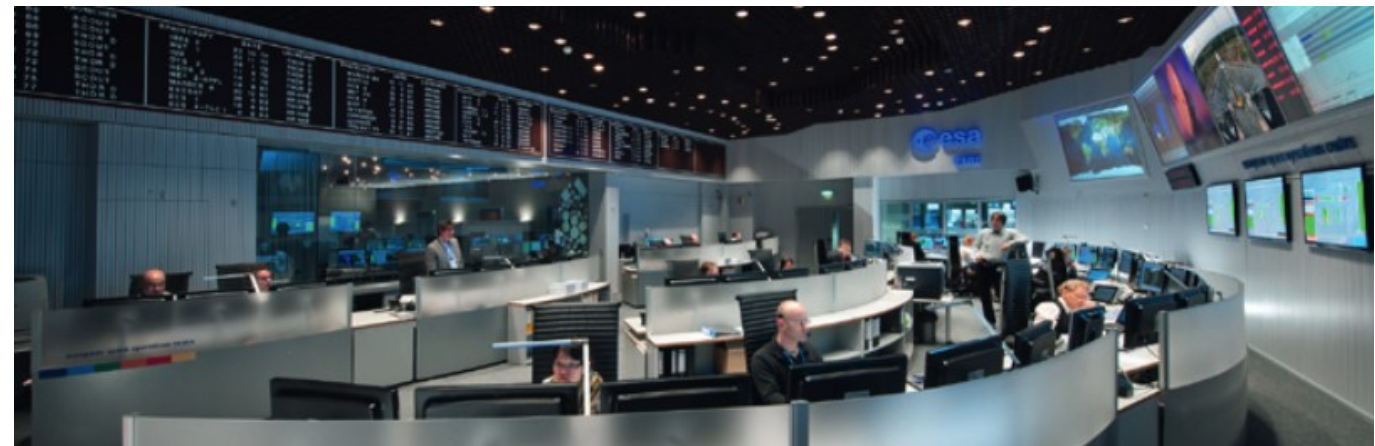
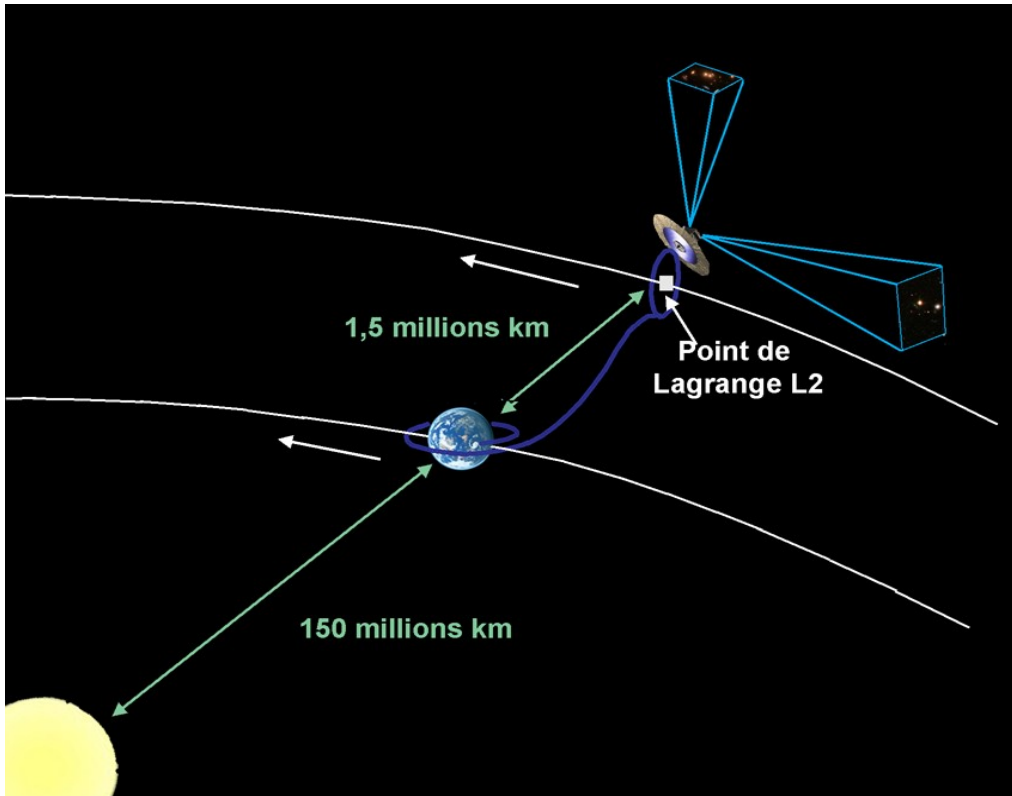
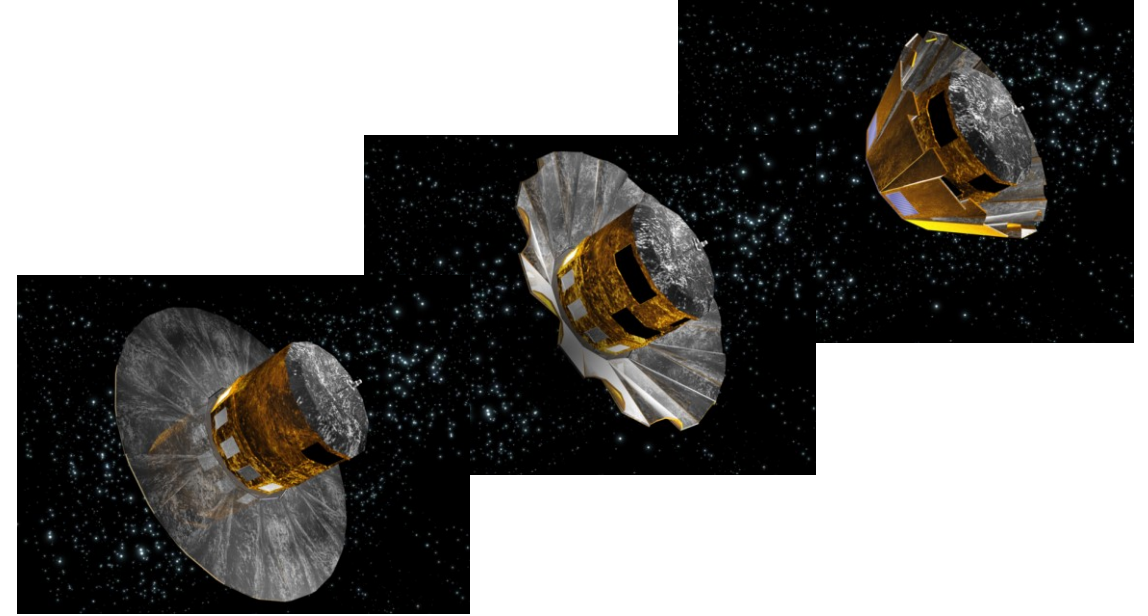
Le lancement



- ❖ Assemblé par Astrium (aujourd'hui Airbus Defense & Space) à Toulouse, pour l'ESA
 - 8 ans de travail pour 50 entreprises, dans 15 pays
- ❖ Lancé le 19 décembre 2013
 - De Kourou en Guyane
 - Lanceur Soyouz–Fregat
 - 30 jours pour atteindre sa trajectoire finale
- ❖ Durée de vie :
 - Prévues : 5 ans (juillet 2014 à juillet 2019)
 - Effective : ~10 ans

Où est-il ?

- ❖ **Point de Lagrange L2** : position stable par rapport à la terre, idéal pour observer l'univers
- ❖ Centre de contrôle à Darmstadt (ESA). Position surveillée par 2 antennes sur Terre (précision 22 m)



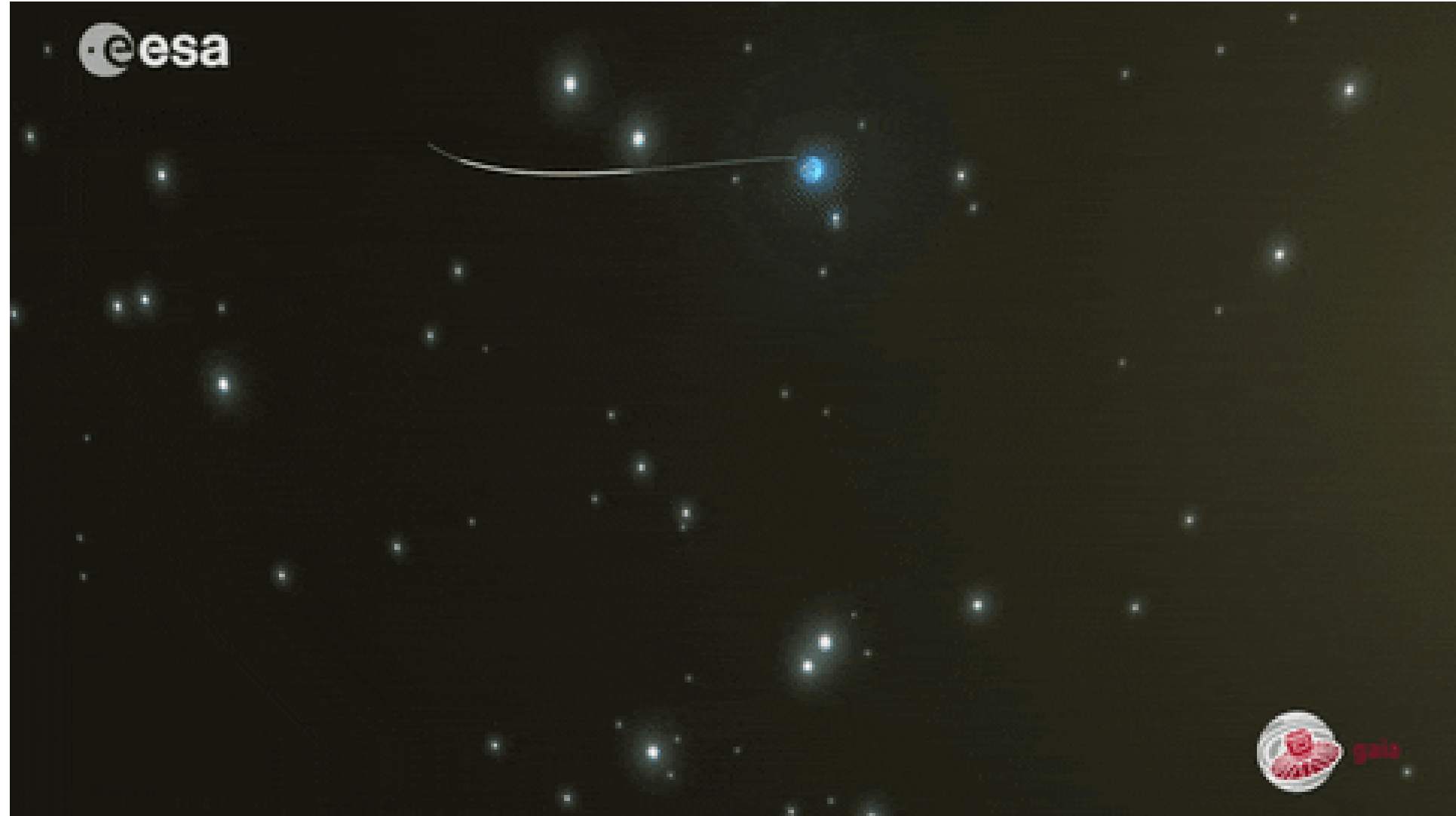
L'orbite du satellite

Orbite autour
du point L2

Pas d'éclipses

Nécessite peu
de carburant

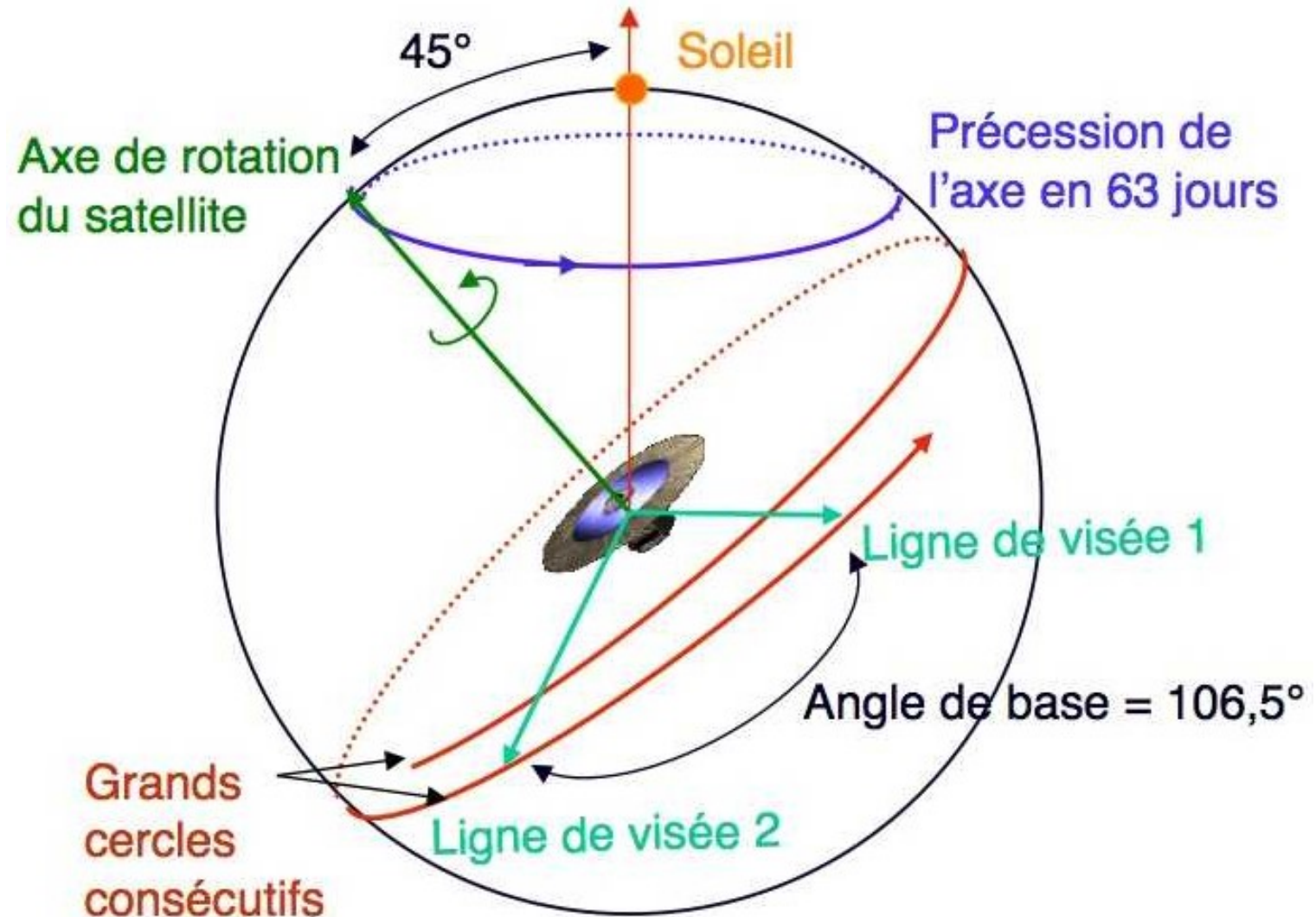
Tourne toujours
le dos au soleil,
à la terre, à la
lune...



Les mouvements du satellite

3 mouvements combinés :

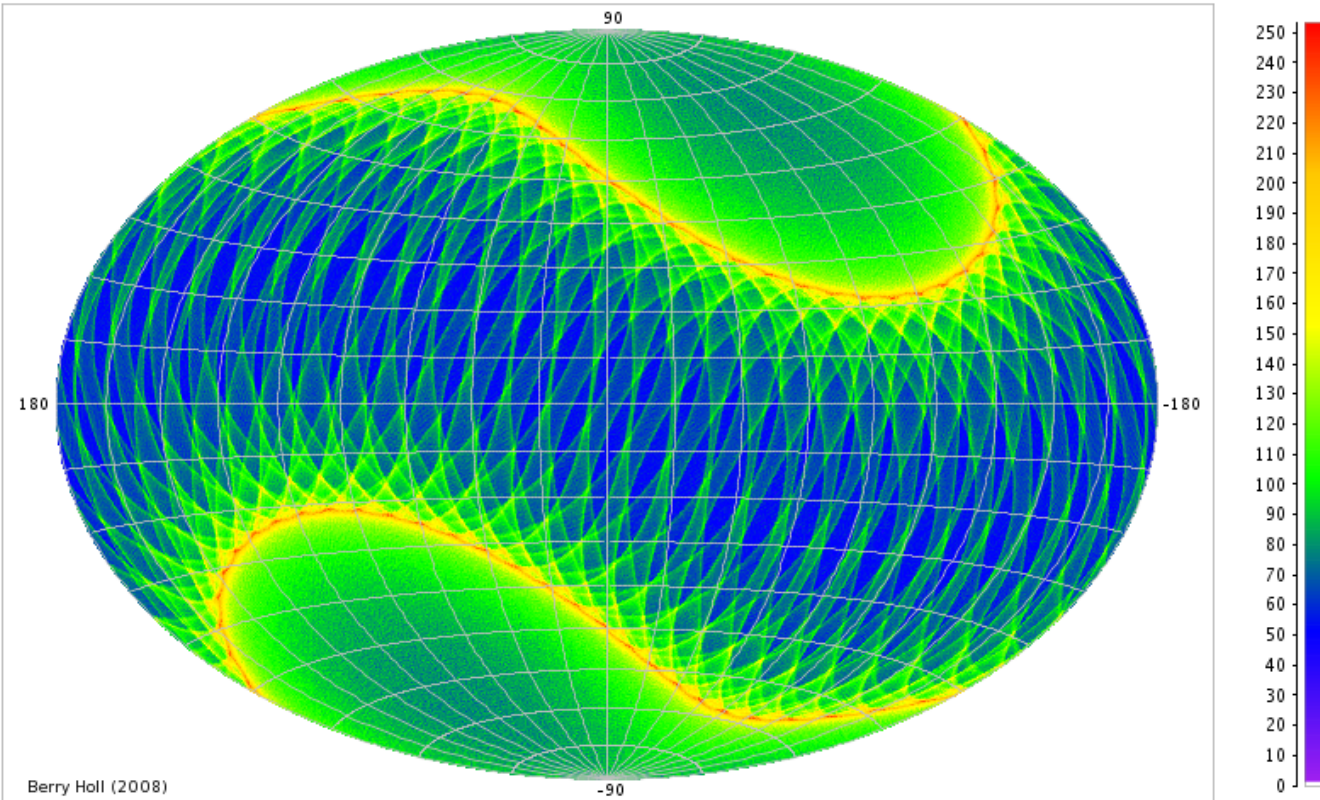
- ❖ **Rotation** sur lui-même en 6h
 - Un degré d'angle par minute de temps
 - Un champ observé par le premier télescope, sera observé par le second 106 min plus tard
- ❖ **Précession** de son axe en 2 mois
 - Toujours à 45° du Soleil
- ❖ **Rotation** autour du Soleil en 1 an (comme la Terre) : propriété du point L2



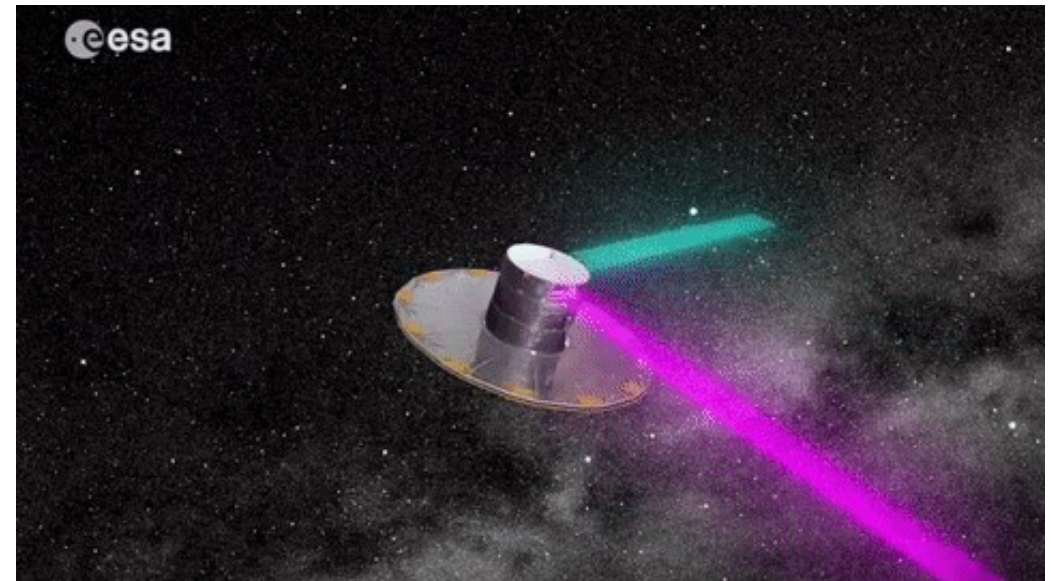
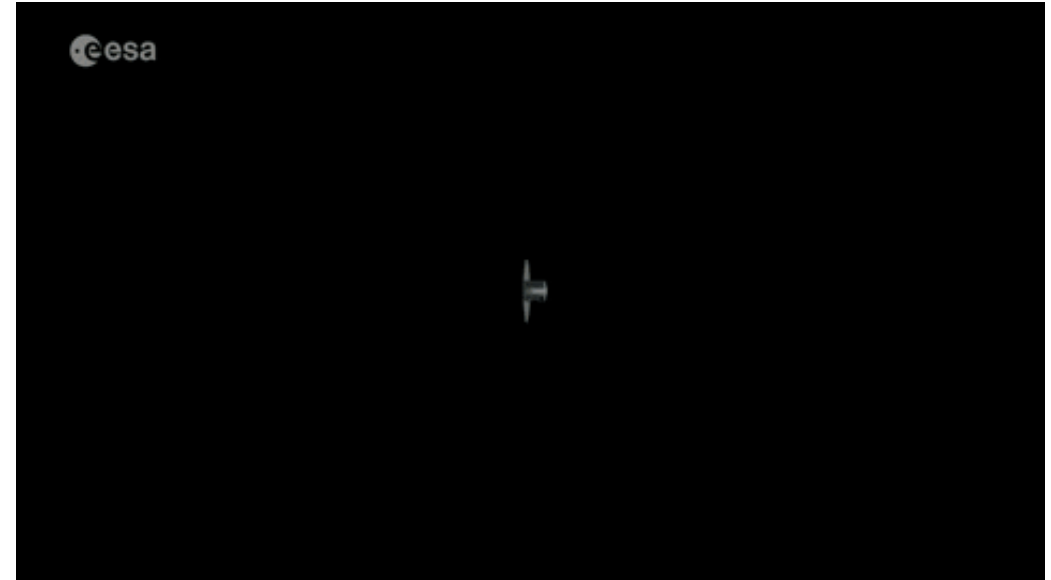
La loi de balayage (scanning law)

Une étoile est vue **70 fois** en moyenne sur 5 ans

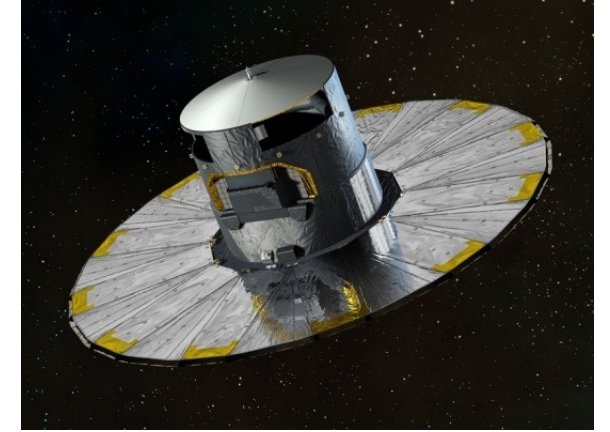
Gaia field transits (ICRS) for 5 years



Coordonnées galactiques



Sommaire



La mission

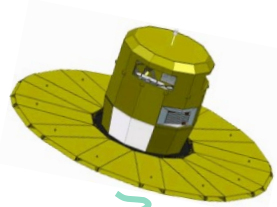
Le satellite

Les traitements de données

Les catalogues

Les résultats scientifiques

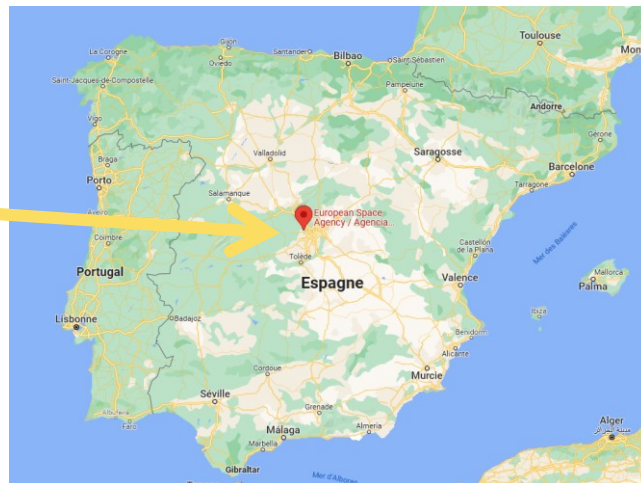
Les données brutes



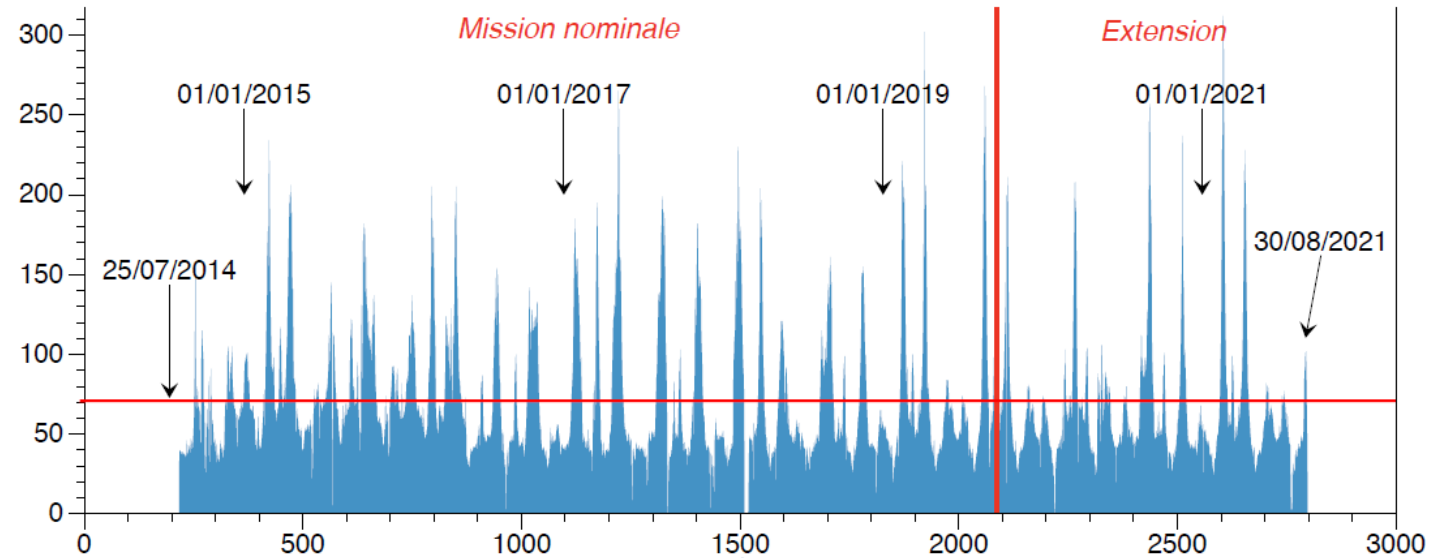
50 Go / jour en moyenne
(100 To en 5 ans)



Réseau Estrack (ESA)
Cebreros (Avila, Spain)
New Norcia (Australia)
Malargüe (Argentina)



ESAC (Centre d'astronomie spatiale européen)
Villanueva de la Cañada, près de Madrid, en Espagne



1 journée type :

- ❖ 600 millions de mesures astro
- ❖ 155 millions de mesures spectro large bande
- ❖ 13 millions de mesures spectro bande étroite
- ❖ 70 millions sources détectées

Le consortium DPAC : un travail d'équipe à grande échelle

Data Processing and Analysis Consortium

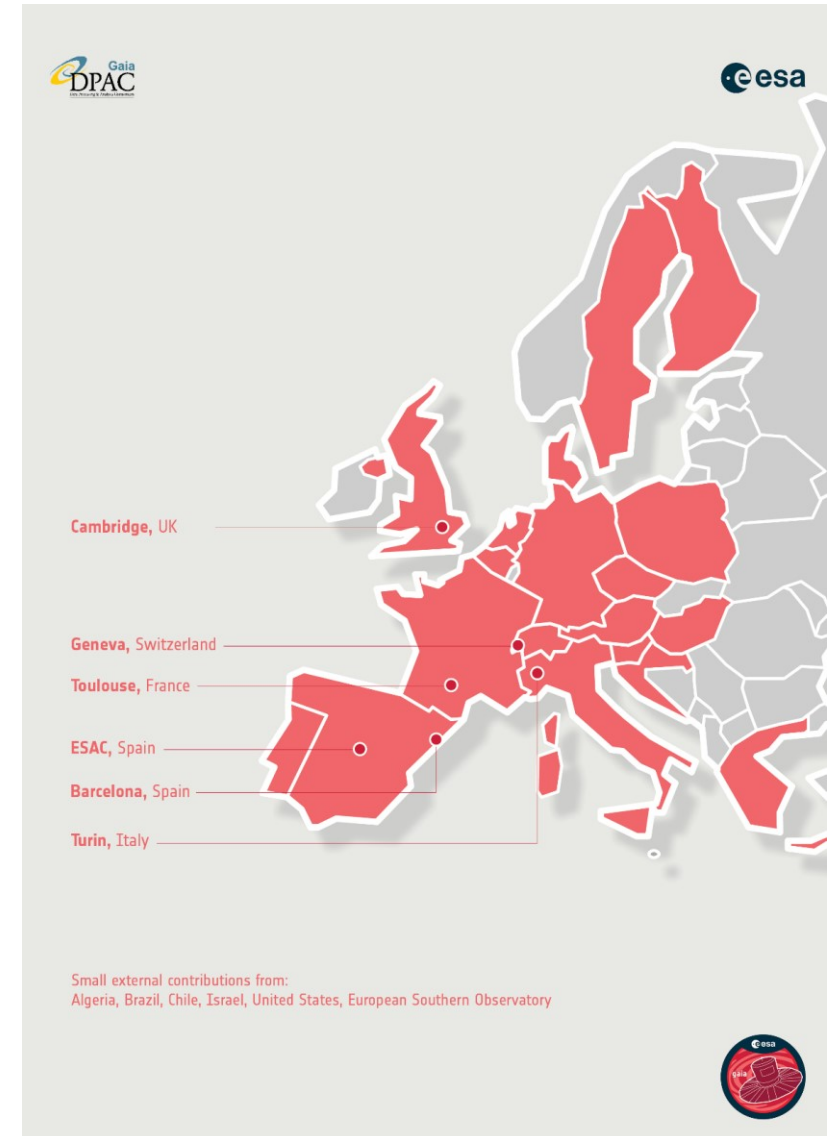
430 scientifiques et ingénieurs

100 instituts

24 pays

9 thématiques

6 centres de calcul spécialisés



La contribution française

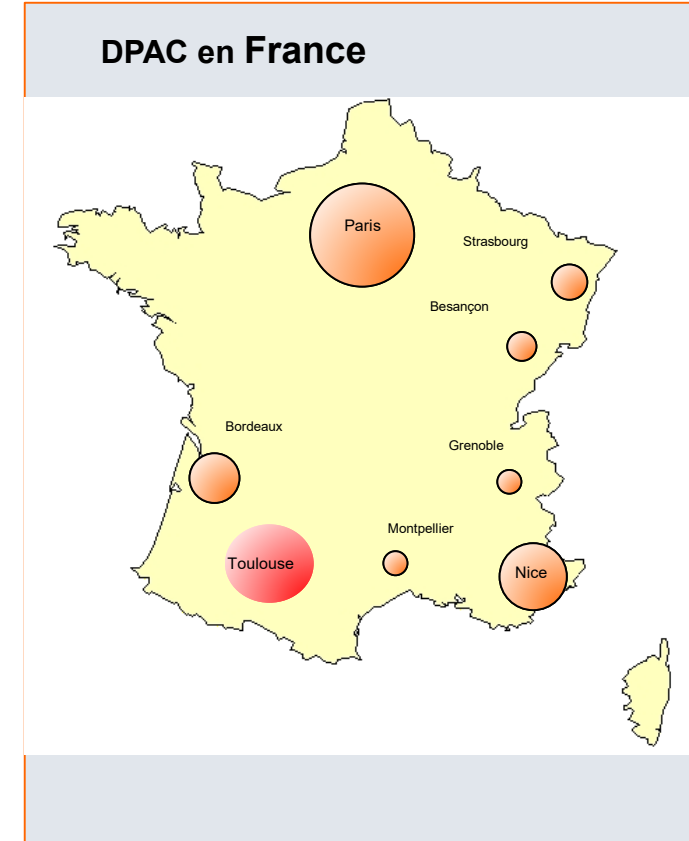
La France est en charge de plusieurs thématiques :

- ❖ Vitesses radiales
- ❖ Paramètres astrophysiques
- ❖ Autres objets
 - Objets du Système Solaire
 - Etoiles Non-Simples
 - Objets Etendus

Collaboration quotidienne entre informaticiens et scientifiques européens pour définir et réaliser le traitement des données

Utilisation intensive des téléconférences

- ~ **100** scientifiques et ingénieurs
- ~ **10** instituts & équipes
- ~ **40%** du code logiciel
- 1** centre à Toulouse (CNES)
- 1** archive à Strasbourg (CDS)



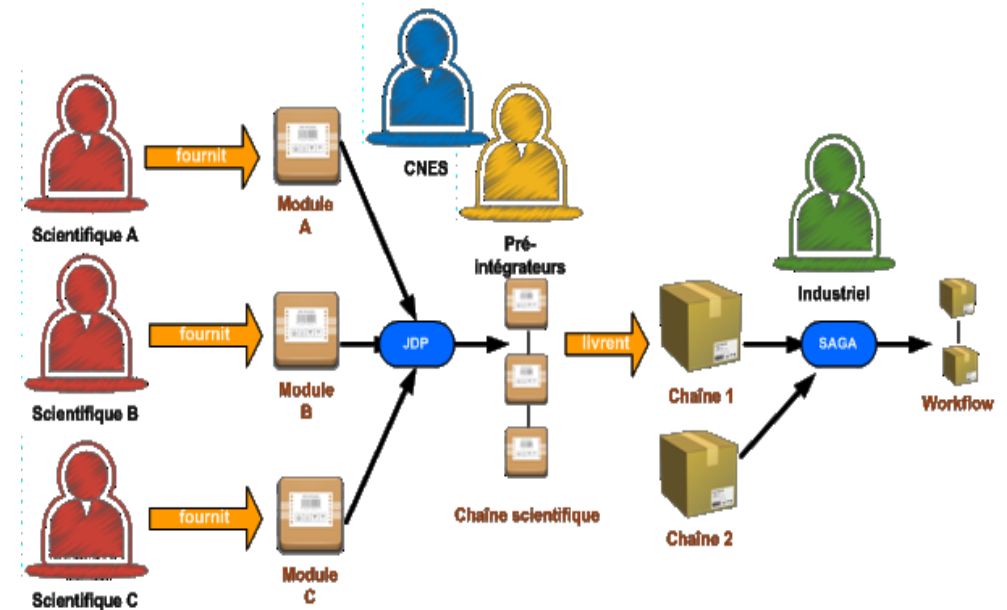
Le rôle du CNES : du « small data » au Big Data

DPCC = Data Processing Centre CNES

- ❖ Conçoit des « **chaines de traitements** » à partir d'une centaine d'algorithmes codés par les scientifiques
- ❖ Intègre les codes dans une usine de calcul basée sur des technologies « Big Data »
- ❖ **Effectue les traitements de données**
- ❖ Accompagne les laboratoires du CNRS/INSU
- ❖ Représente la France au sein du DPAC

Exemples de chaînes de traitements :

- ❖ Spectre bande étroite brut > calibration (modèle instrumental) > calibration en longueur d'onde > vitesse radiale unitaire > vitesse radiale moyenne
- ❖ Spectre large bande > classification de l'astre > étoiles > étoiles chaudes > paramètres astrophysiques



Les moyens de calcul du DPCC

Cluster de **222 serveurs, 7000 cœurs, 48 To RAM, 8.8 Po disque (en Mars 2024)**

Dédié 100% à Gaia

Permet de :

- ❖ **Exécuter les chaînes de traitements**
- ❖ Echanger les données avec les autres centres (24/7) (200 à 3000 Go/j)
- ❖ Faire des tests scientifiques sur des grandes quantités de données
- ❖ Envoyer des résultats aux scientifiques pour validation

Avant publication de chaque catalogue, les données finales sont envoyées à Madrid (Base de Données Centrale)

Reportage France3 Gaia :
<https://youtu.be/LxGEG9ThX9E>



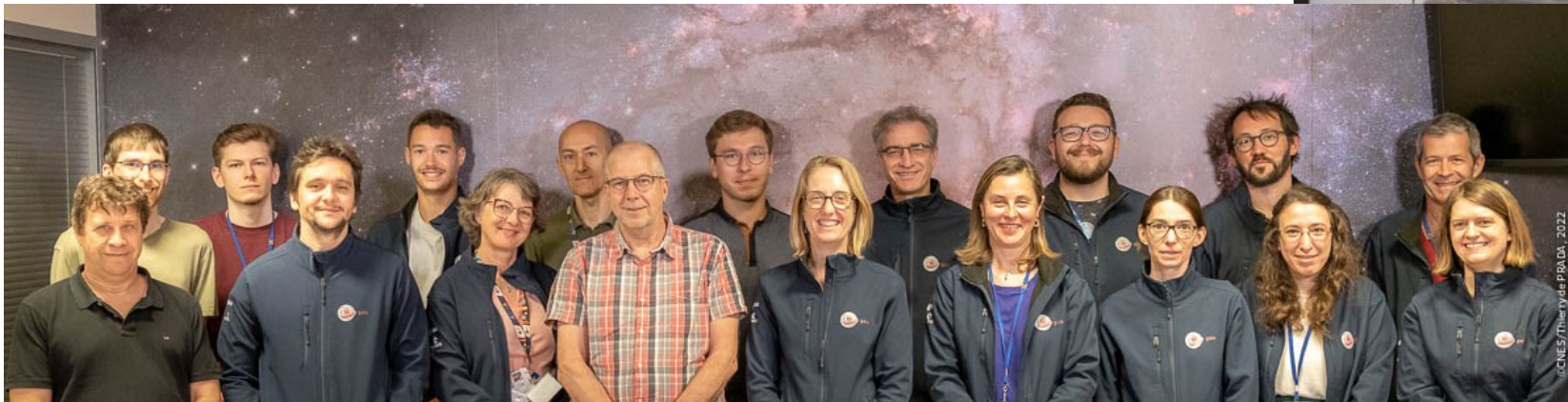
L'équipe DPCC

25 ingénieurs

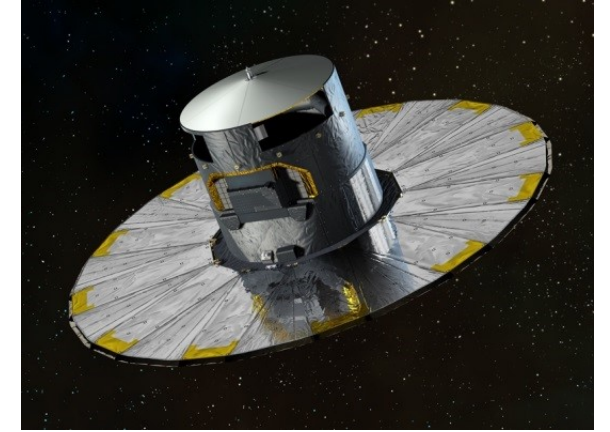
CNES + Thales + Telespazio + Atos

Mission accomplie en juillet 2021 : toutes les données ont été produites et envoyées dans les temps pour le 3^e catalogue (DR3) ! Publication du catalogue le 13 juin 2022

Durée des calculs DR3 avec un seul PC : 460 ans



Sommaire



La mission

Le satellite

Les traitements de données

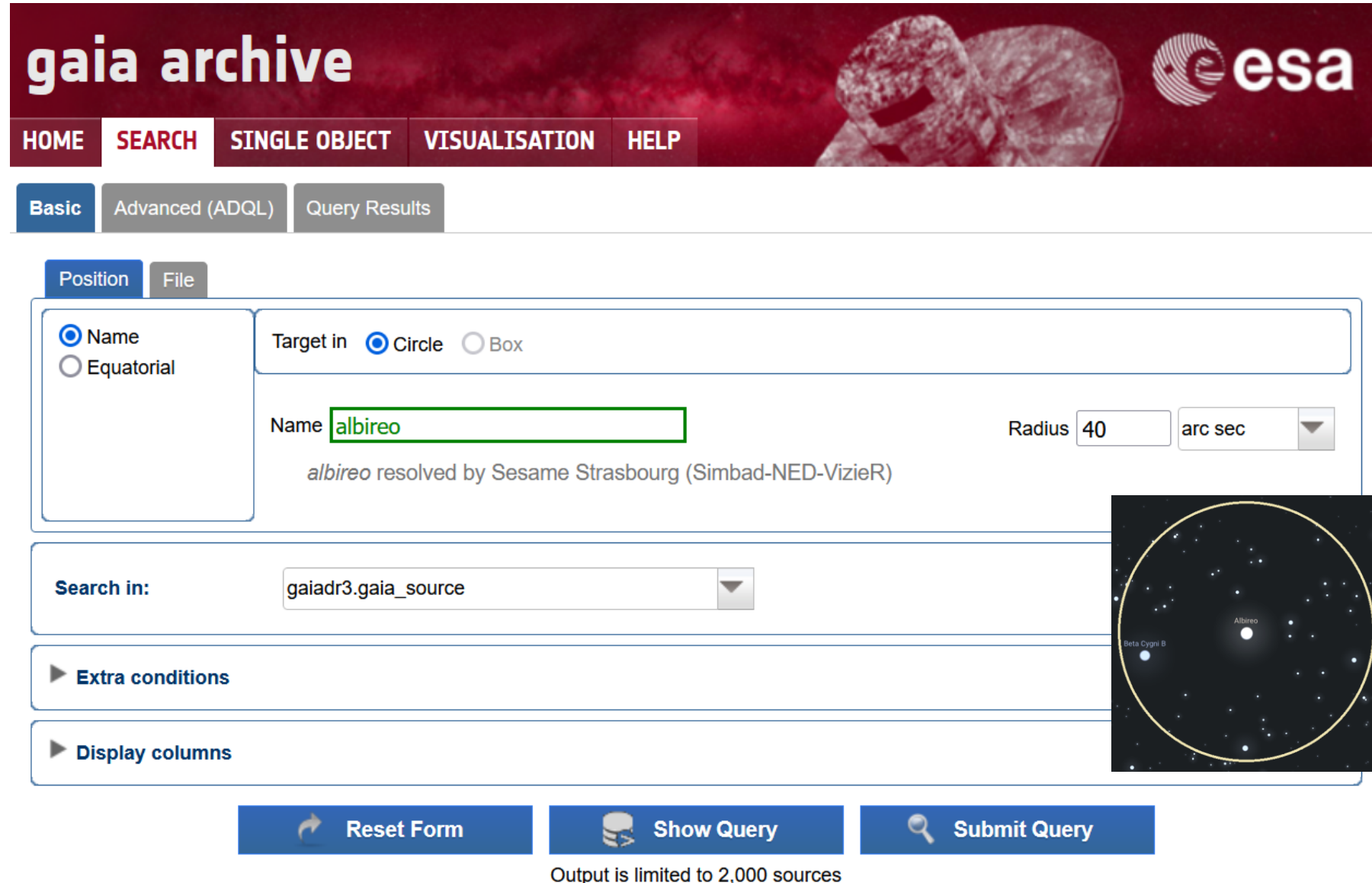
Les catalogues

Les résultats scientifiques

Le catalogue Gaia

Les résultats sont regroupés dans un catalogue

- ❖ Trop gros pour du papier => base de données sur internet
- ❖ <https://gea.esac.esa.int/archive/>
- ❖ Accès par des requêtes ADQL
- ❖ Mémorisation des résultats en ligne



The screenshot shows the Gaia Archive search interface. At the top, there's a header with 'gaia archive' and the ESA logo. Below the header are navigation tabs: HOME, SEARCH, SINGLE OBJECT, VISUALISATION, and HELP. Underneath are filter tabs: Basic, Advanced (ADQL), and Query Results. The main search area has two tabs: Position and File. In the Position tab, there are radio buttons for 'Name' (selected) and 'Equatorial'. To the right, there's a 'Target in' section with radio buttons for 'Circle' (selected) and 'Box'. A text input field contains 'albireo', and below it, a note says 'albireo resolved by Sesame Strasbourg (Simbad-NED-VizieR)'. To the right of the input field is a 'Radius' field set to '40' and a unit dropdown menu set to 'arc sec'. Below this is a 'Search in:' dropdown menu set to 'gaiadr3.gaia_source'. At the bottom of the search area are two expandable sections: 'Extra conditions' and 'Display columns'. At the very bottom are three buttons: 'Reset Form', 'Show Query', and 'Submit Query'. A small inset image on the right shows a star field with a yellow circle around the star 'Albireo' and a label 'Beta Cygni B'.

Output is limited to 2,000 sources

Exemples de données

Le catalogue contient des **tables**

La principale : **gaia_source**

- ❖ Une ligne par objet du catalogue
- ❖ Une centaine de valeurs : position, mouvement propre, parallaxe, vitesse radiale, magnitude, nombre de transits, incertitudes...

α	δ	ρ
$\mu\alpha$	$\mu\delta$	rv

solution_id,designation,source_id,random_index,ref_epoch,ra,ra_error,dec,dec_error,parallax,parallax_error,parallax_over_error,pm,pmra,pmra_error,pmdec,pmdec_error,ra_dec_corr,ra_parallax_corr,ra_pmra_corr,ra_pmdec_corr,dec_parallax_corr,dec_pmra_corr,dec_pmdec_corr,parallax_pmra_corr,parallax_pmdec_corr,pmra_pmdec_corr,astrometric_n_obs_al,astrometric_n_obs_ac,astrometric_n_good_obs_al,astrometric_n_bad_obs_al,astrometric_gof_al,astrometric_chi2_al,astrometric_excess_noise,astrometric_excess_noise_sig,astrometric_params_solved,astrometric_primary_flag,nu_eff_u sed_in_astrometry,pseudocolour,pseudocolour_error,ra_pseudocolour_corr,dec_pseudocolour_corr,parallax_pseudocolour_corr,pmra_pseudocolour_corr,pmdec_pseudocolour_corr,astrometric_matched_transits,visibility_periods_used,astrometric_sigma5d_max,matched_transits,new_matched_transits,matched_transits_removed,ipd_gof_harmonic_amplitude,ipd_gof_harmonic_phase,ipd_frac_multi_peak,ipd_frac_odd_win,ruwe,scan_direction_strength_k1,scan_direction_strength_k2,scan_direction_strength_k3,scan_direction_strength_k4,scan_direction_mean_k1,scan_direction_mean_k2,scan_direction_mean_k3,scan_direction_mean_k4,duplicated_source,phot_g_n_obs,phot_g_mean_flux,phot_g_mean_flux_error,phot_g_mean_flux_over_error,phot_g_mean_mag,phot_bp_n_obs,phot_bp_mean_flux,phot_bp_mean_flux_error,phot_bp_mean_flux_over_error,phot_bp_mean_mag,phot_rp_n_obs,phot_rp_mean_flux,phot_rp_mean_flux_error,phot_rp_mean_flux_over_error,phot_rp_mean_mag,phot_bp_n_contaminated_transits,phot_bp_n_blended_transits,phot_rp_n_contaminated_transits,phot_rp_n_blended_transits,phot_proc_mode,phot_bp_rp_excess_factor,bp_rp,bp_g,g_rp,dr2_radial_velocity,dr2_radial_velocity_error,dr2_rv_nb_transits,dr2_rv_template_teff,dr2_rv_template_logg,dr2_rv_template_fe_h,l,b,ecl_lon,ecl_lat

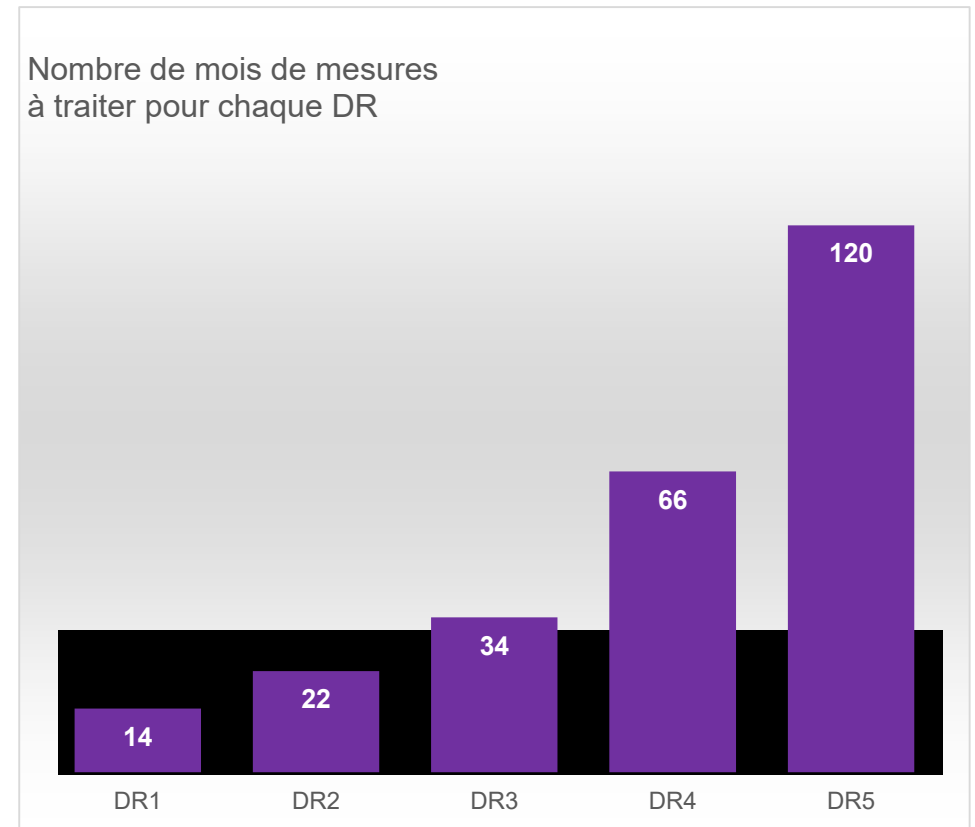
Environ **40 tables** au total : SSO, galaxies, quasars, étoiles variables, paramètres astrophysiques, étoiles multiples, spectres large bande et bande étroite...

Les catalogues

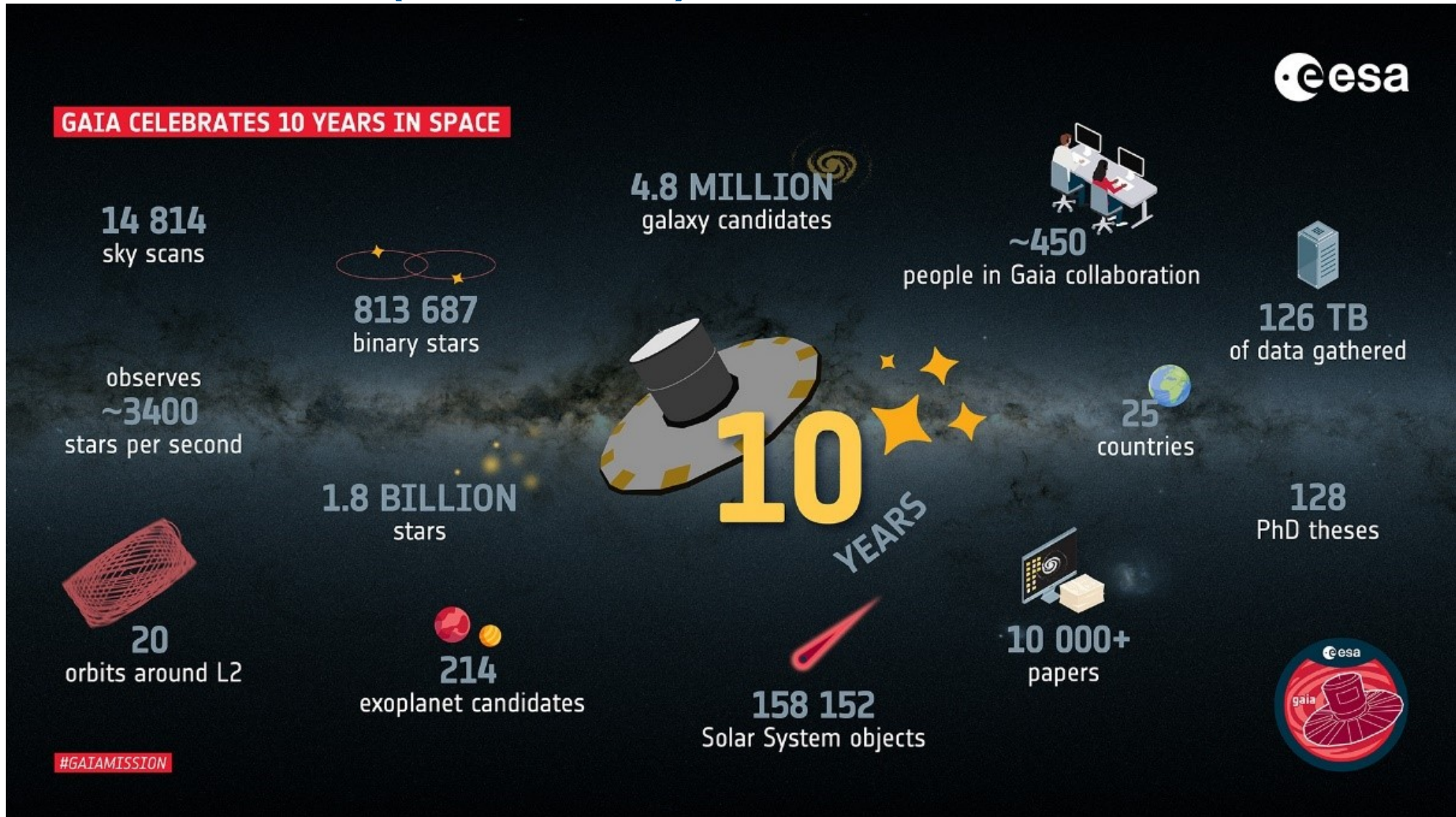
Au lieu d'attendre des années d'avoir toutes les données reçues du satellite et traitées, le DPAC produit plusieurs catalogues intermédiaires (DR = Data Release) :

- ❖ **Gaia DR1** (14 septembre 2016)
 - 1,1 milliard de sources ; mesures 25/07/14 – 15/09/15
- ❖ **Gaia DR2** (25 avril 2018)
 - 1,7 milliard de sources ; mesures 25/07/14 – 22/05/16
- ❖ **Gaia DR3** (13 juin 2022 - EDR3 3 décembre 2020)
 - 1,8 milliard de sources ; mesures 25/07/14 – 27/05/17
- ❖ **Gaia DR4** (mesures 25/07/14 – 19/01/2020)
 - Vers 2025
- ❖ **Gaia DR5** (toutes les mesures)
 - Vers 2030

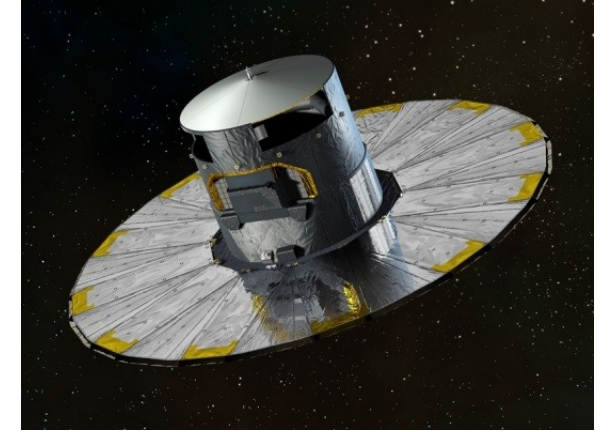
Plus de mesures =>
plus de précision



Les 10 ans de GAIA (19/12/2023)



Sommaire



La mission

Le satellite

Les traitements de données

Les catalogues

Les résultats scientifiques

Une mine d'or pour la communauté scientifique

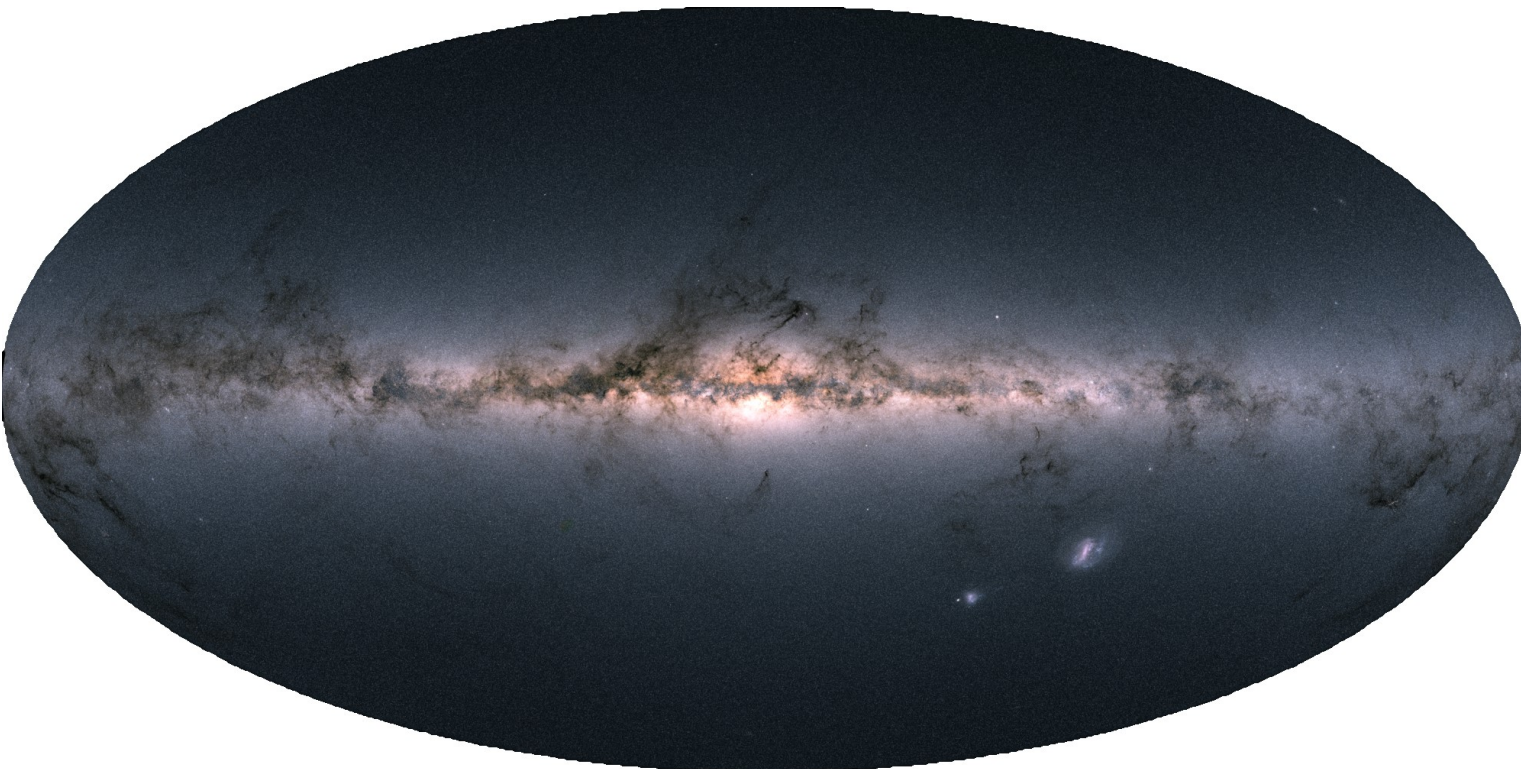
Le catalogue Gaia est devenu **LA référence de l'astronomie**

Utilisé par des centaines de chercheurs

De plus en plus précis et complet au fil des versions

Gaia est la mission
ESA la plus productive
en nombre de
publications
scientifiques
(plus que Hubble)

10 000+ publications
scientifiques (fin 2023)

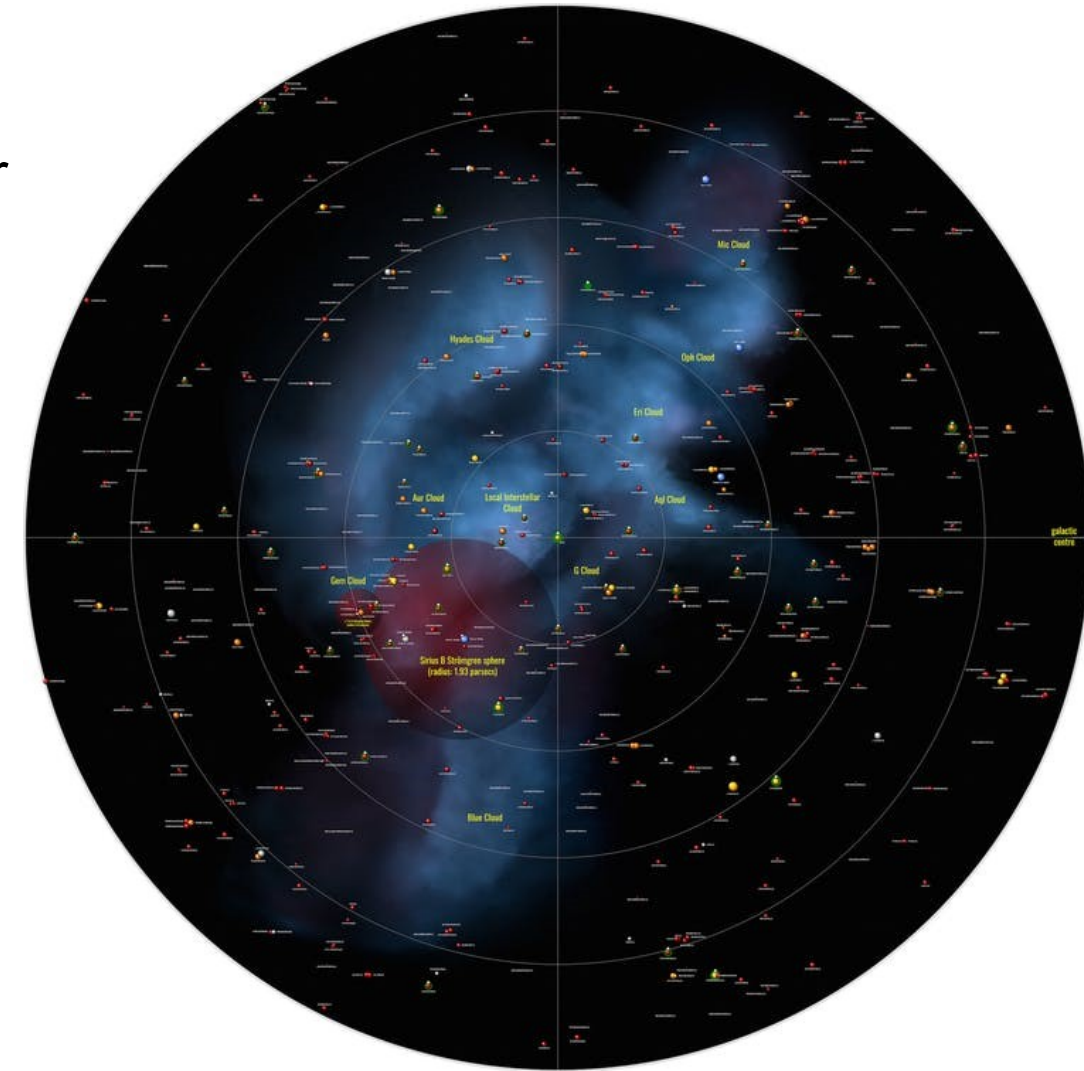
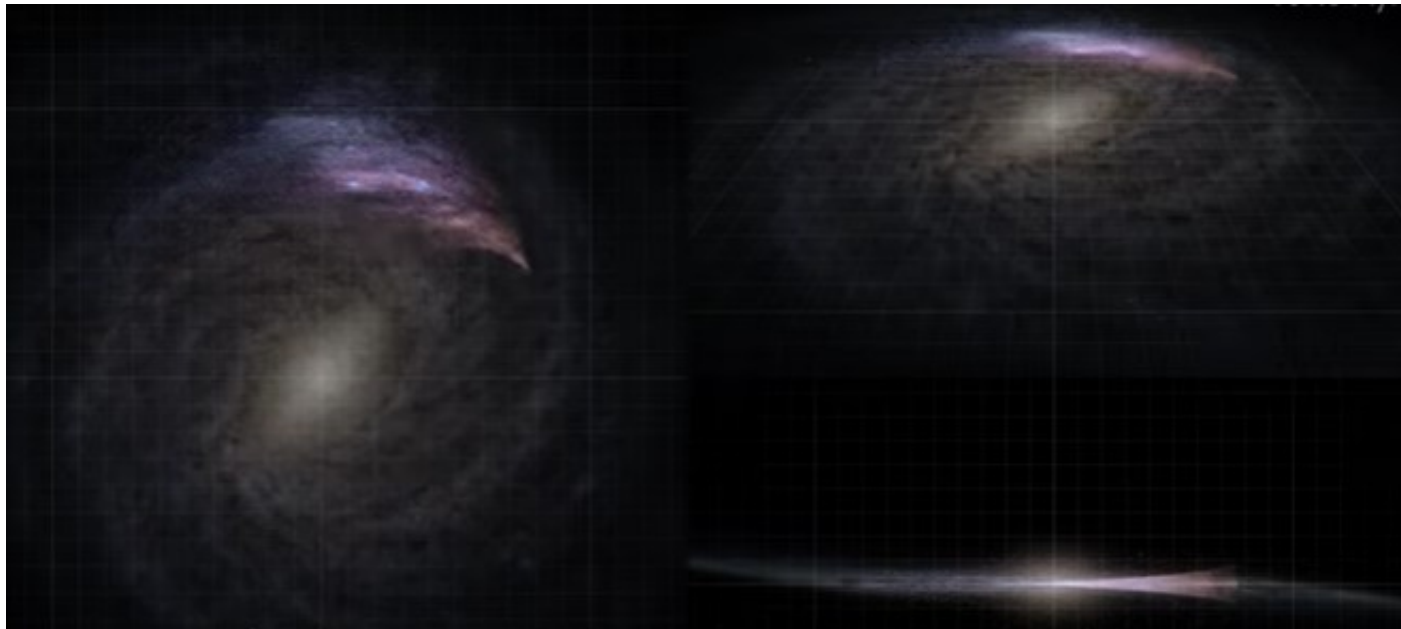


AC
agency :

Les étoiles voisines

Un nouveau catalogue de 74 281 **étoiles proches** et leur orbite estimée pour les 500 millions d'années à venir

Seulement 10% étaient connues avant Gaia EDR3



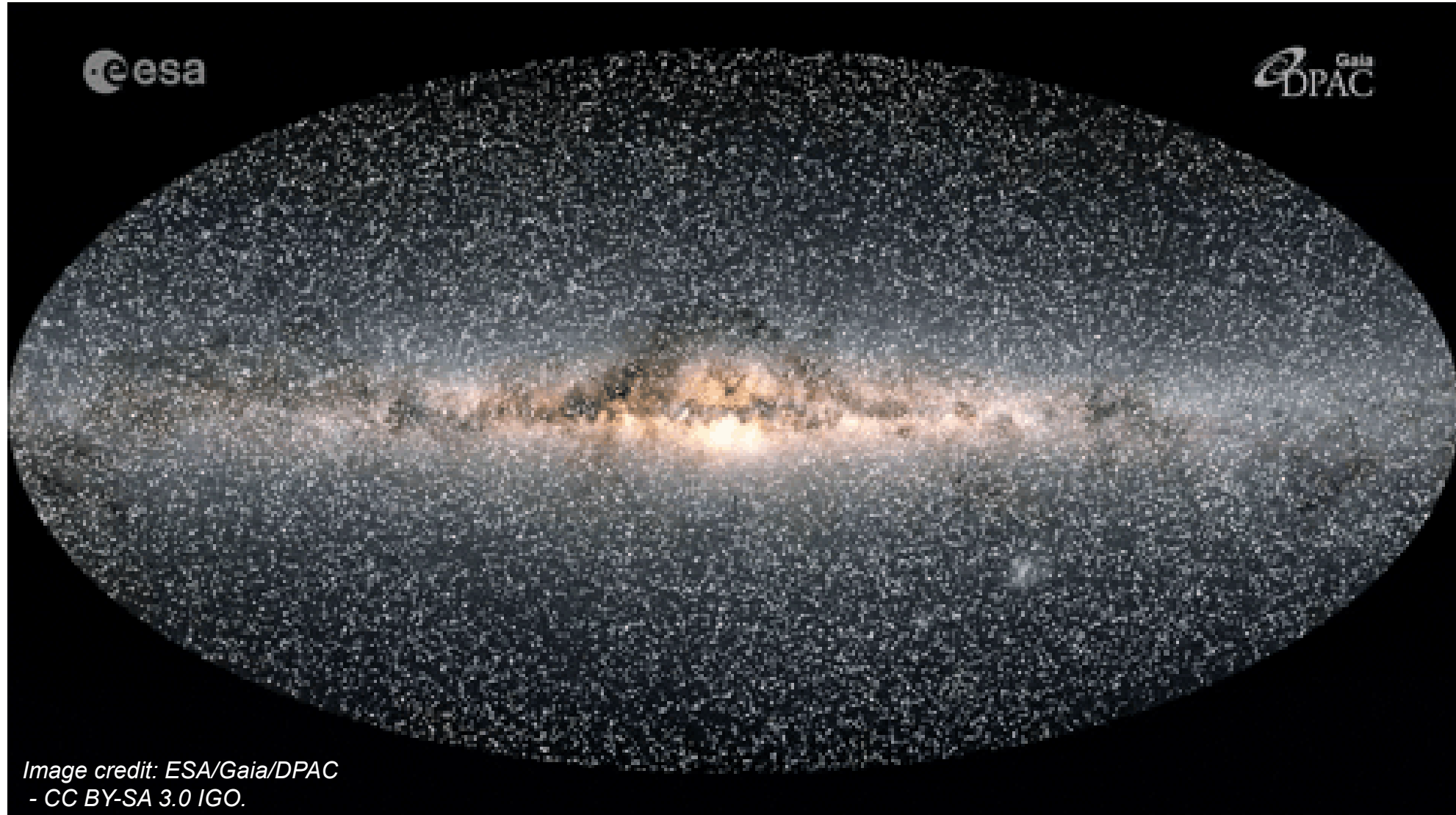
Vue projetée depuis le dessus du plan galactique du catalogue des astres à moins de 10 parsecs, ou 30 années-lumière,

©ESA/Gaia/DPAC - CC BY-SA 3.0 IGO.

Mouvements propres des étoiles proches

40 000 étoiles à
moins de 100
parsecs (300
AL)

Trait = 80 000
ans



Des étoiles fugitives

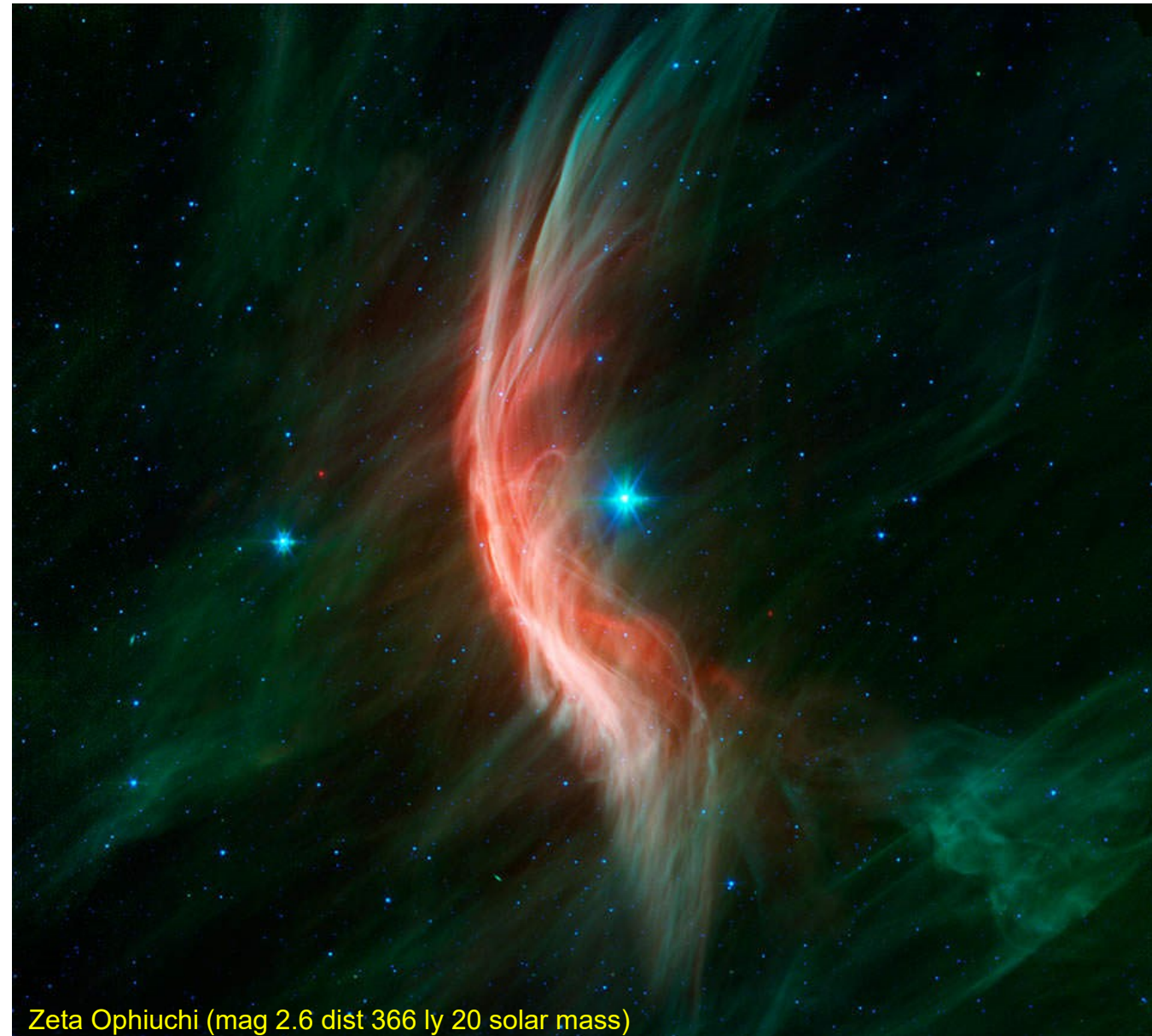
Certaines étoiles ont des vitesses anormalement élevées

- ❖ Elles sont en train de **sortir de la Voie Lactée**
- ❖ Surtout des étoiles massives (jeunes et brillantes)
- ❖ Cause : instabilités gravitationnelles dans les amas d'étoiles issus de nuages denses

Sources

Galactic runaway O and Be stars found using Gaia DR3
<https://www.aanda.org/component/article?access=doi&doi=10.1051/0004-6361/202346613>

Astronomers Find Dozens of Massive Stars Fleeing the Milky Way
<https://www.universetoday.com/164133/astronomers-find-dozens-of-massive-stars-fleeing-the-milky-way/>



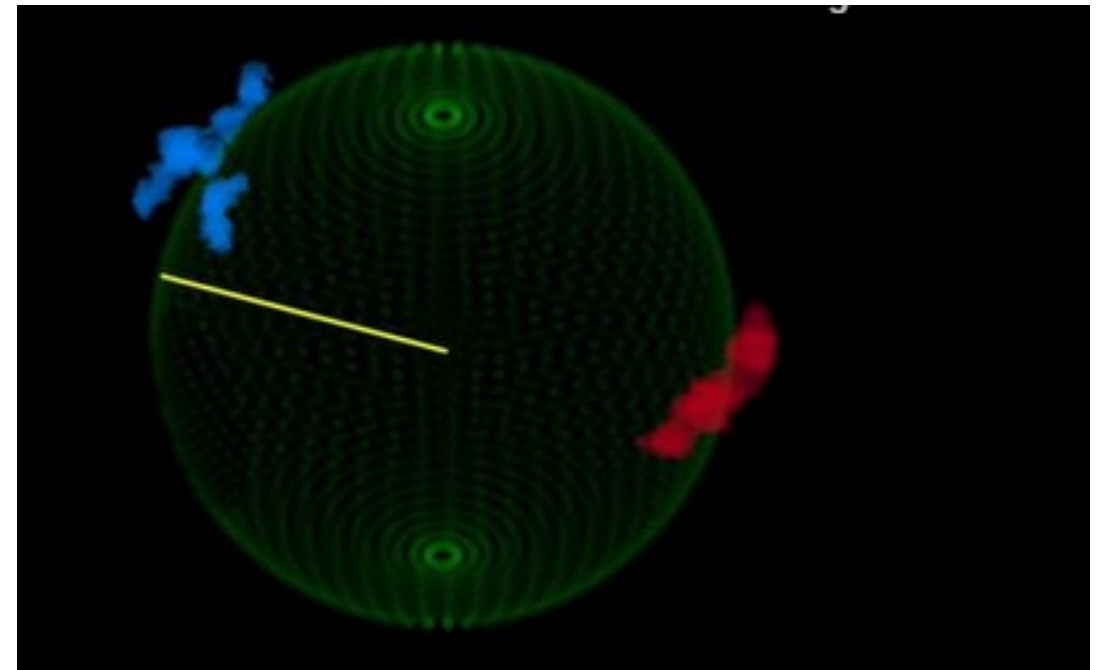
Zeta Ophiuchi (mag 2.6 dist 366 ly 20 solar mass)

Des phénomènes étonnants !

Septembre 2021 : découverte d'une mystérieuse cavité dans la Voie Lactée

Bulle géante (500 AL de diamètre) ceinturée par 2 nébuleuses : les nuages de Persée et Taurus

Hypothèse : explosion d'une supernova il y a 10 millions d'années



<https://www.youtube.com/watch?v=bYgPC-5Wak0&t=18s>

© Alyssa Goodman / Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian

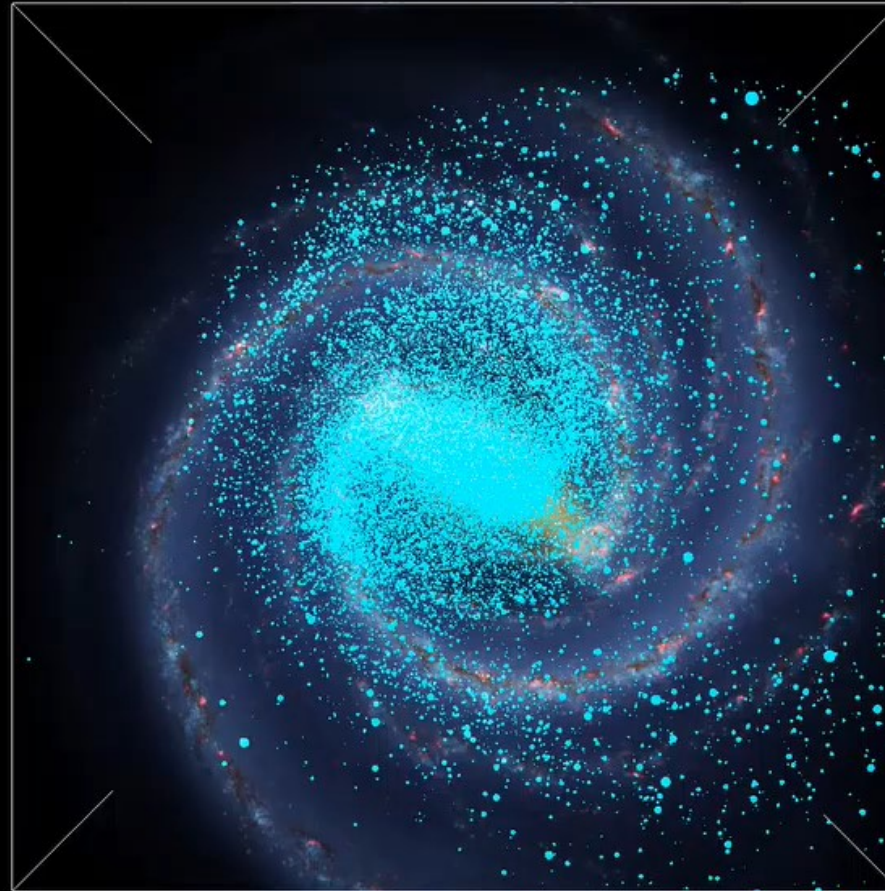
Aux origines de la Voie Lactée : Gaia-Encelade

The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk »

published in *Nature*. DOI: 10.1038/s41586-018-0625-x

[A. Helmi](#), [C. Babusiaux](#), [H. Koppelman](#)¹

[D. Massari](#), [J. Veljanoski](#), [A. Brown](#)⁴



Simulation: A. Helmi,
H. Koppelman, A. Villalobos

<https://sci.esa.int/web/gaia/-/60892-galactic-ghosts-gaia-uncovers-major-event-in-the-formation-of-the-milky-way>

Les objets du système solaire

VISITE DES OBJETS DE NOTRE SYSTÈME SOLAIRE : ASTEROIDES / PLANETES MINEURES

De 14000 objets dans DR2 à 150 000 en 2022
100 fois plus précis que DR2
Avec couleurs, masses, forme , composition
et leurs orbites précises

Occultations d'étoiles

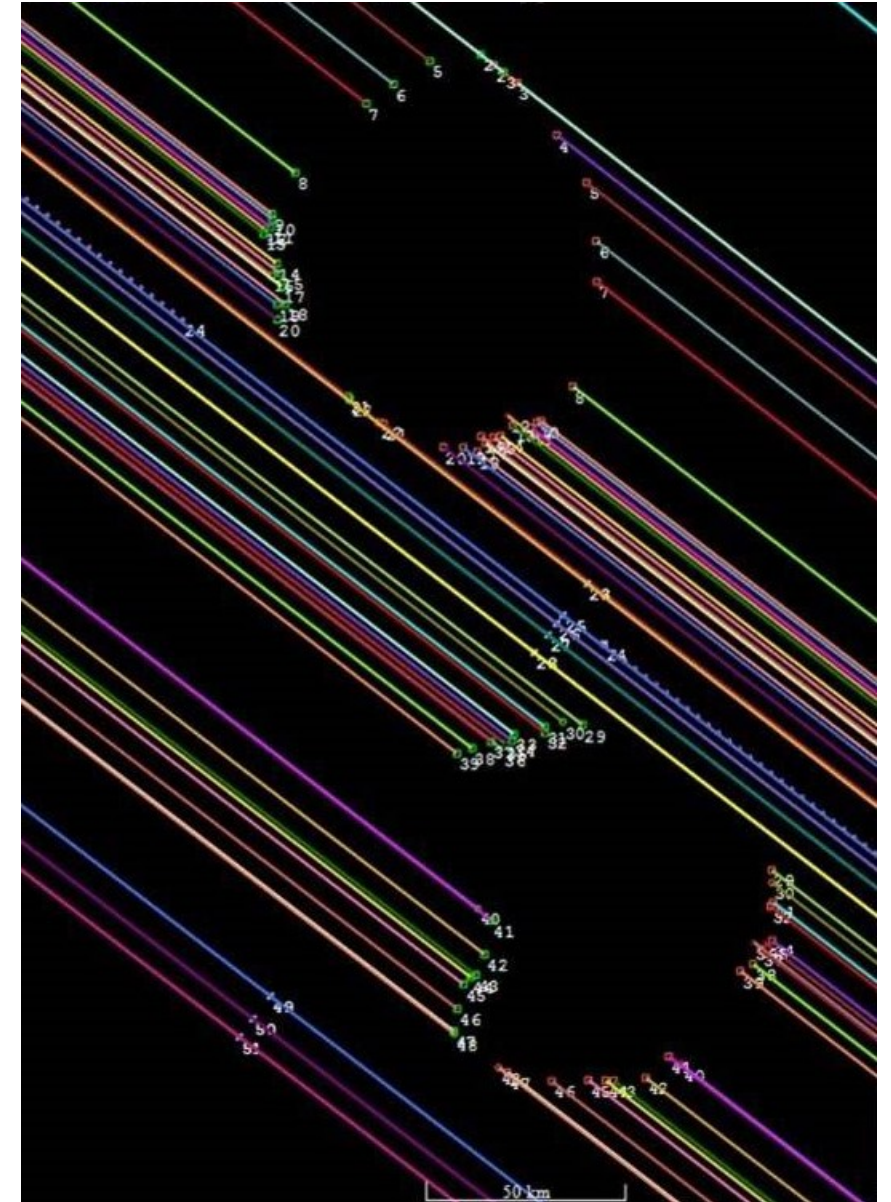
Grâce à sa précision astrométrique, Gaia améliore aussi les **prévisions d'occultations d'étoiles par des astéroïdes** pour mieux les observer depuis le sol

Les occultations permettent d'étudier les astéroïdes :

- ❖ Forme
- ❖ Multiplicité

Astronomie collaborative entre professionnels et amateurs

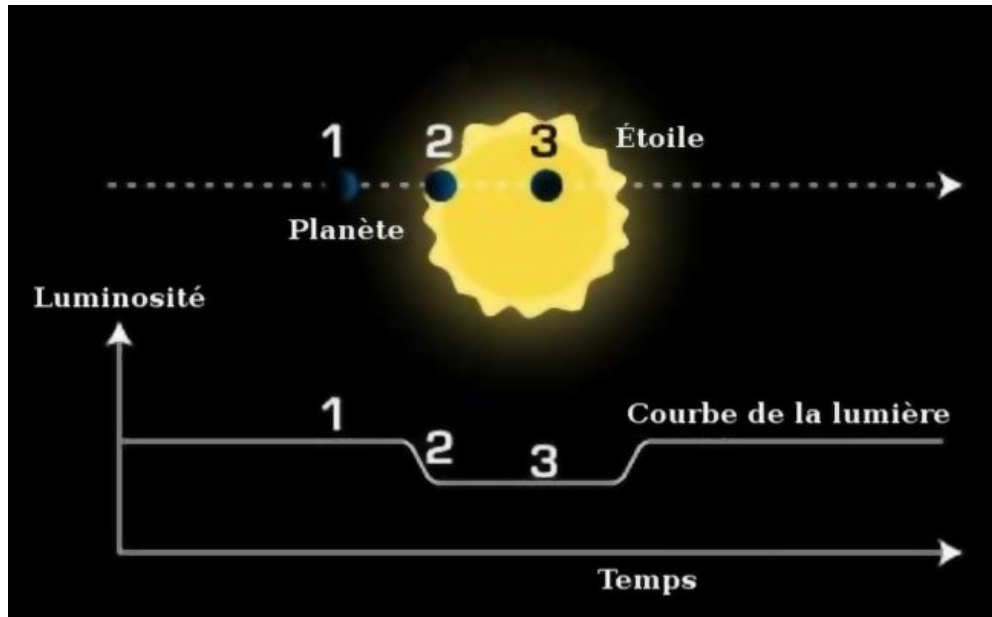
Ground-track recordings of the disappearances and reappearances of the star HD 215553 (in Aquarius) during the occultation by the main-belt asteroid (90) Antiope and its moon on July 19, 2011



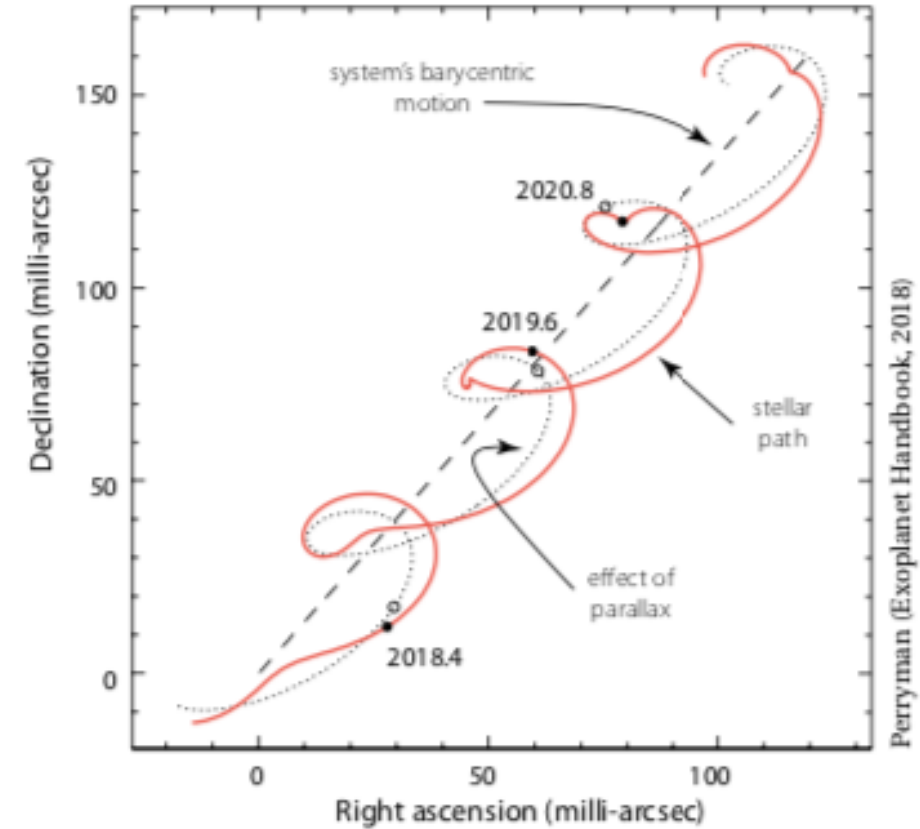
Exoplanètes

Aujourd’hui environ 5200 sont connues.

La méthode la plus connue: la méthode des transits (baise de luminosité périodique)



Mars 2021 :
première exoplanète détectée avec Gaia
(Gaia EDR3 3026325426682637824)



Plusieurs douzaines découvertes dans la DR3 (2022) par la méthode astrométrique.

Et encore plus à venir !

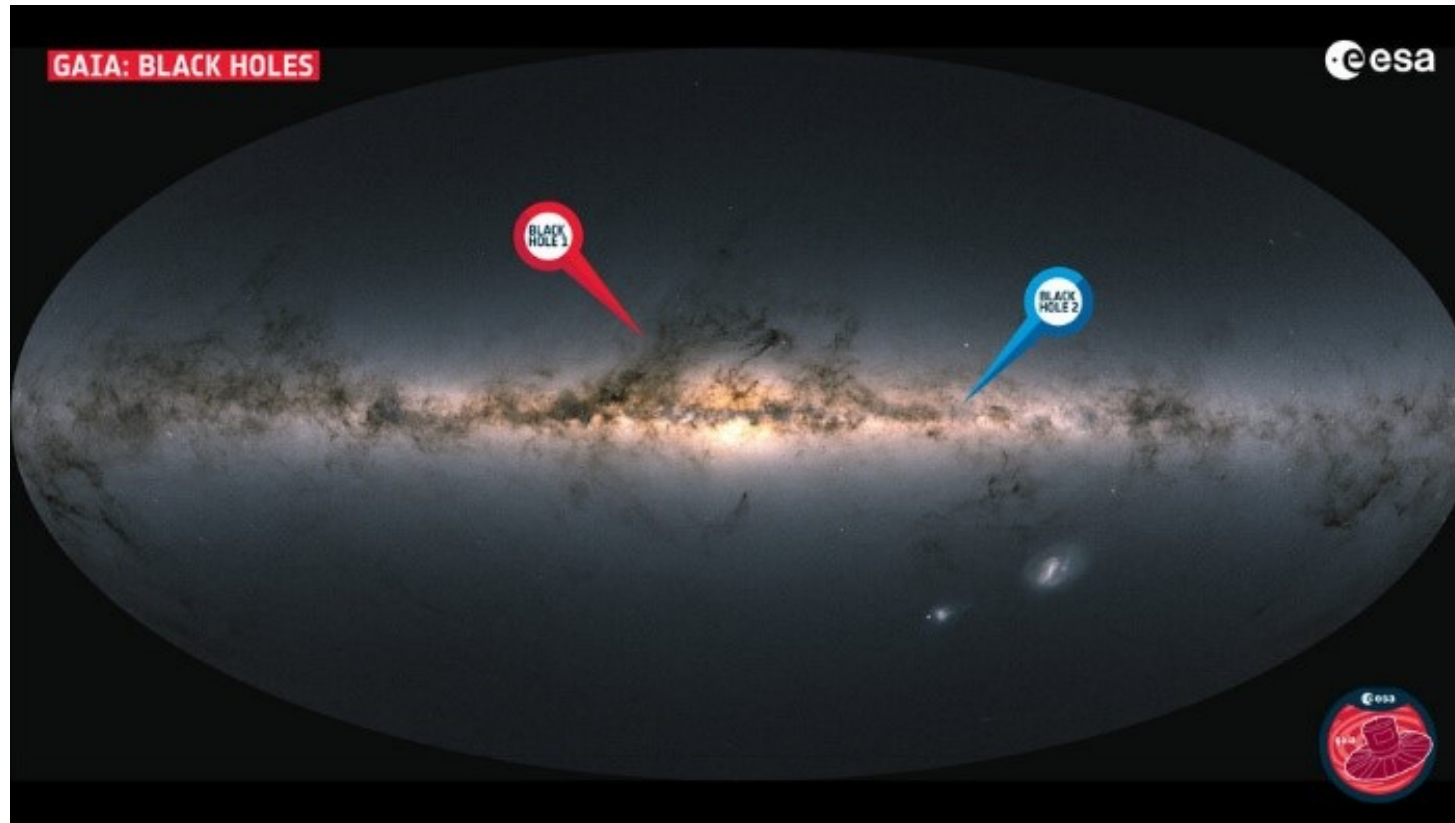
Trous noirs

Grâce à la DR3, les trous noirs les plus proches de la Terre jamais découverts:

- BH1: 1560 années-lumière de nous dans la direction de la constellation Ophiuchus
- BH2: 3800 années-lumière dans la constellation du Centaure

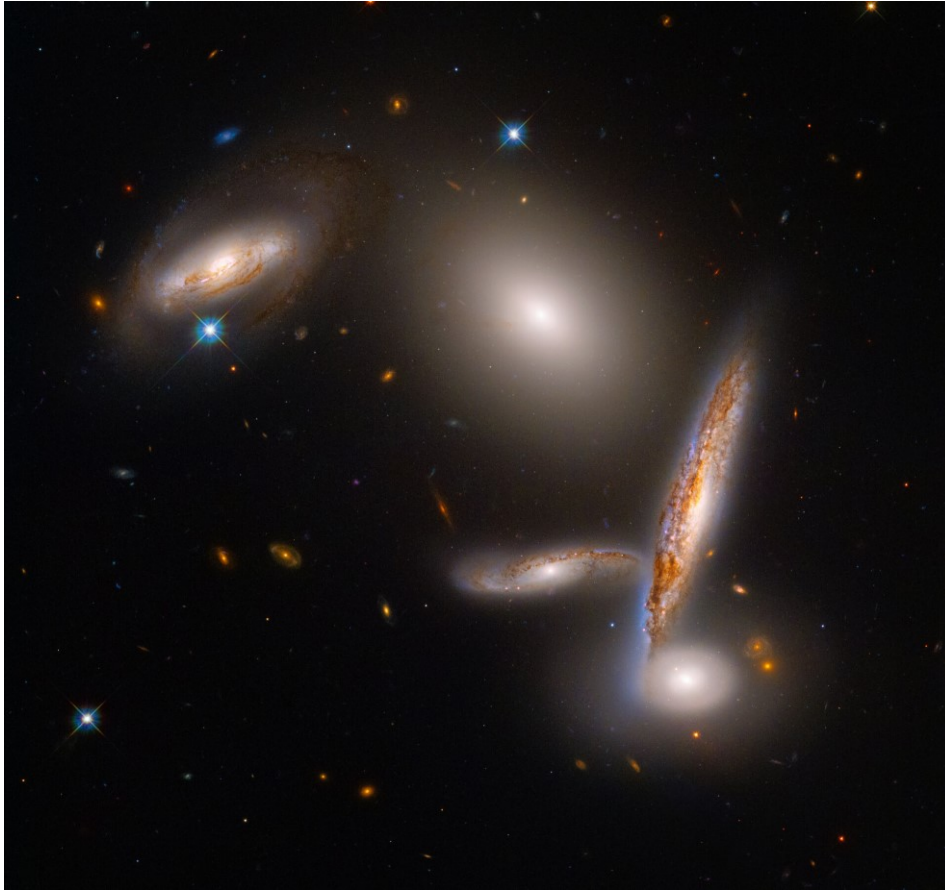


Crédits: ESA/GAIA/DPAC



https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia/Gaia_discovers_a_new_family_of_black_holes

Encore plus loin

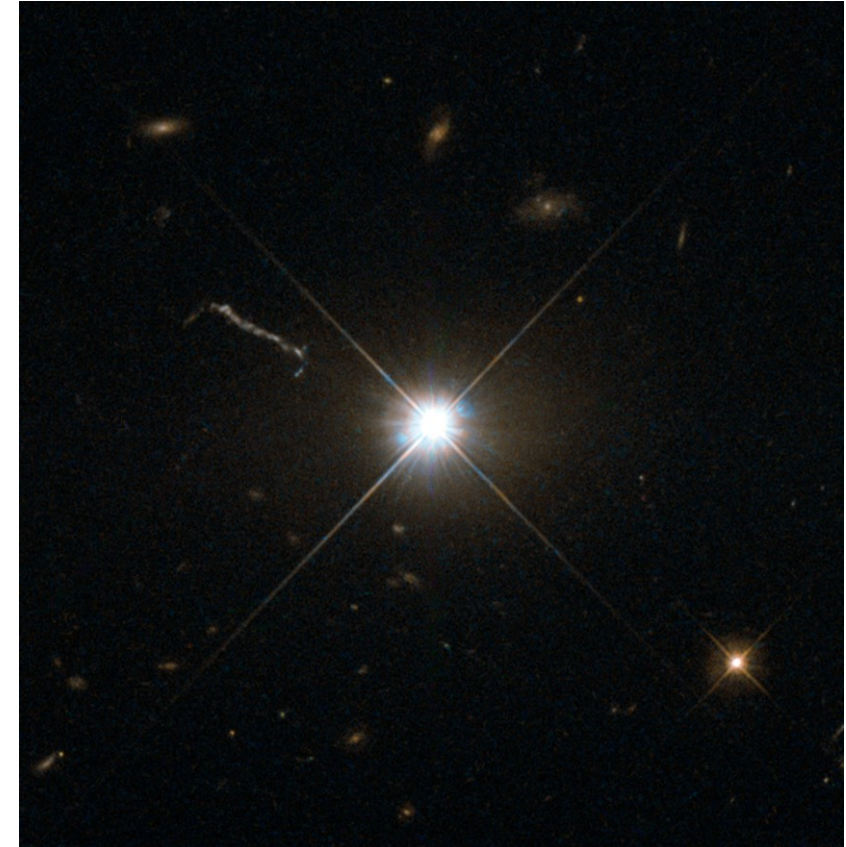


Hickson Compact Group 40
Credit: NASA, ESA, and STScI

Gaia observe aussi plusieurs millions de galaxies et de quasars

Résultats dans le catalogue DR3 (2022):

- **4.8 M** candidats galaxies avec redshift,
 - dont **0.9 M** profils de lumière
- **6.6 M** candidats quasars
 - Dont **64 k** galaxies hôtes détectées
 - Dont **16 k** profils de lumière



Bright quasar 3C 273
Credit: ESA/Hubble & NASA

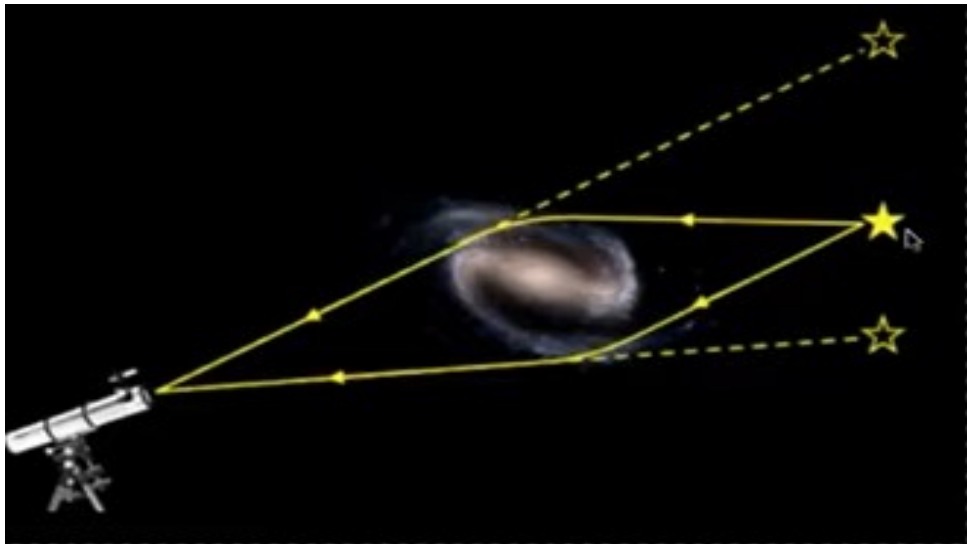
A l'horizon... des mirages ?

Un phénomène rare !

Une galaxie plus proche dévie la lumière d'un quasar lointain (lentille gravitationnelle)

Permet d'analyser des galaxies très lointaines, donc très âgées, et de mesurer la constante de Hubble

Avril 2021 : **découverte de 12 croix d'Einstein**



FPR publié en Octobre 2023

Une liste de 381 potentielles **lentilles gravitationnelles** dans l'environnement de 3.8M quasars



Merci de votre
attention