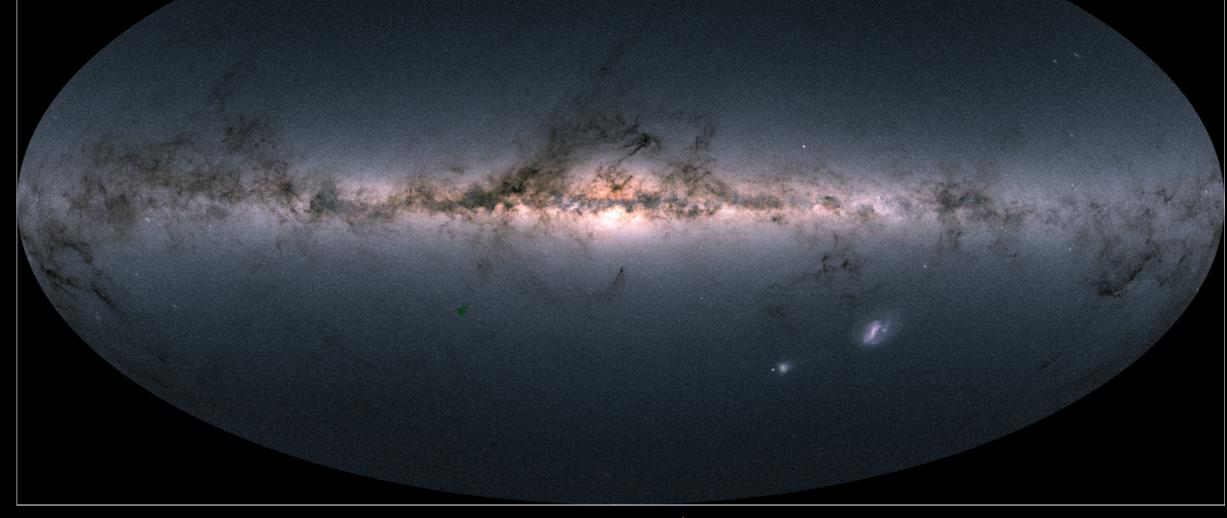
Structure et évolution de la Voie

Lactée avec la mission spatiale Gaia

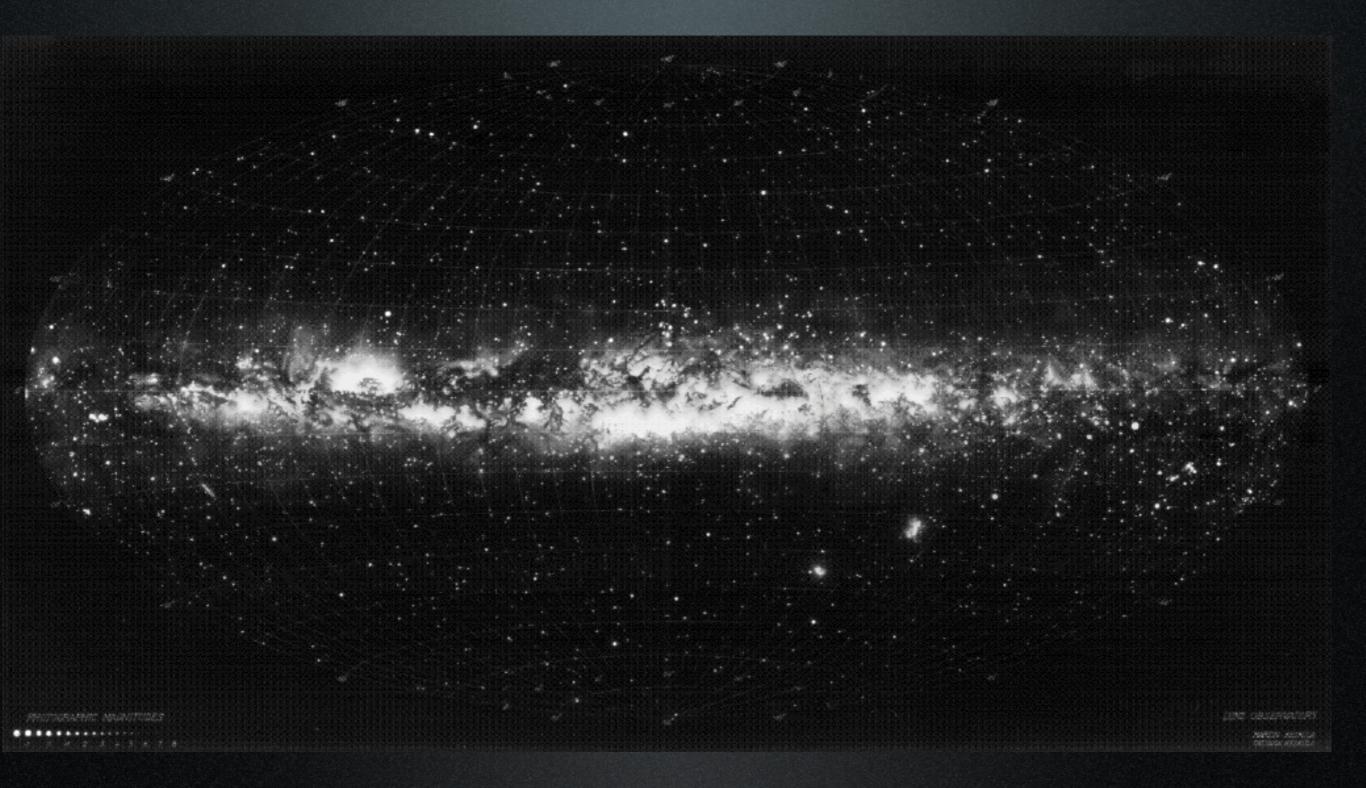


Annie C. Robin Institut UTINAM OSU THETA, Besançon

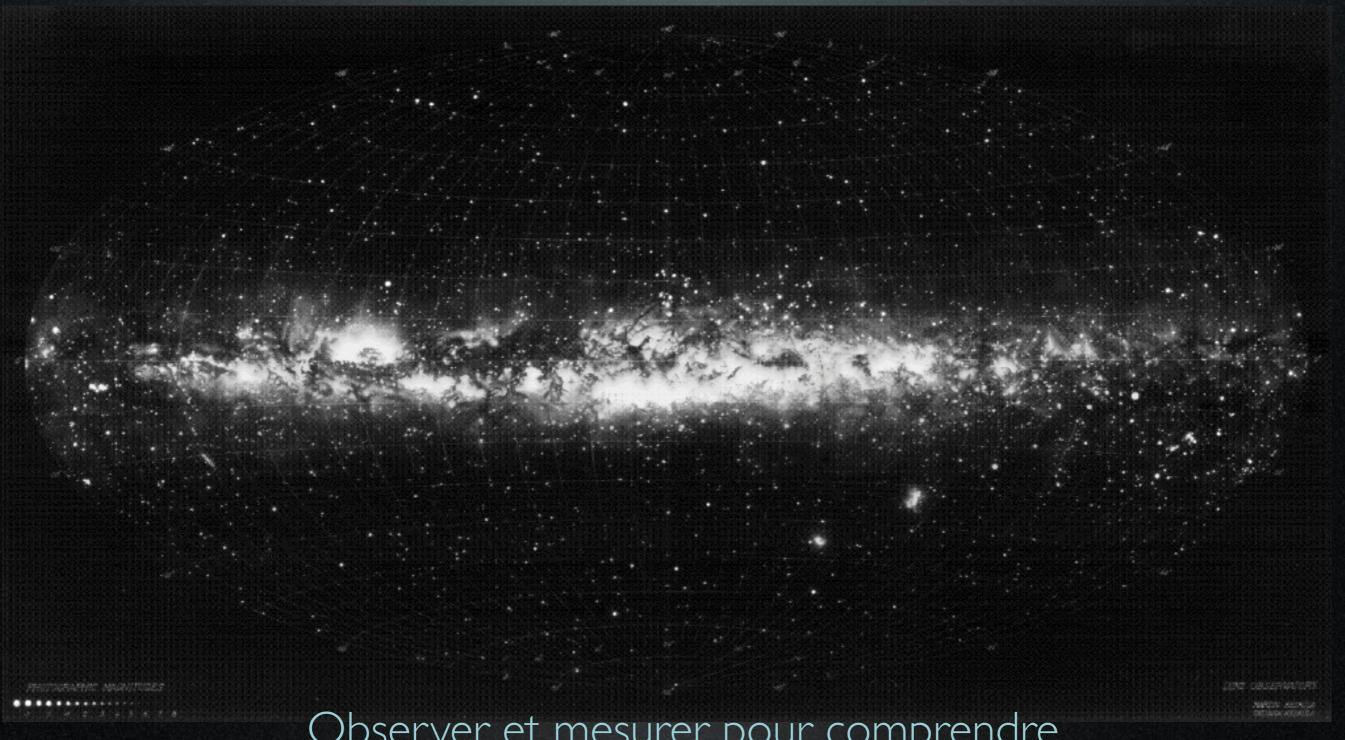
La Voie Lactée



La Voie Lactée

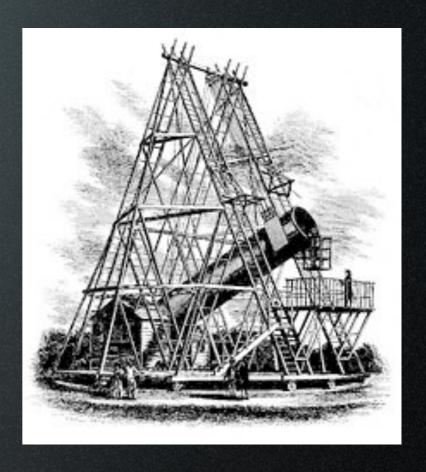


La Voie Lactée



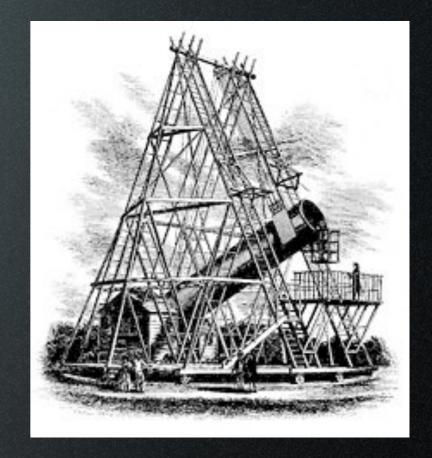
Observer et mesurer pour comprendre

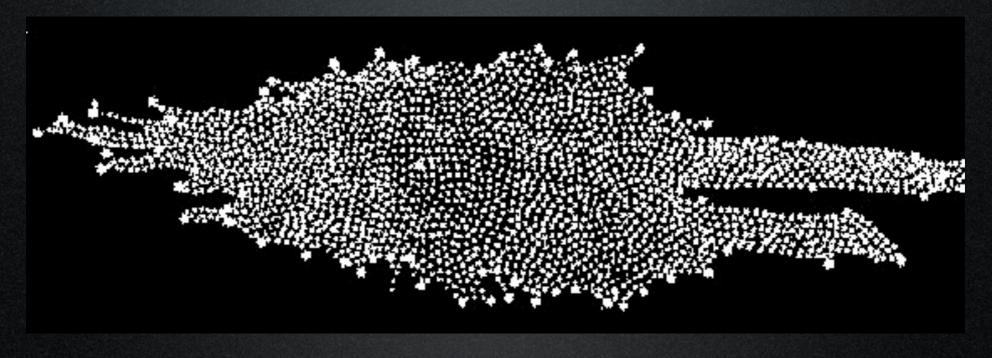
- William et Caroline Herschel ont été les premiers astronomes à faire un relevé systématique du ciel nocturne.
- Mesure de la densité d'étoiles
- La plus grande densité d'étoiles est le long de la Voie Lactée, donc que la forme de la Voie Lactée était un disque ou une «meule».



relevé William et Caroline d'Eschel ont été les premiers astronomes à fure un relevé systématique du ciel • La plus

• La plus grande Lensité d'étoiles est le long de la Voie Lactée, donc que la forme de la Voie Lactée était un disque ou une «meule».





Représentation de la Voie Lactée

Jacobus Kapteyn (1851-1922)



Jacobus Kapteyn (1851-1922)



• En 1906, Kapteyn lance une étude majeure pour comprendre la distribution des étoiles dans la Galaxie en utilisant les **comptages d'étoiles** dans différentes directions. Il mesure les magnitudes apparentes, les vitesses radiales et les mouvements propres dans 206 zones du ciel. Ce projet énorme a été la première **analyse statistique coordonnée** entre plus de 40 observatoires différents.



Sydney Harris

Méthode encore utilisée actuellement...



Dans le visible

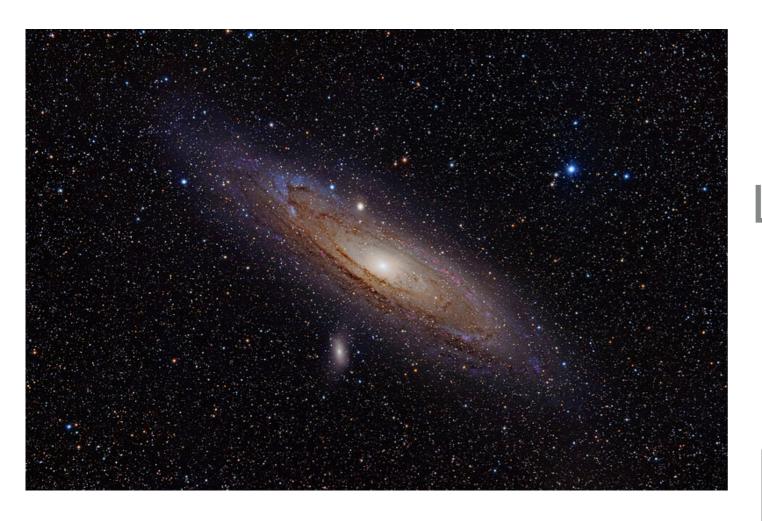


Dans l'infrarouge

Pourquoi la Voie lactée est intéressante? De quoi est -elle faite? Comment s'est-elle formée? Pourquoi est-ce différent selon la longueur d'onde?

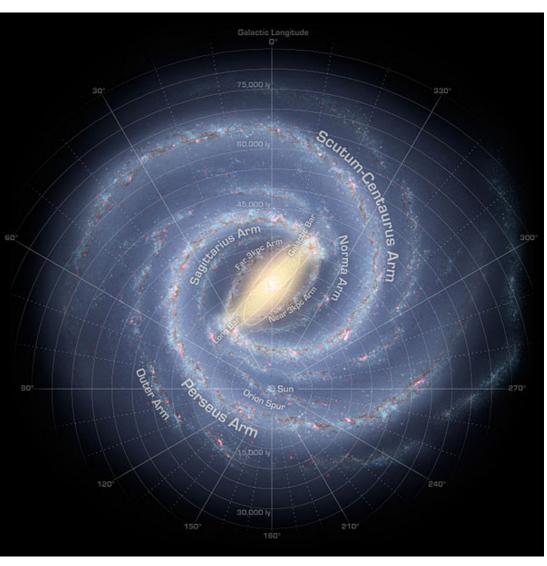
POURQUOI OBSERVER LA VOIE LACTÉE ?

- ◆Une Galaxie spirale parmi des milliards : prototype pour étudier la formation des galaxies spirales
- **◆Enormément d'informations: 200 milliards d'étoiles**
- **♦**Observations de différentes composantes : étoiles, gaz, poussières (infrarouge, mm, radio...)
- ◆Le système solaire est dans le plan galactique, gêné par la poussière
- **♦**Pas une vision d'ensemble
- **◆Est-elle typique ?**

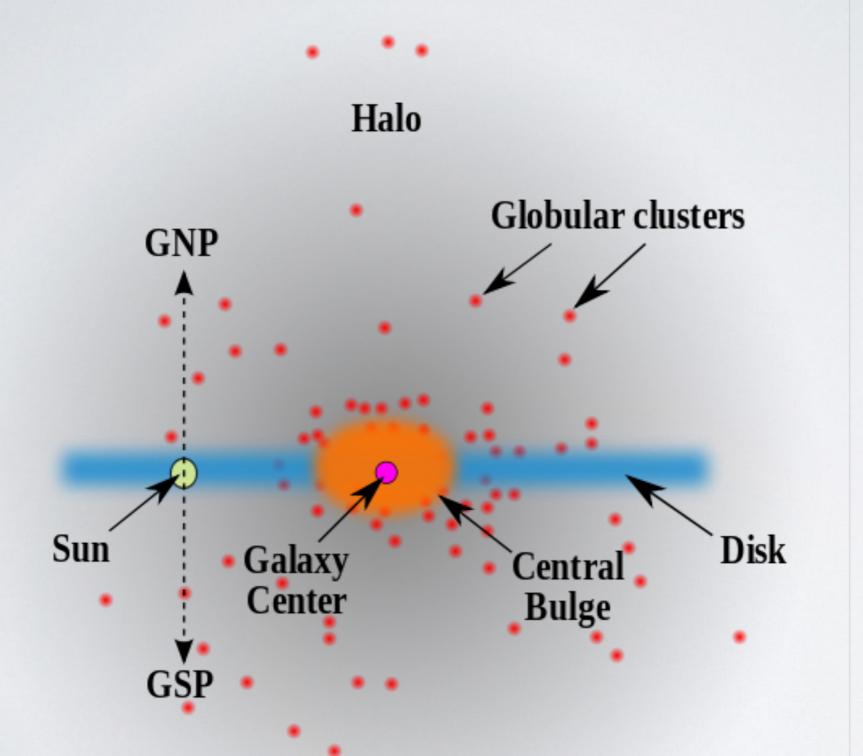


La galaxie d'Andromède

Schéma de la Voie Lactée



LA VOIE LACTÉE



Disque en rotation

Halo avec orbites radiales

Schéma très simpliste...



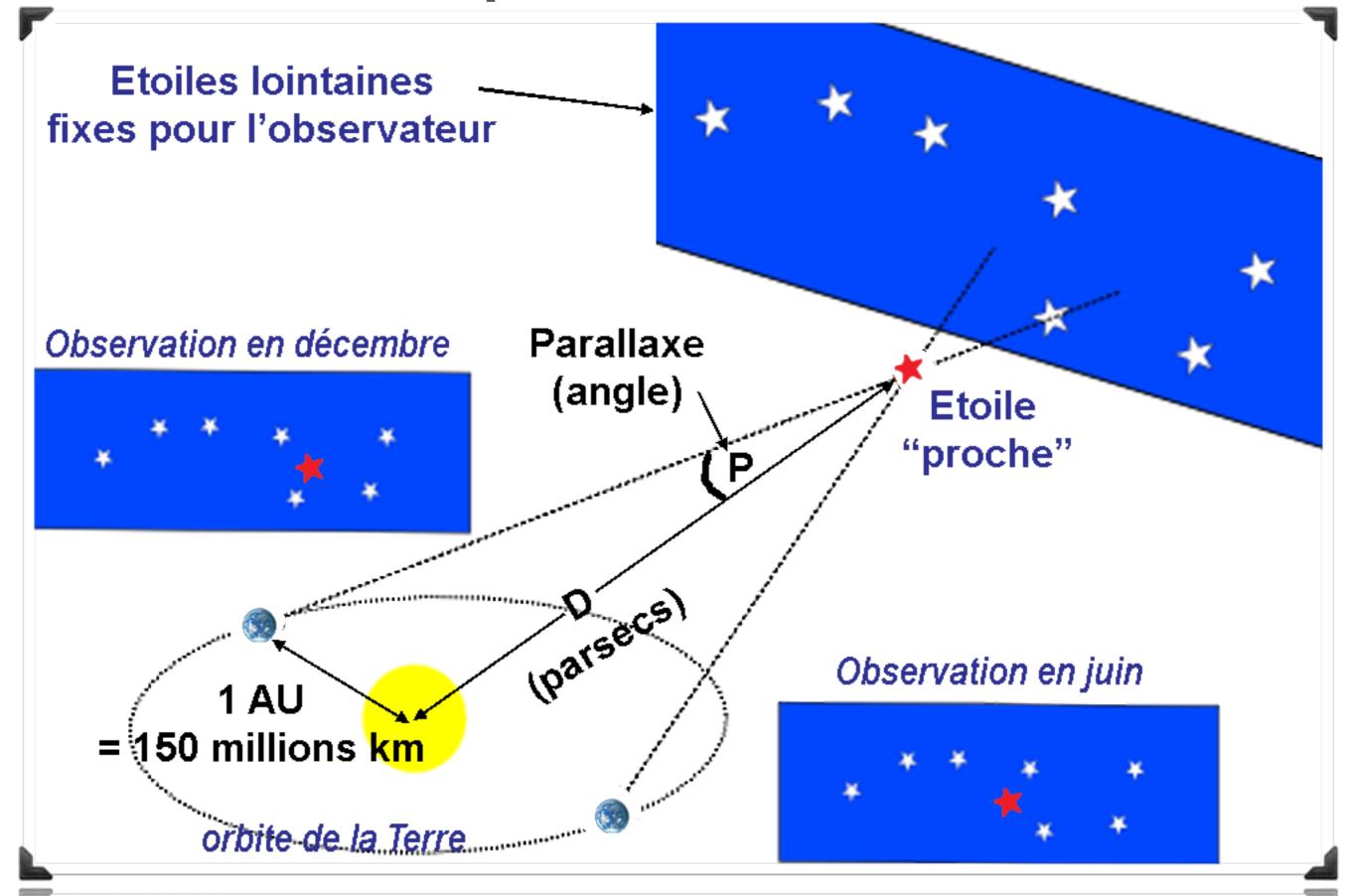


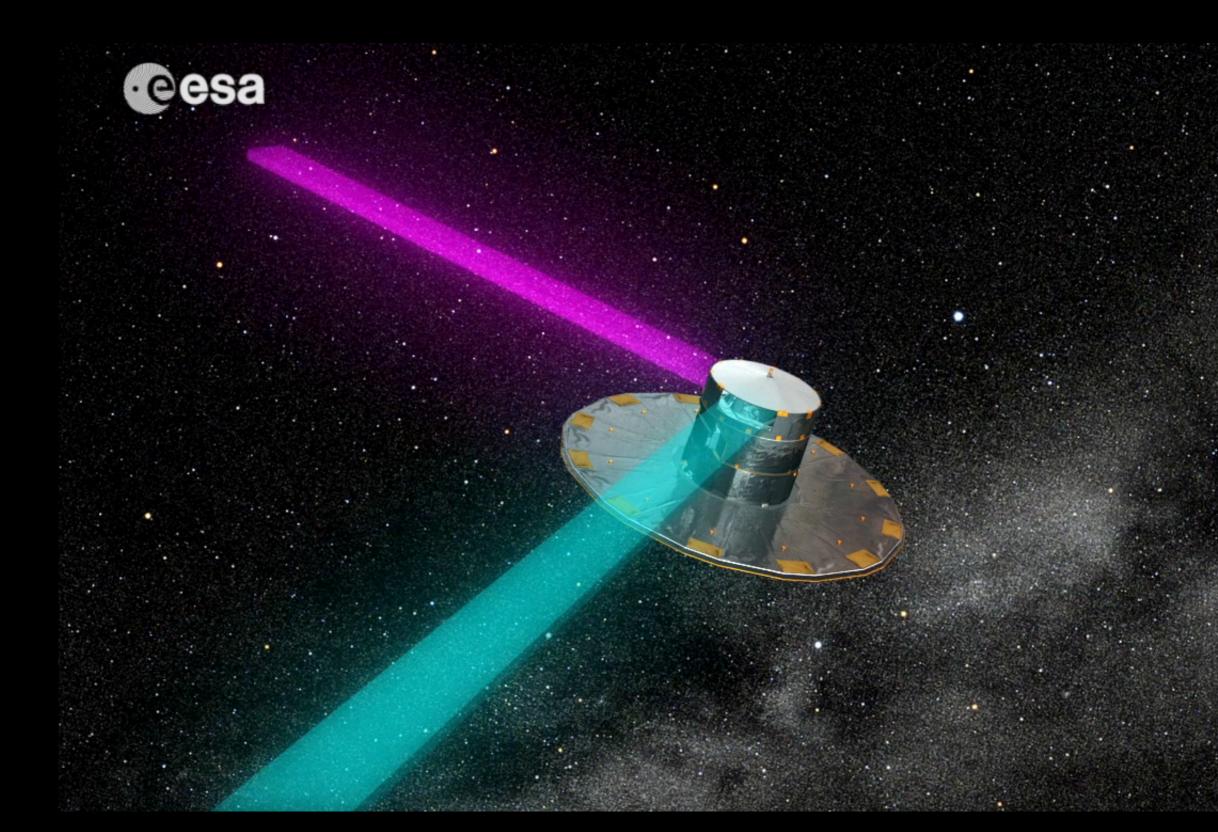
- · Besoin de déterminer des distances d'étoiles
- · Luminosités précises, distribution spatiale des étoiles
- Recenser les objets rares
- · Préciser les sous-structures, les amas
- Tracer la matière noire
- Physique fondamentale (tests GR)

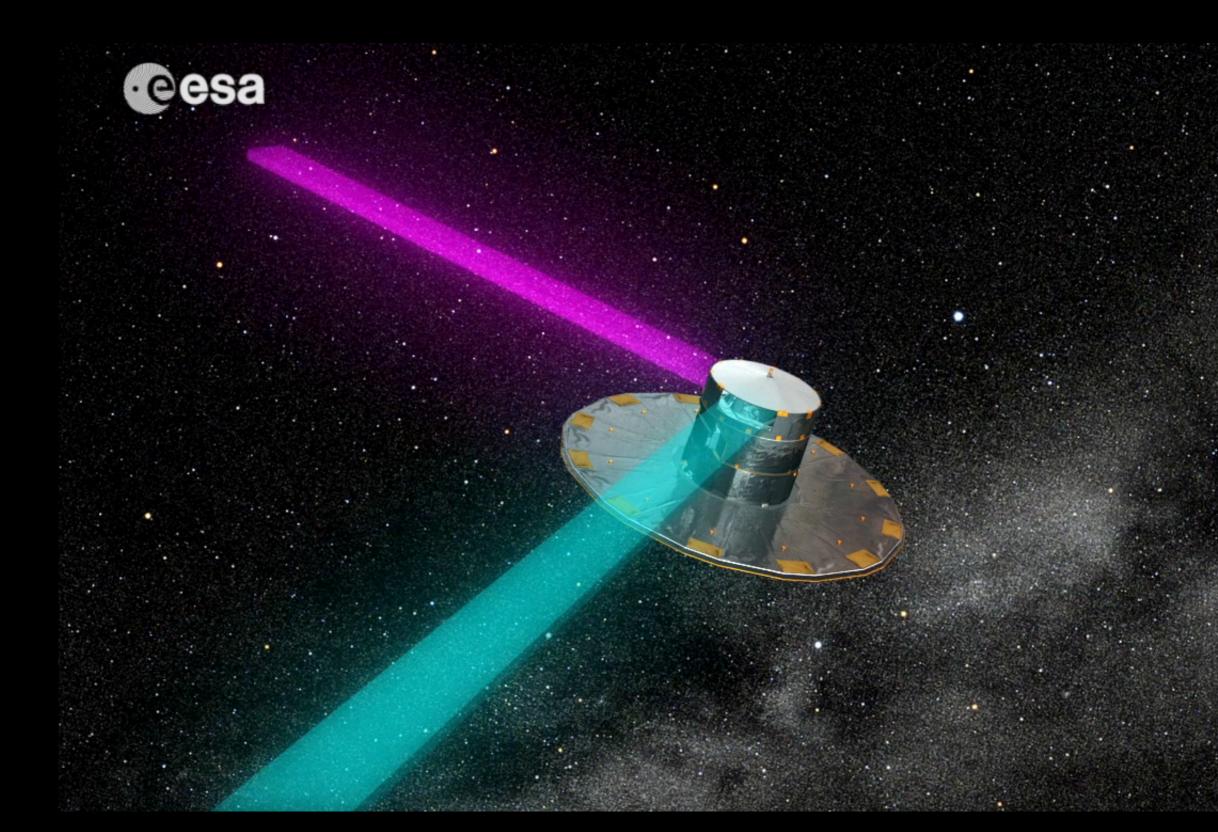


Etc.

La mesure des parallaxes





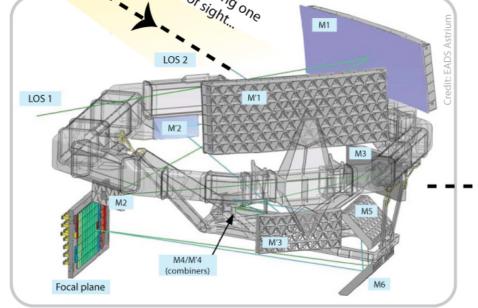






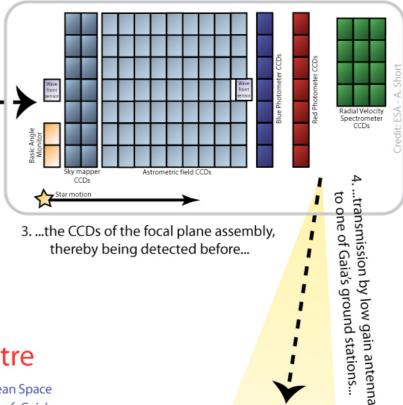
Payload

Light from a celestial object enters Gaia's payload arrangement through one of the two viewing apertures, striking the large primary mirror opposite (M'1 in the case pictured). The light is bounced by a series of mirrors along a total focal length of 35m. The light paths from the two viewing directions meet at the M4/M'4 beam combiner before finally reaching the shared focal plane.



2. ...enters Gaia's instruments, and is reflected along a 35m focal length to hit...

sophisticated charge-coupled devices (CCDs). Containing 106 of these light detectors, the focal plane assembly comprises a total of nearly one billion pixels - a 'gigapixel'.



3. ...the CCDs of the focal plane assembly, thereby being detected before...



Data Processing Centres

Following the preliminary processing, the data passes to Gaia's Data Processing Centres (DPCs). Data processing is the task of DPAC, the Data Processing and Analysis Consortium. DPAC draws its membership of about 450 scientists and developers from all over Europe; the processing itself takes place at these six DPCs.

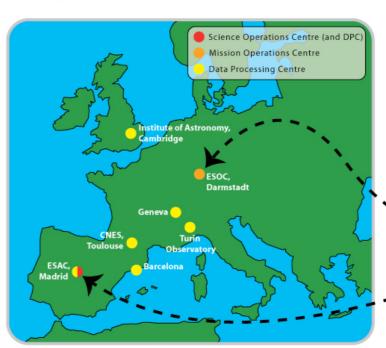
6. ... and processed by DPAC into the

Gaia Catalogue

The final Gaia Catalogue, containing the precise astrometric, photometric and spectroscopic details of about a billion celestial objects, is scheduled for publication in 2022. Gaia's processed data will then immediately be freely available for investigation by the world's scientific community.

Science Operations Centre

Gaia's Science Operations Centre is based at ESA's European Space Astronomy Centre (ESAC) in Spain. ESAC receives all of Gaia's science telemetry for preliminary processing in the Initial Data Treatment. Also carried out here is Detailed First Look processing, Gaia's regular science 'health check'.



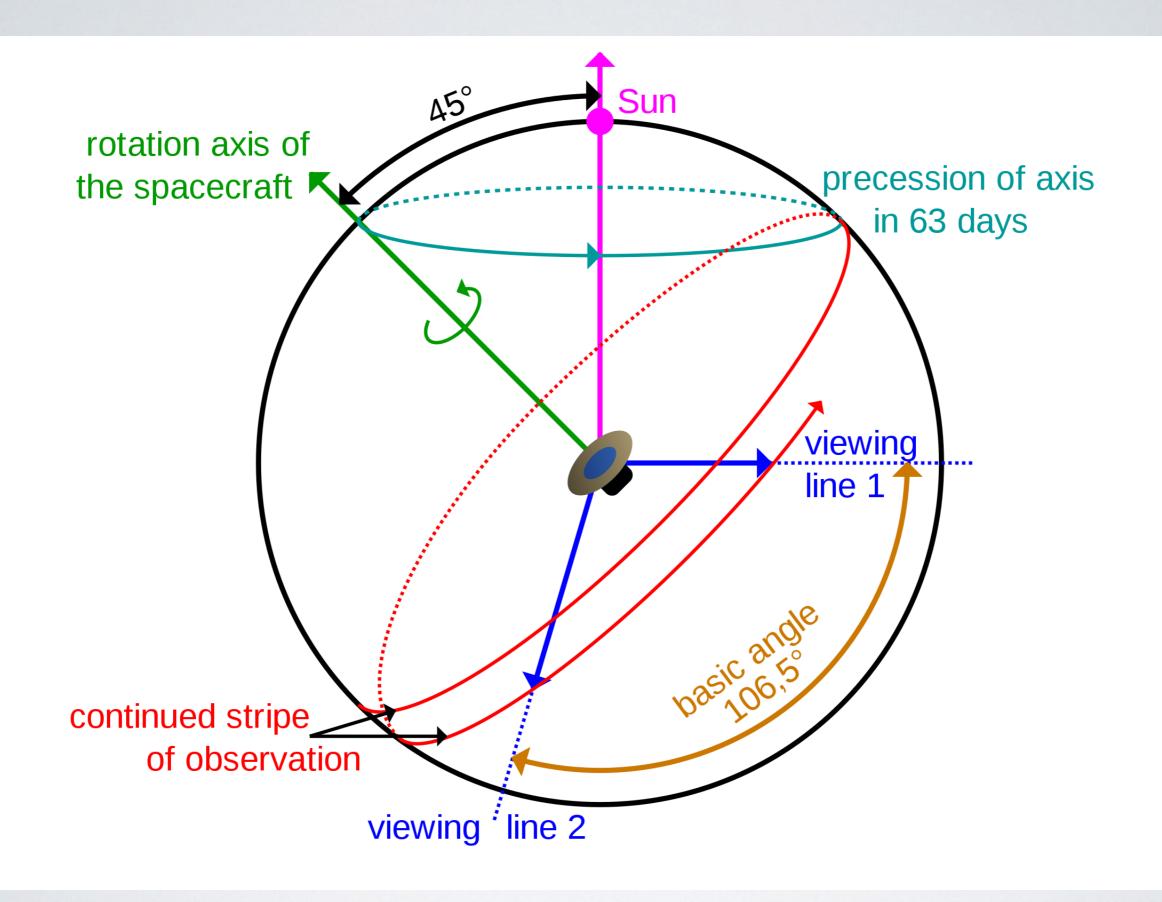
5. ...the telemetry is then transmitted onto the Mission and Science Operation Centres...



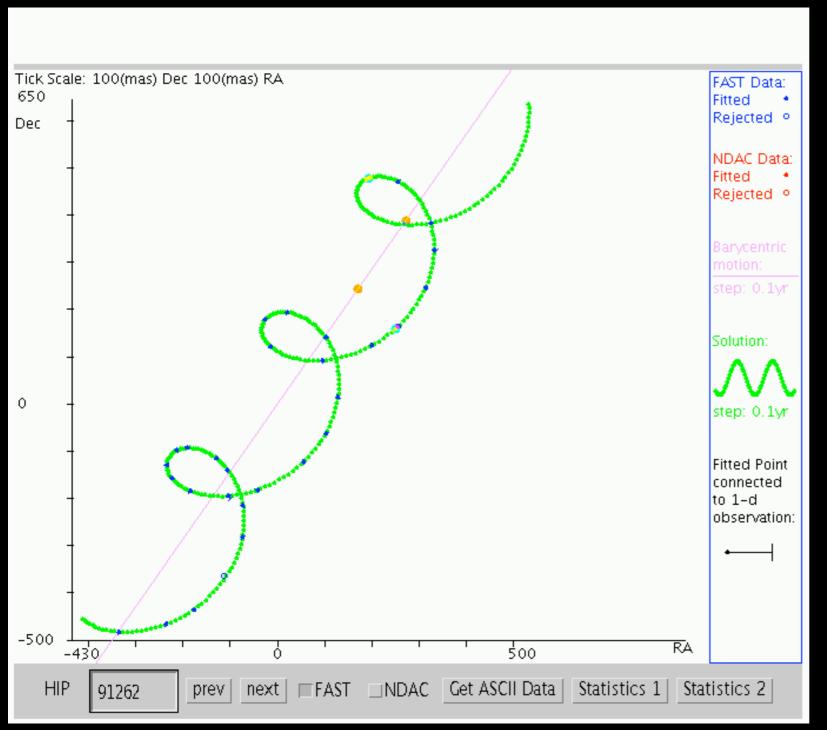
Ground station

Gaia will be making use of three ground stations, each with 35m deep space dish antennae: Cebreros in Spain, New Norcia in Australia and Malargüe in Argentina.



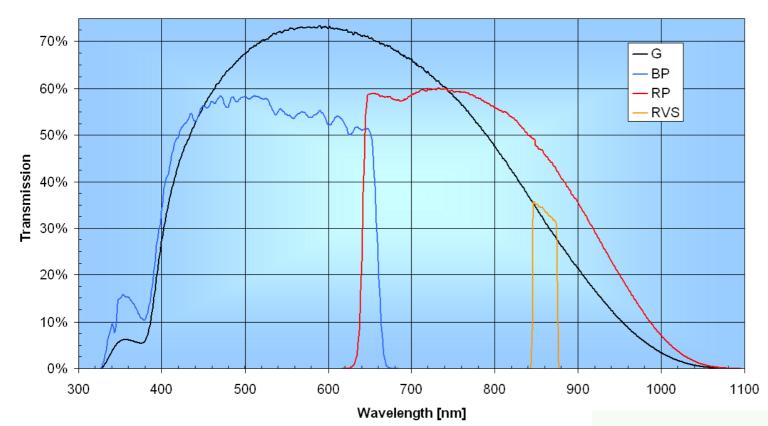


Chaque source observée ~80 fois sur 5 ans



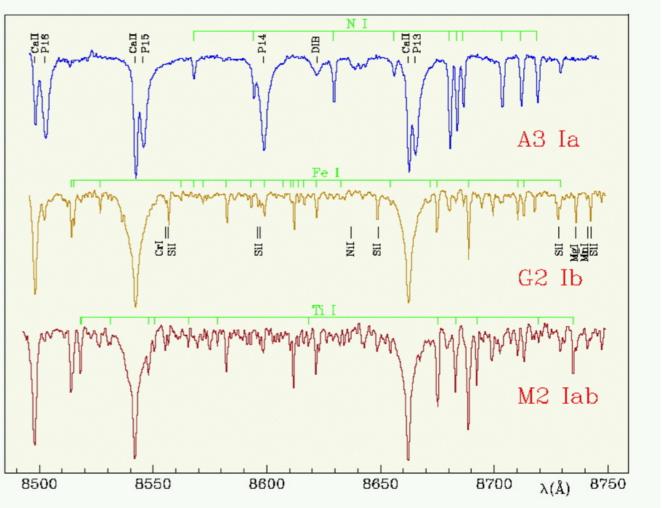
position+parallaxes + mouvements propres : 5 paramètres à déterminer

Si étoiles multiples : >= 9 paramètres



Astrométrie Photométrie



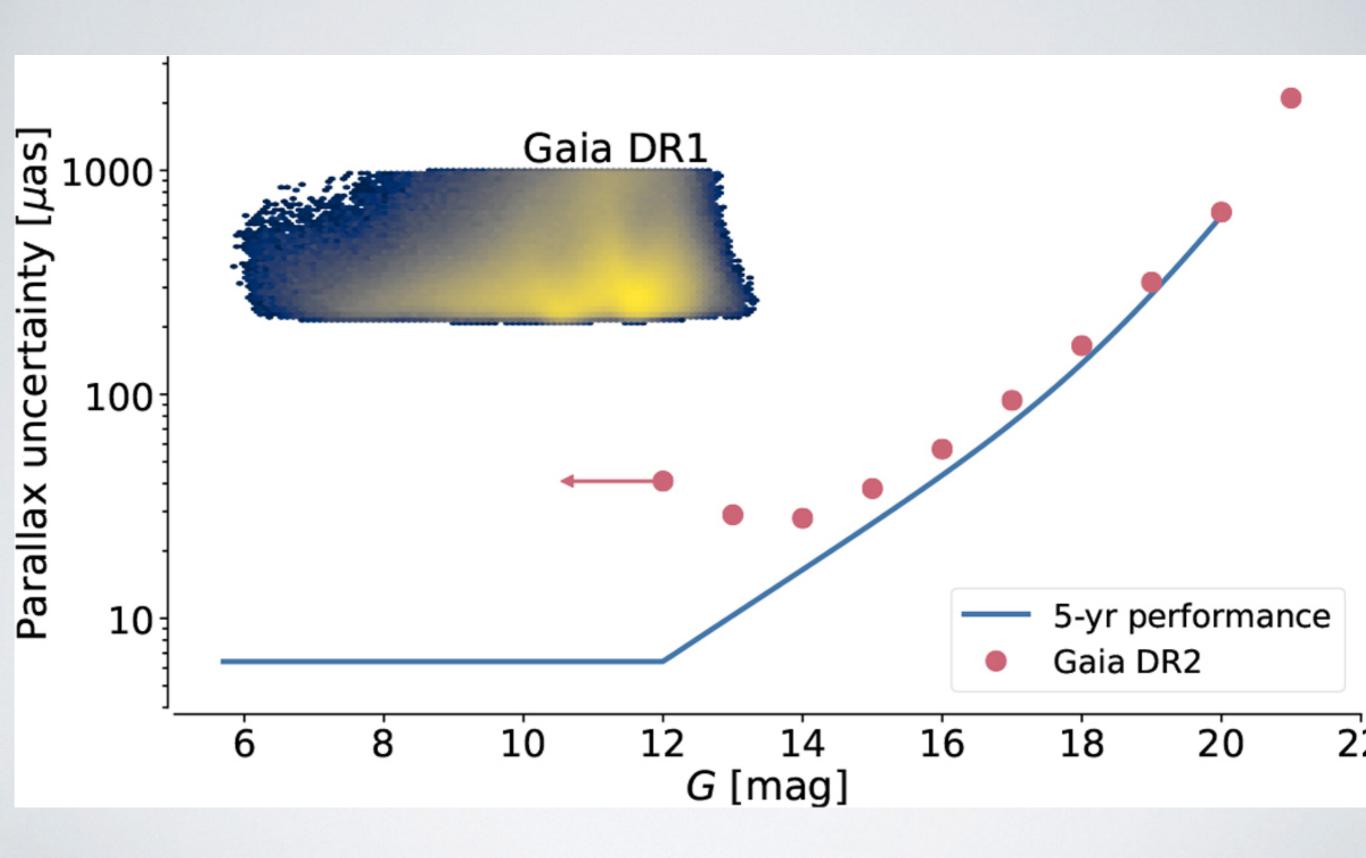


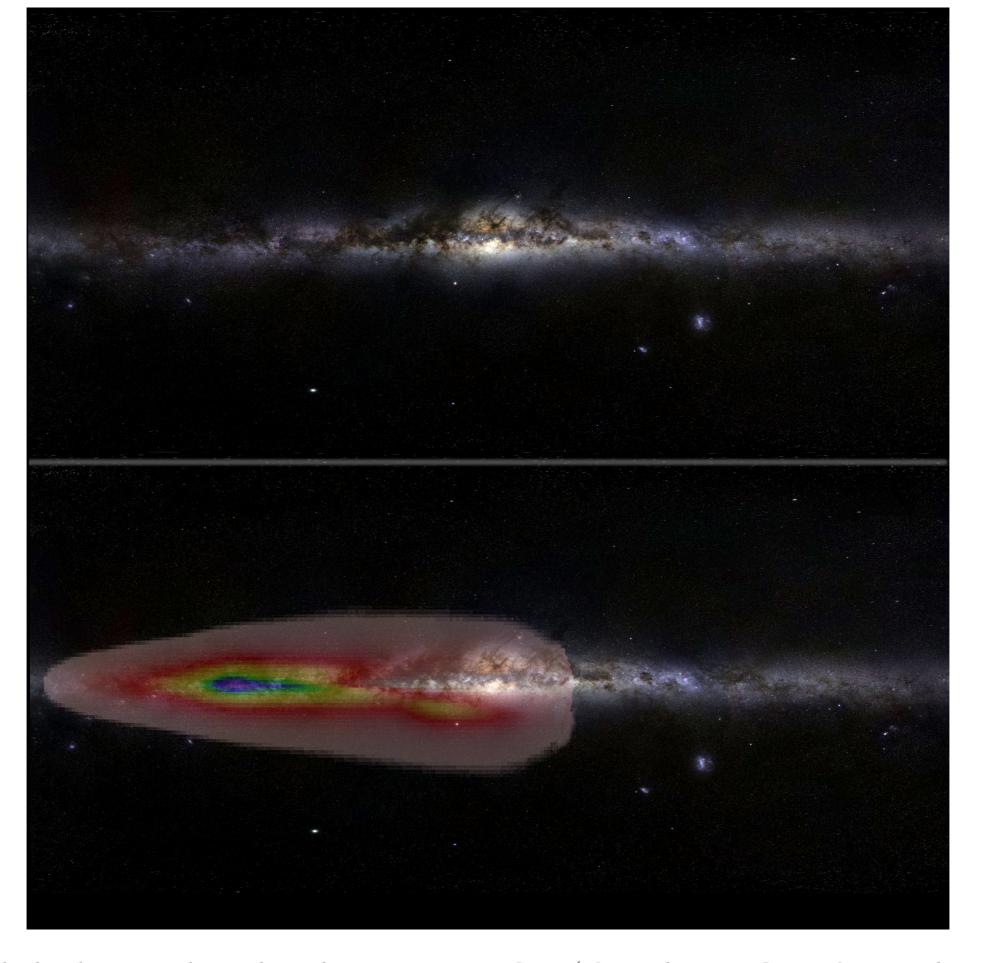


GAIA

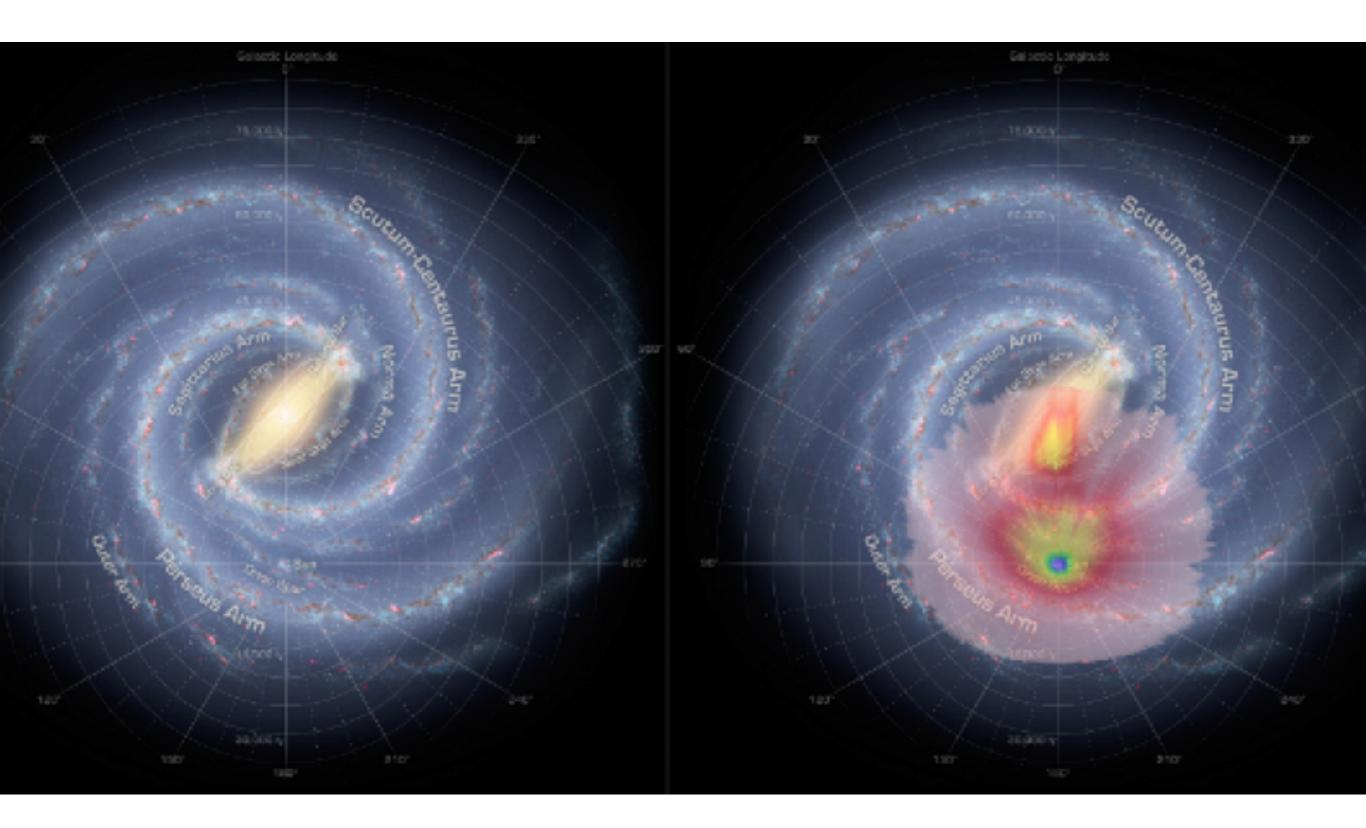


- Positions, parallaxes, mouvements propres: précision
 ~10-100 micro-arcsec. (~une pièce sur la Lune)
- Photométrie précision 2 milli-magnitude par CCD (systématique de 10 mmag)
- Spectroscopie : vitesses radiales (Doppler: précision de qq 100 m/s à qq 10 km/s), température, gravité, et en fin de mission: compositions chimiques d'étoiles brillantes



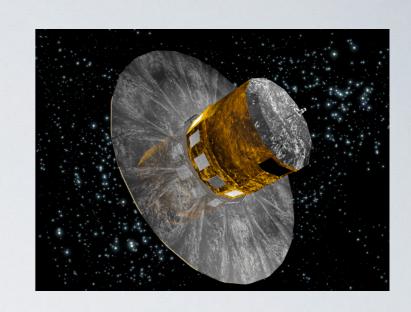


Estimation de la densité d'étoiles observées par Gaia (Simulation GUMS10, Robin et al, 2012)





GAIA

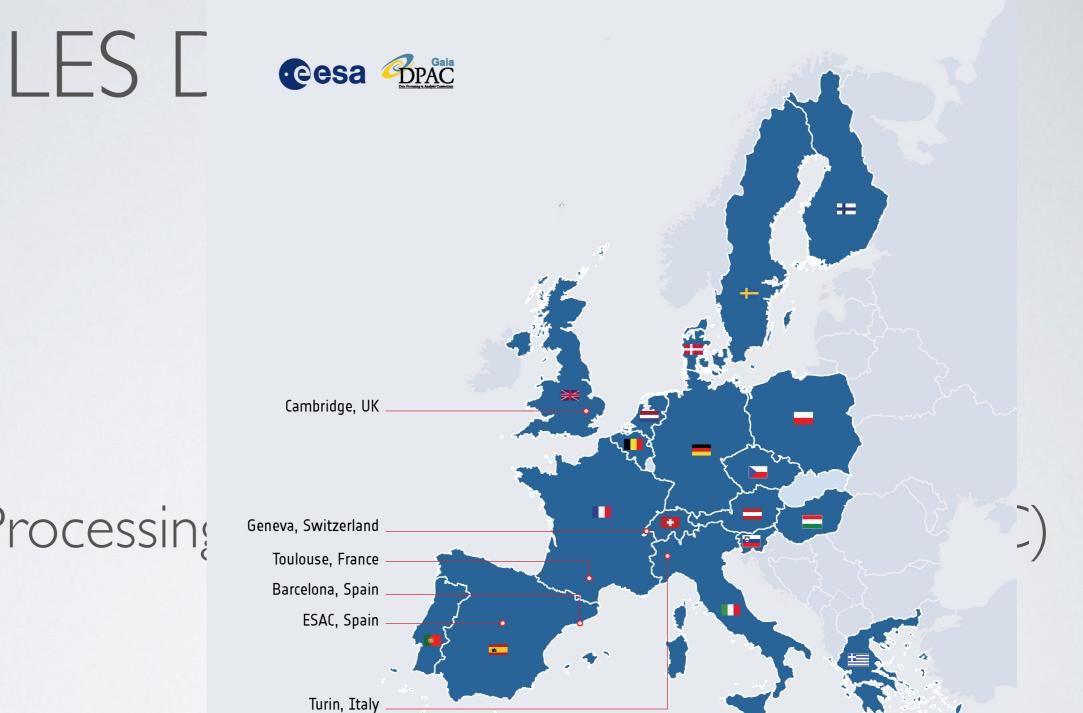


- Préparation de la mission depuis ~ 1990
- Lancement le 19 décembre 2013 (ESA, Soyouz, Kourou) => L2
- Les données sont collectées pendant 5 ans (+ extension)
- Publication de catalogues intermédiaires
 - DR2: ~ 1.7 milliards d'étoiles
- Publication du catalogue final ~2022 http://gea.esac.esa.int/archive/



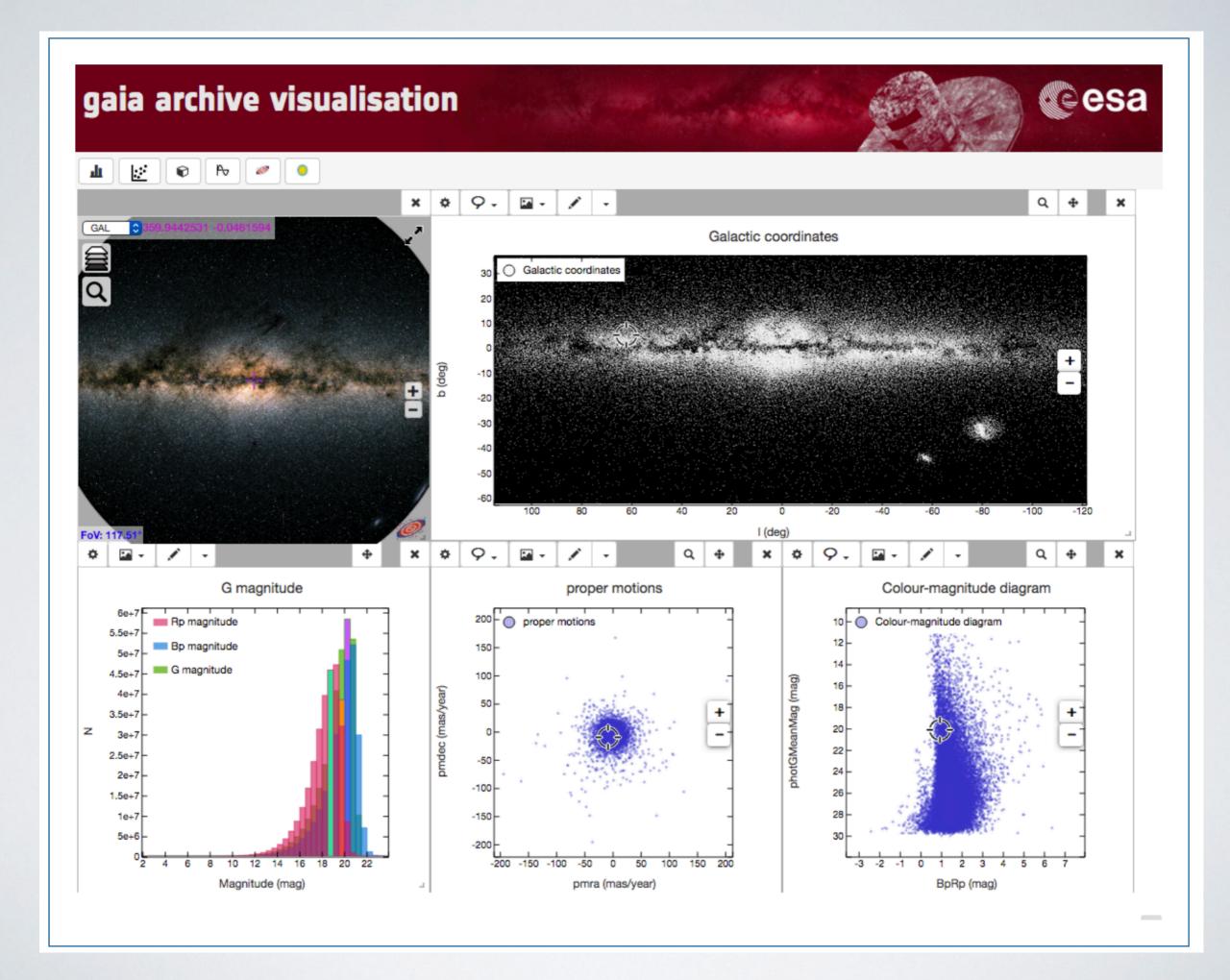
LES DONNÉES GAIA

Data Processing and Analysis Consortium (DPAC)



• Data Processing

Data Processing Centres



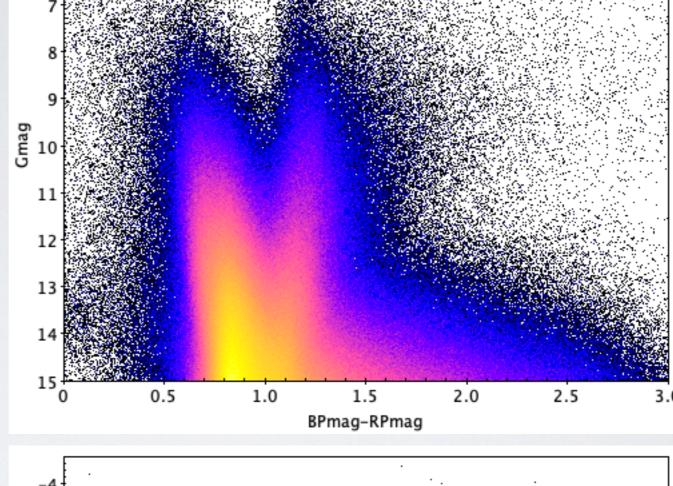


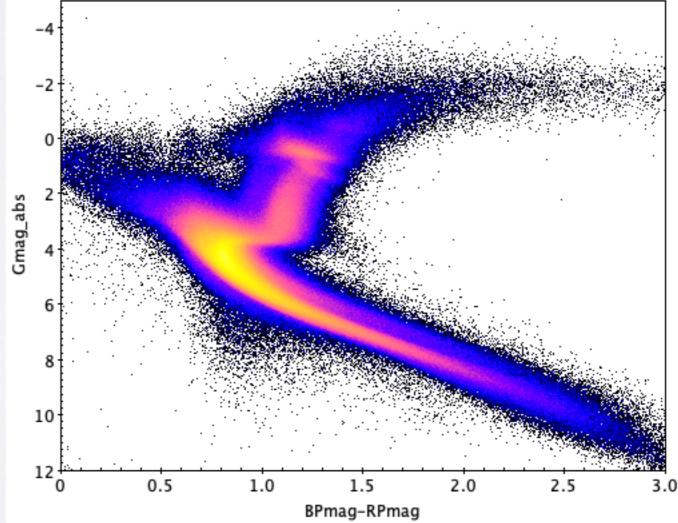
RÉSULTATS GAIA



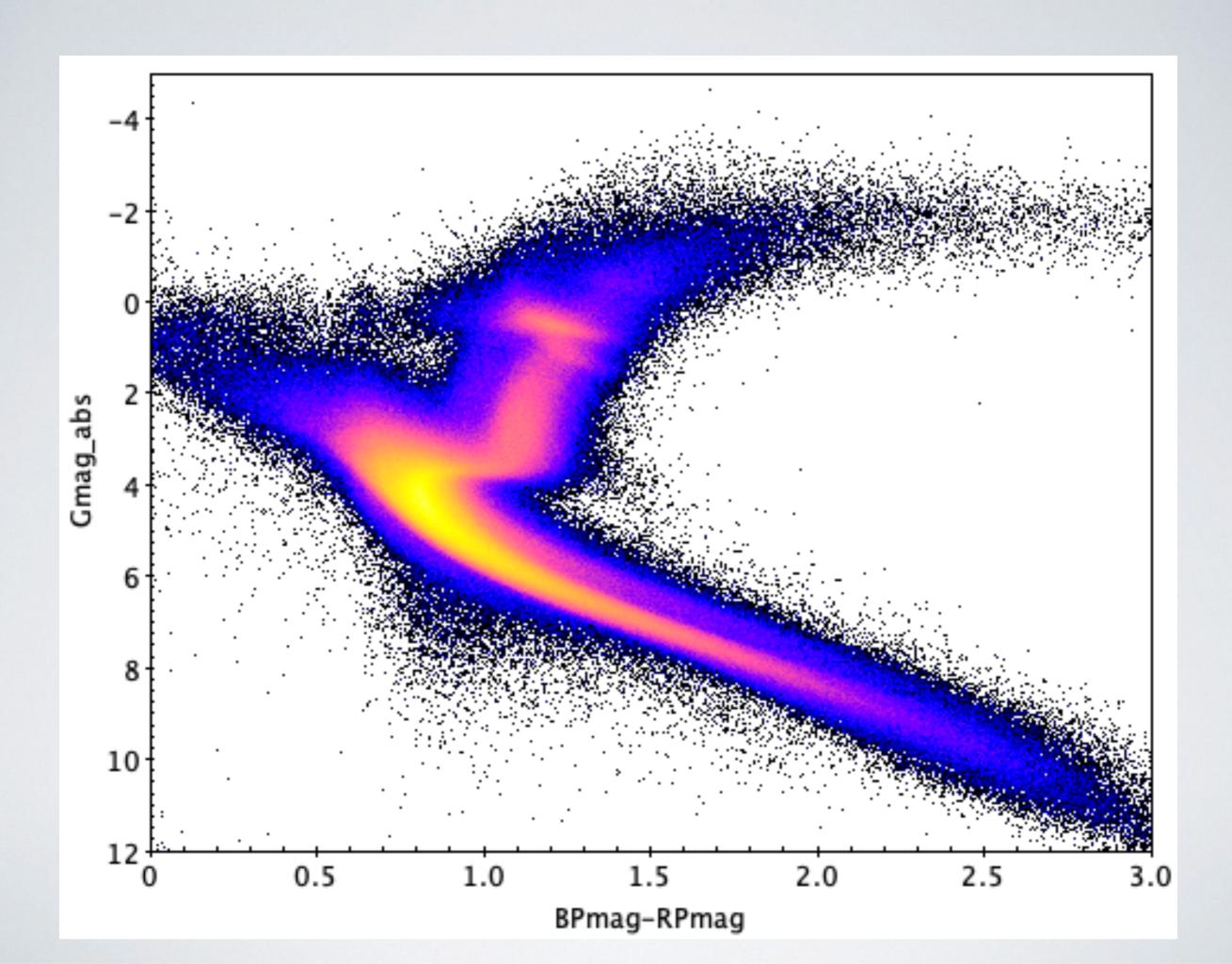
- · Mission très prolifique. Très gros volume de données.
- DRI septembre 2016: >1100 citations
- DR2 avril 2018: 1600 articles sur I an
- Résultats très importants concernant la Voie lactée,
 mais aussi les étoiles, les amas, les galaxies, quasars, un nouveau système de référence, astéroïdes, etc...

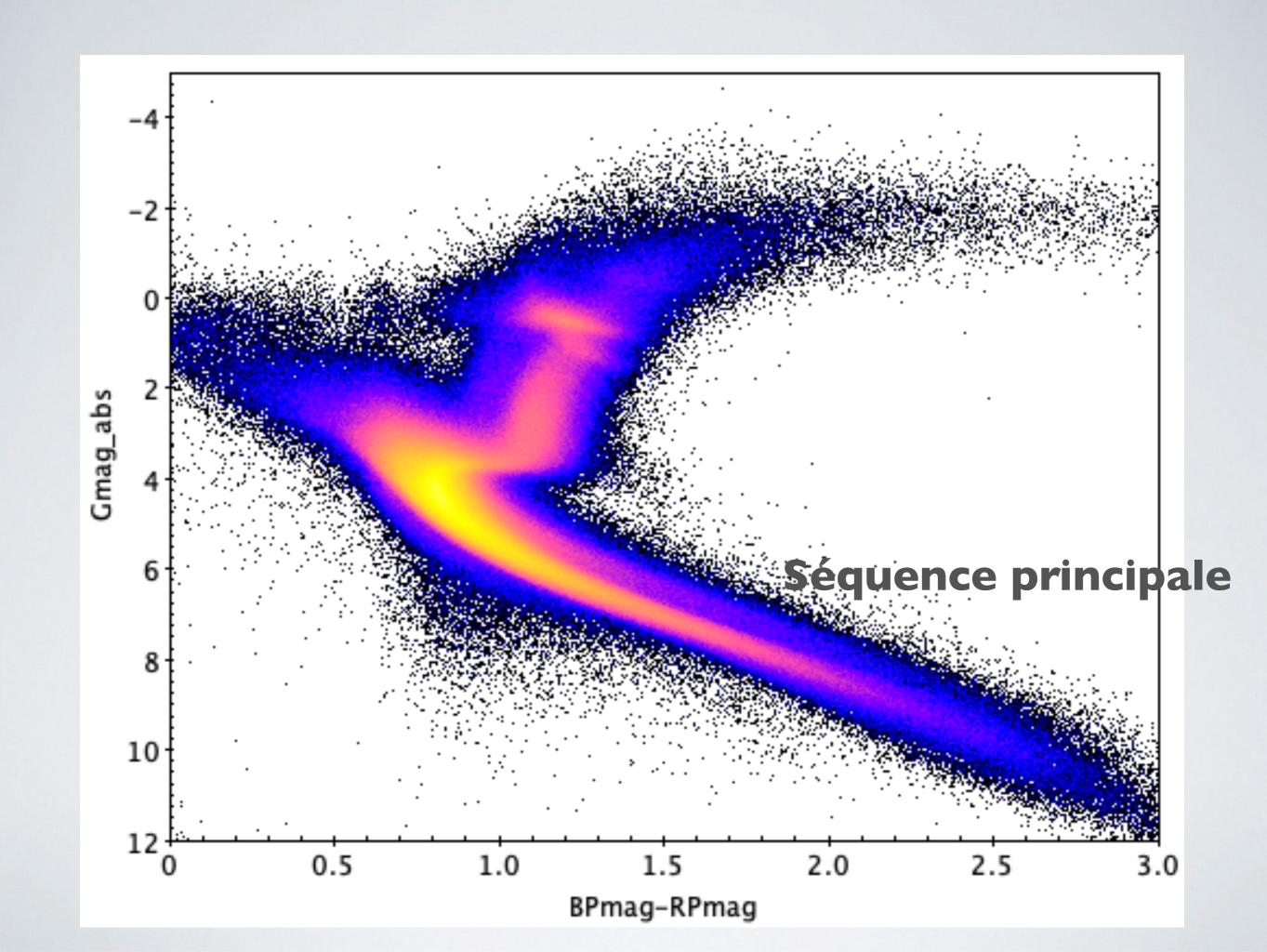
Magnitude apparente

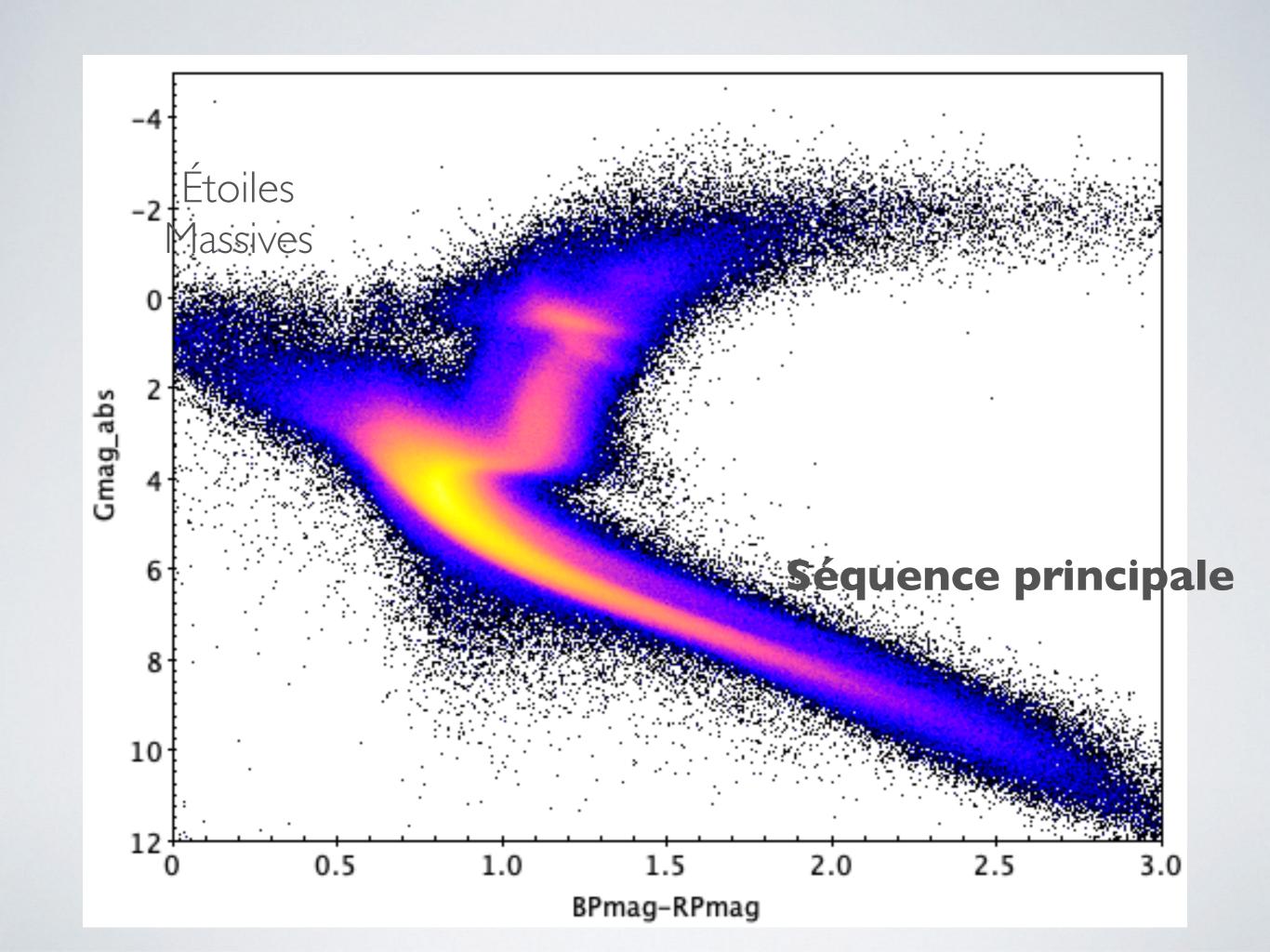


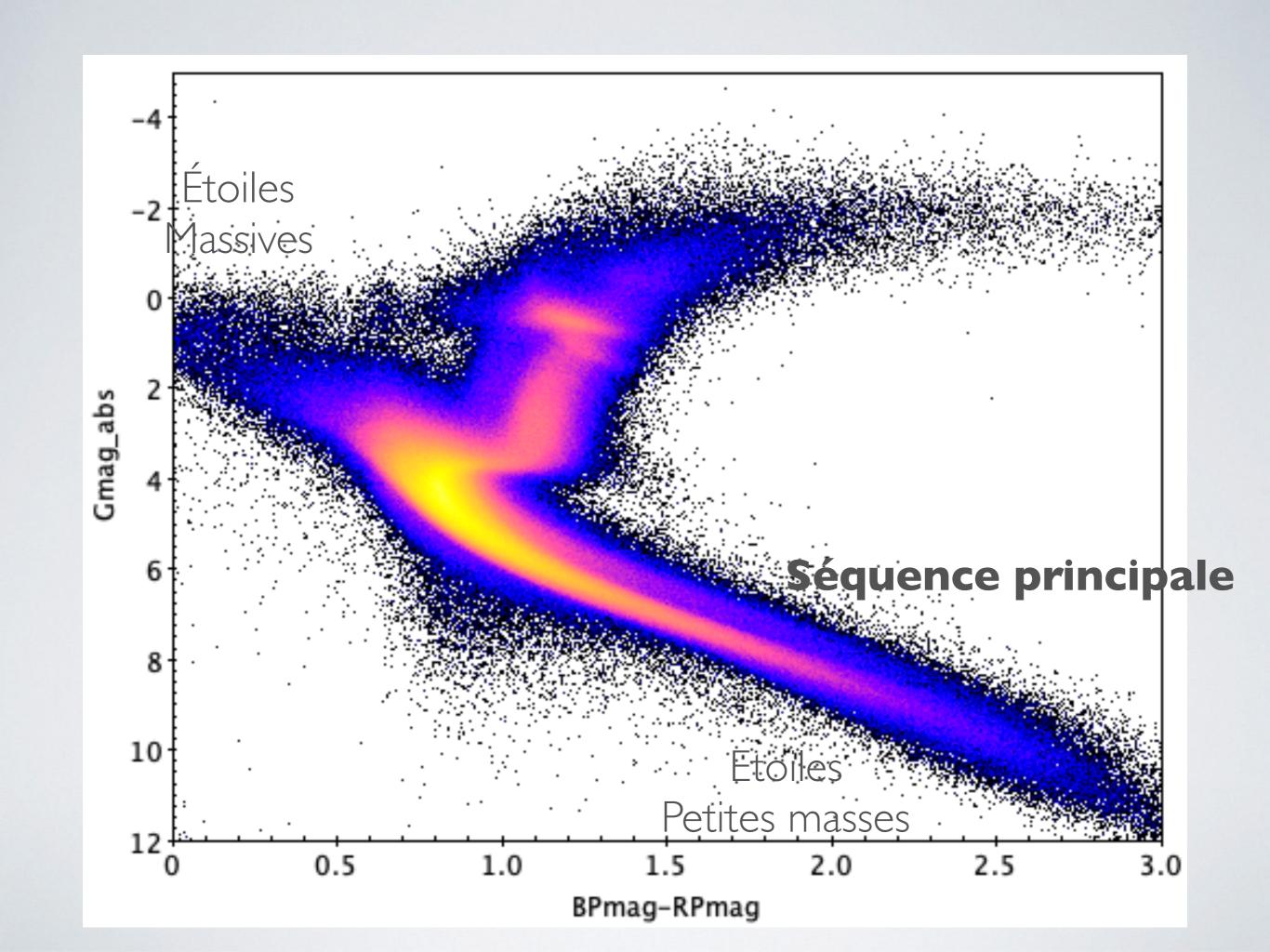


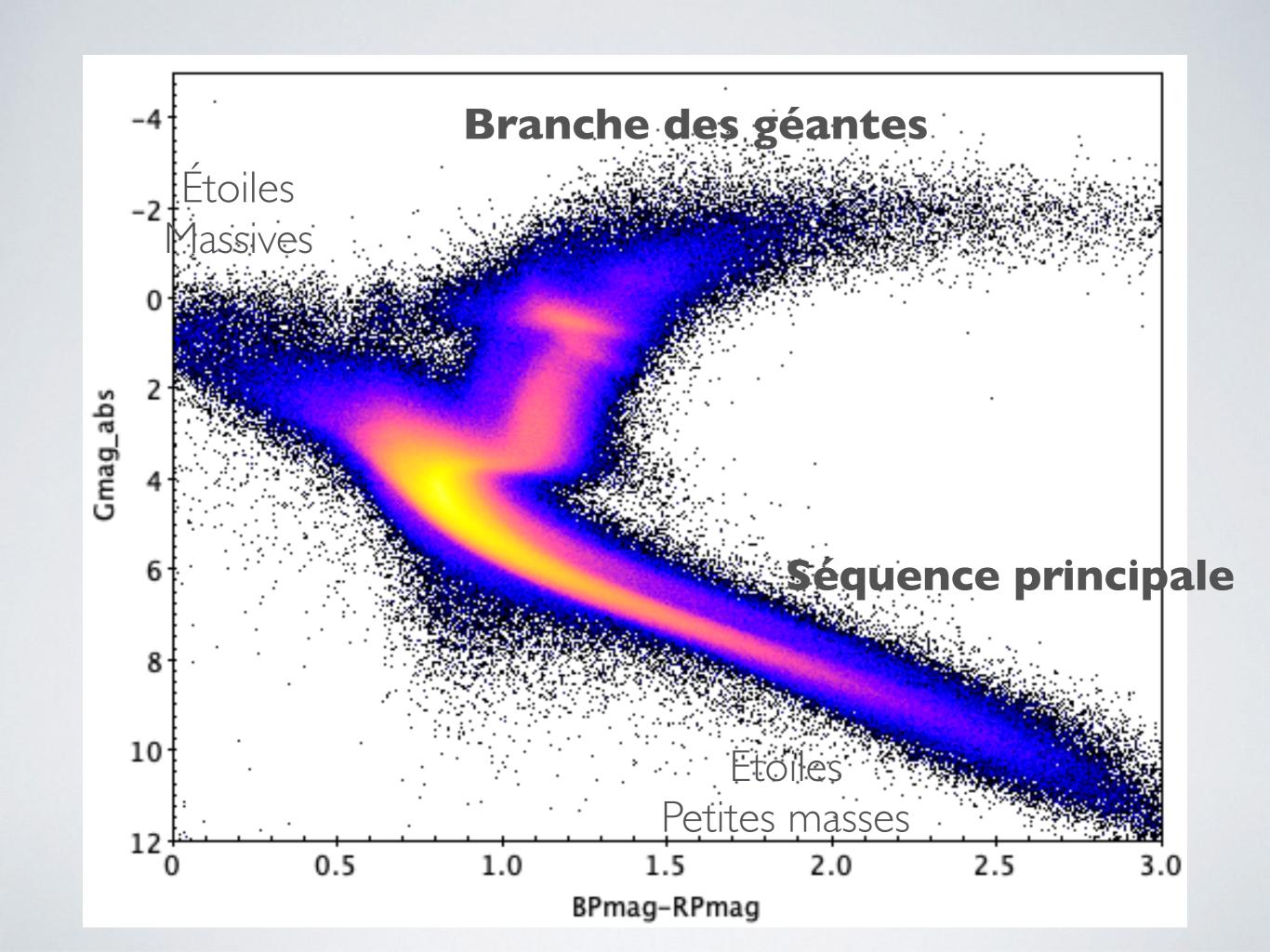
Magnitude absolue

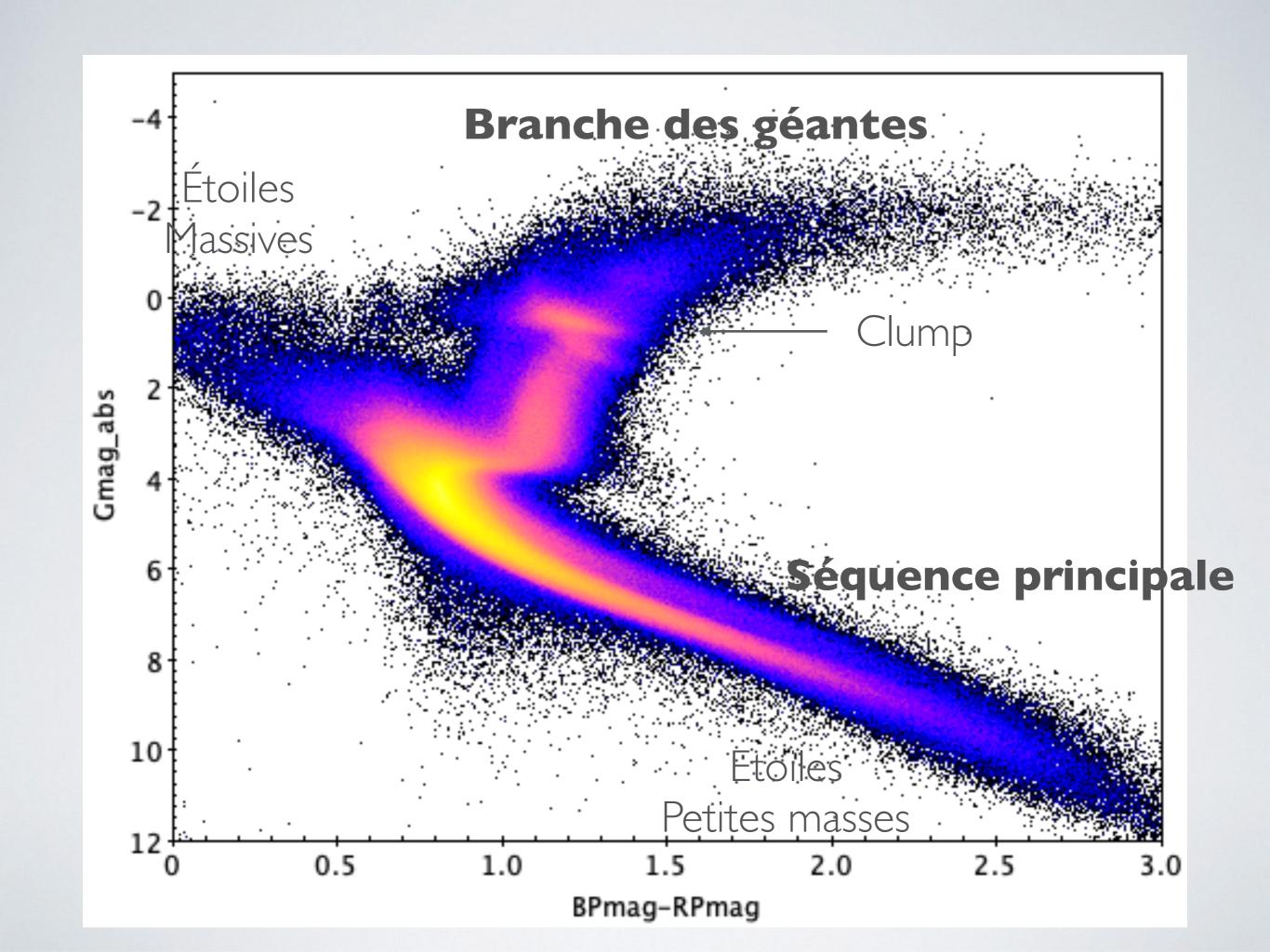






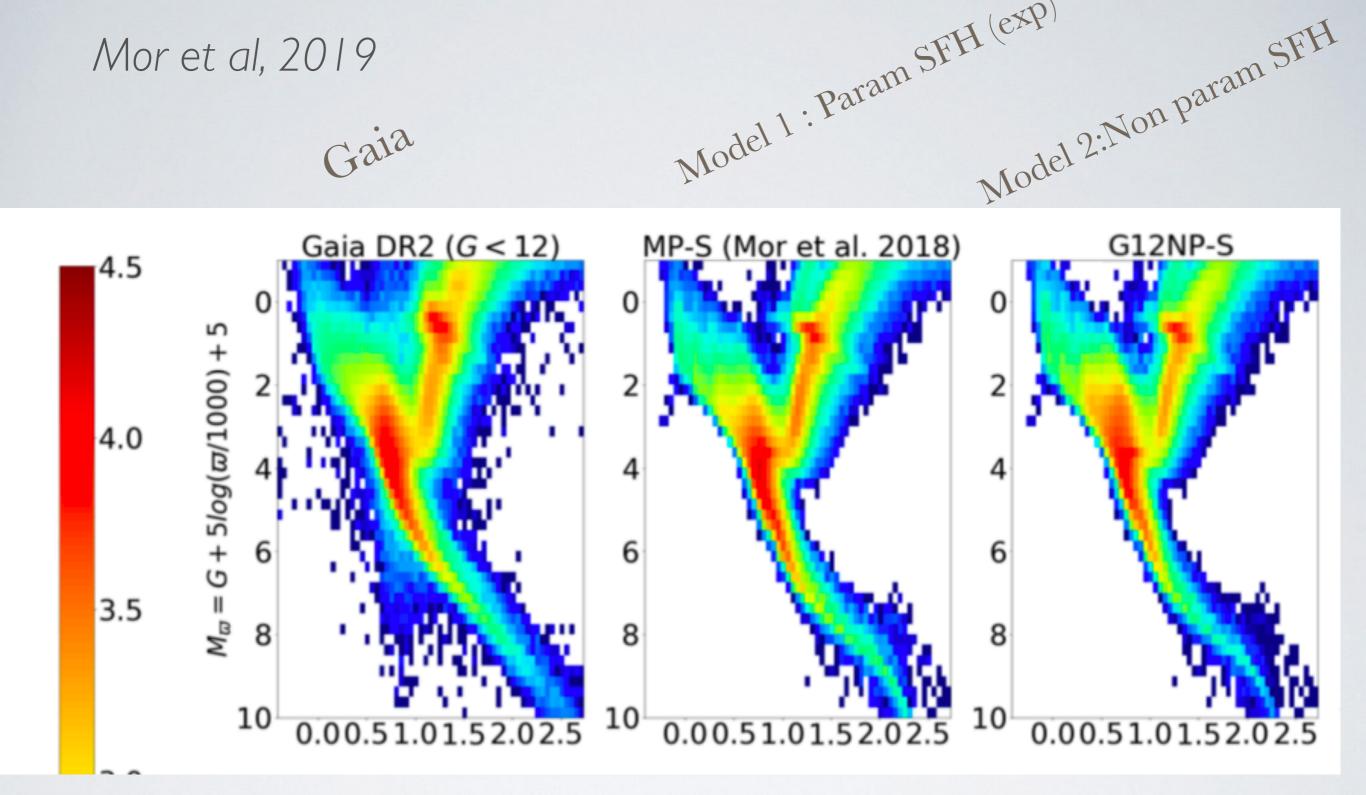






GAIA RESULTS

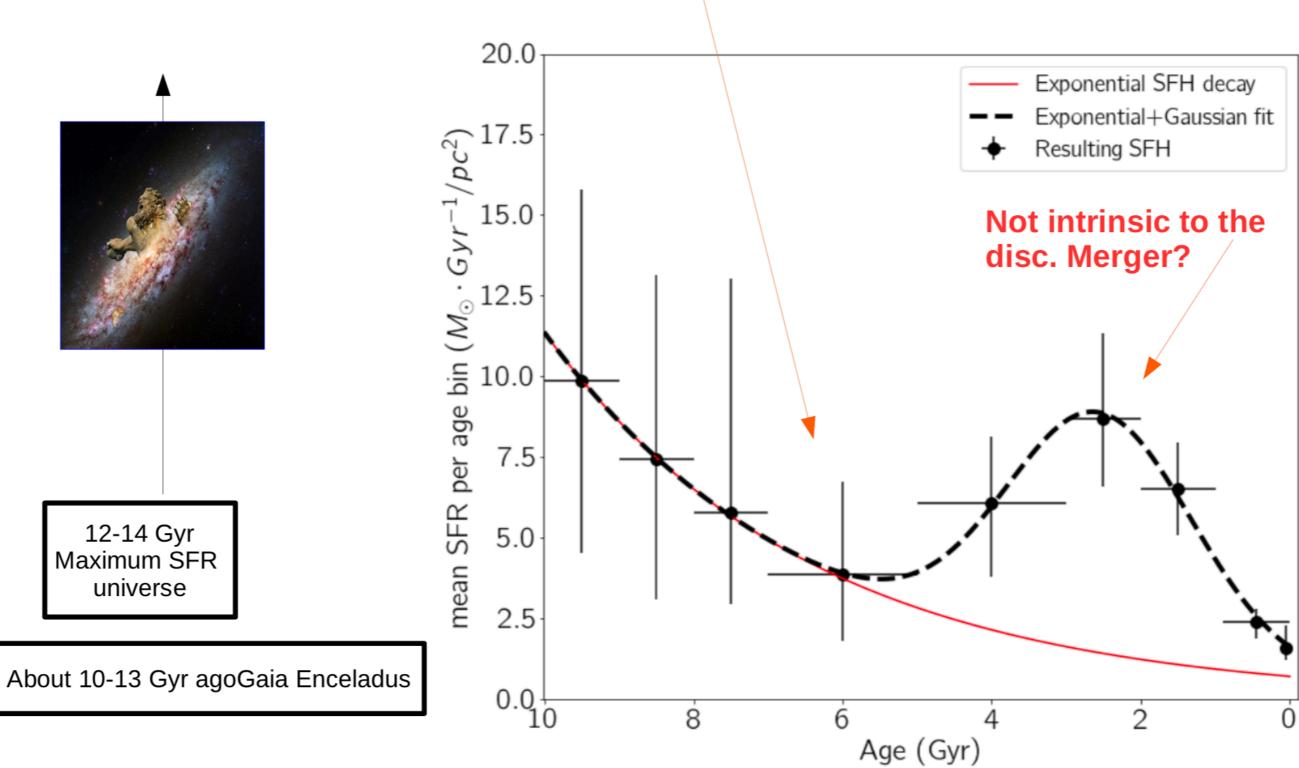
- Distances : densités stellaires
- Luminosités et températures des étoiles => stade évolutif / âge
- => évolution galactique, histoire de la formation stellaire, scénario de formation (et dynamique)



Ajustement d'un modèle (modèle de la galaxie de Besançon) pour reproduire la distribution observée

Hypothetical Scenario

Quenching: post merger. The bar formation could be also contributing



DYNAMIQUE DE LA VOIE LACTÉE

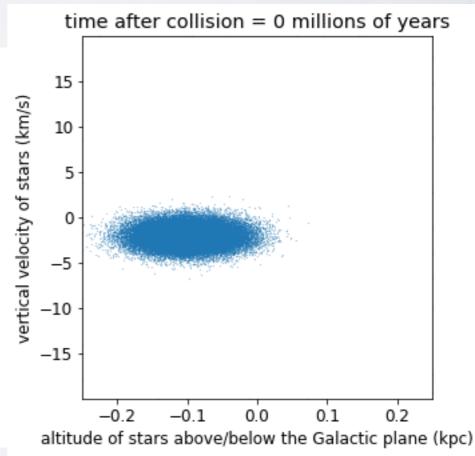
- Gaia observe: positions+vitesses
- Modèle de Galaxie =>
- · Calcul des orbites des étoiles, des amas
- Recherche de sous-structures, de traces d'évènements dynamiques passés

RELIQUES D'ÉVÈNEMENTS DYNAMIQUES

- Le disque n'est pas stationnaire
- Perturbation il y a moins de I Gyr
- Origine de la collision encore inconnue

Antoja et al (2019, Nature)





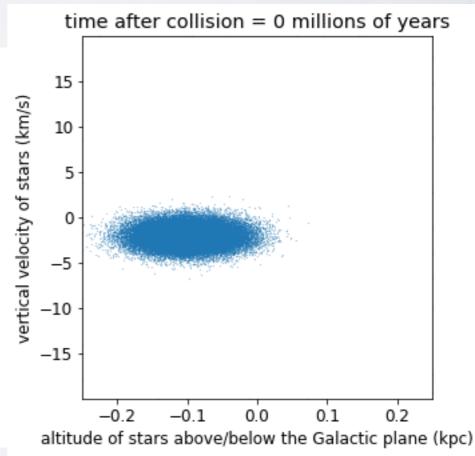
 V_{ϕ} (km s⁻¹)

RELIQUES D'ÉVÈNEMENTS DYNAMIQUES

- Le disque n'est pas stationnaire
- Perturbation il y a moins de I Gyr
- Origine de la collision encore inconnue

Antoja et al (2019, Nature)



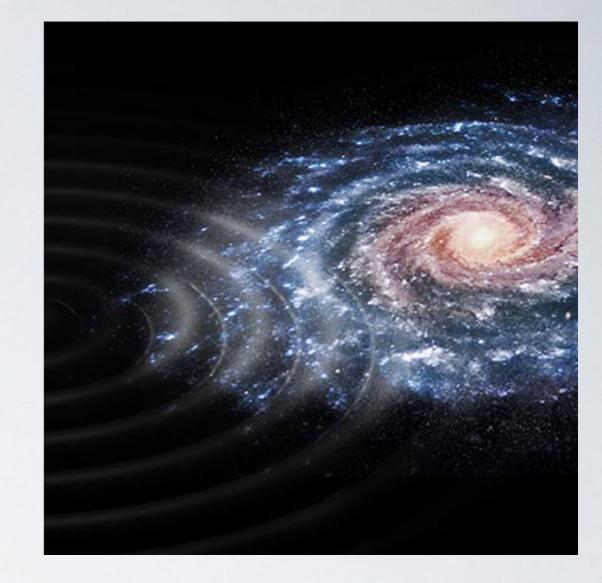


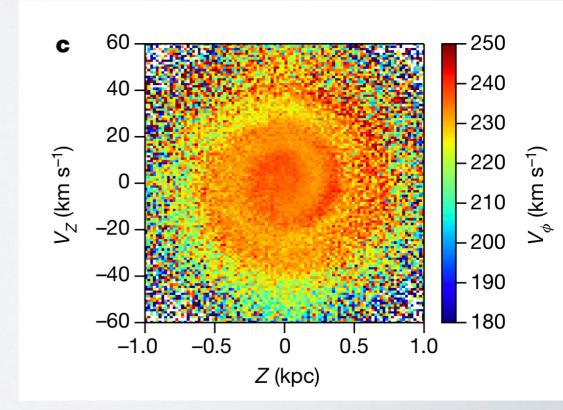
 V_{ϕ} (km s⁻¹)

RELIQUES D'ÉVÈNEMENTS DYNAMIQUES

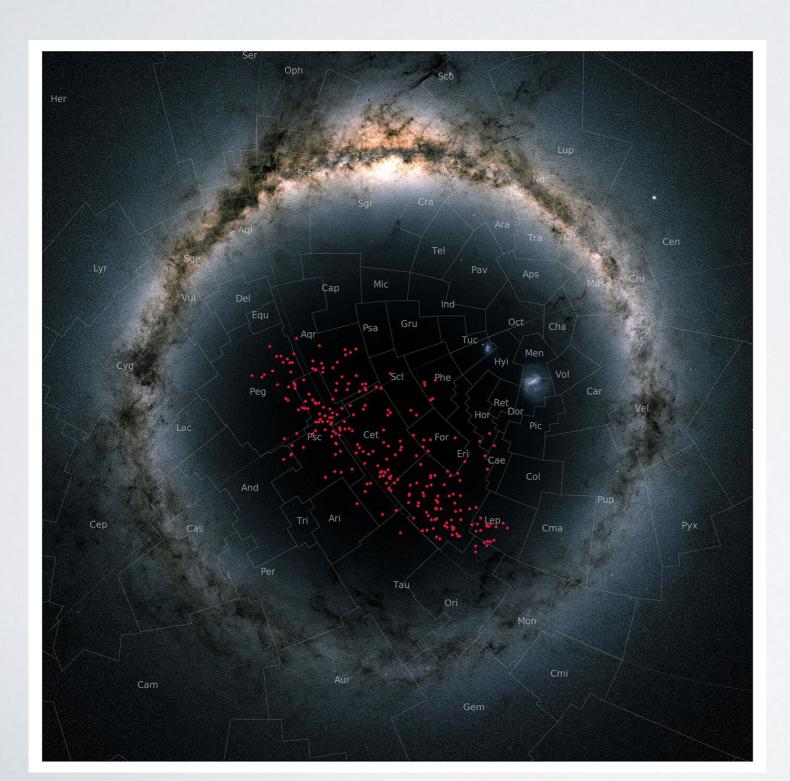
- Le disque n'est pas stationnaire
- Perturbation il y a moins de I Gyr
- Origine de la collision encore inconnue

Antoja et al (2019, Nature)





DÉCOUVERTE DE NOUVELLES STRUCTURES

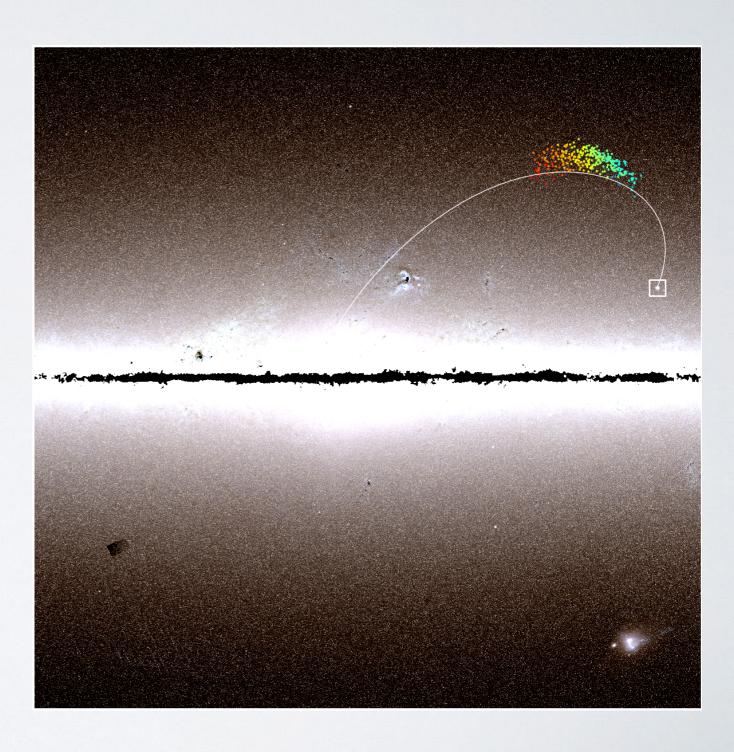


Un amas massif détruit par effet de marée de la Voie lactée, à ~100 pc, (Meingast et al, 2019)

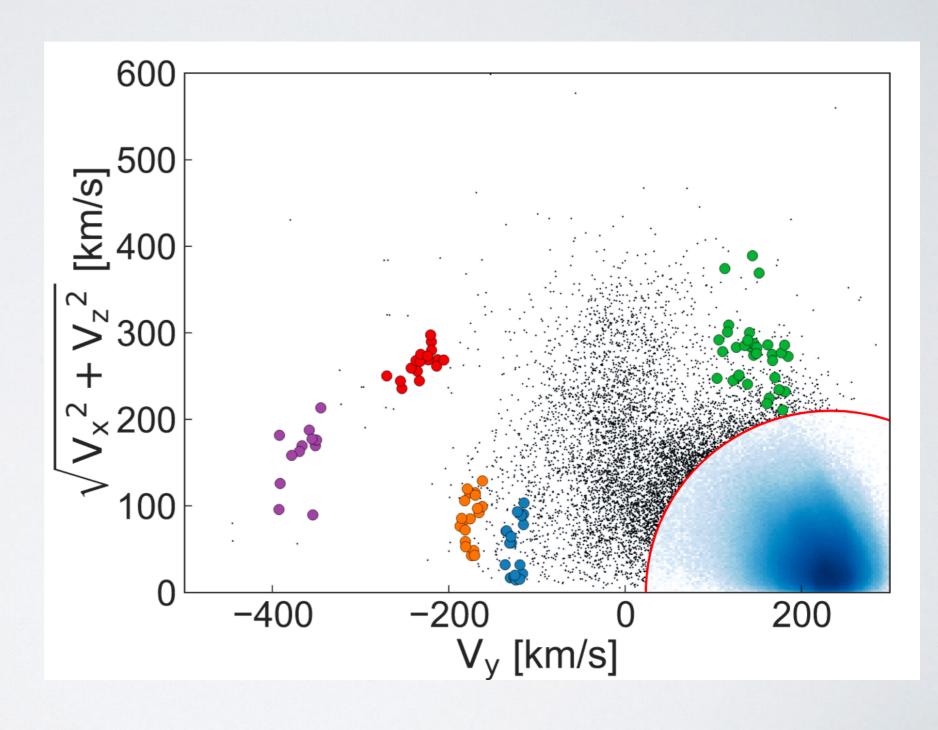


- Amas globulaire qui perd des étoiles le long de son orbite (Omega Cen)
- Ibata et al (2019, Nature)

OMEGA CEN

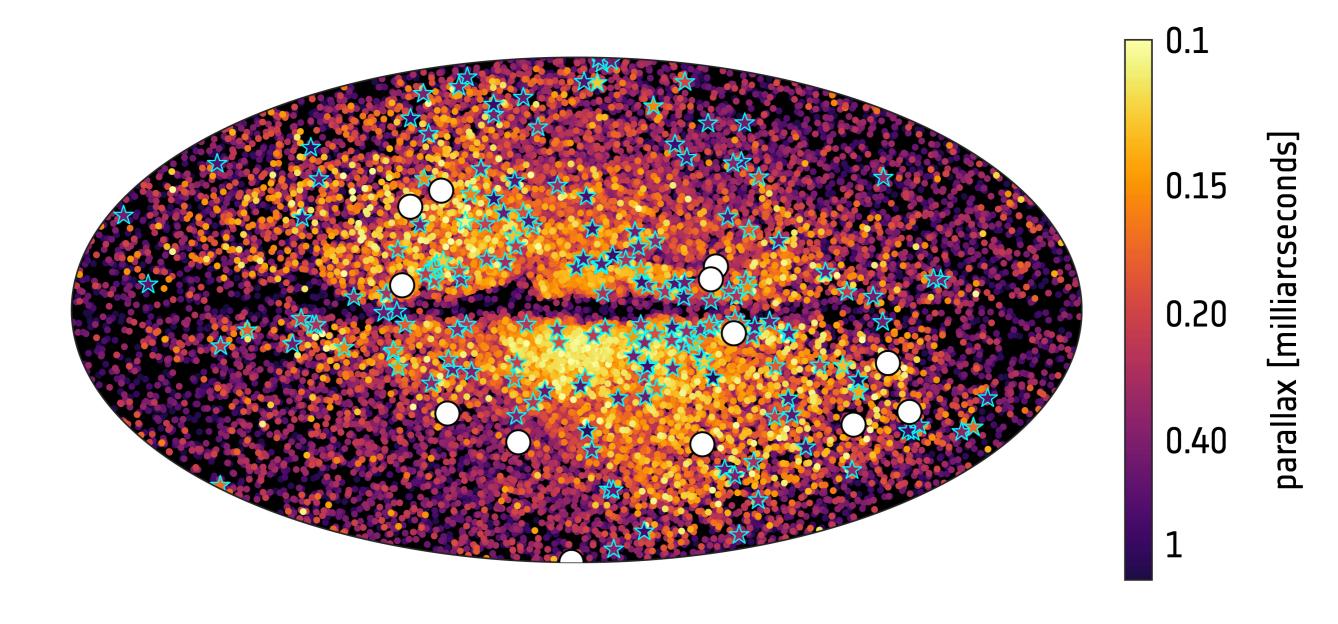


Nouveaux satellites et courants



• => contraintes sur la formation hiérarchique

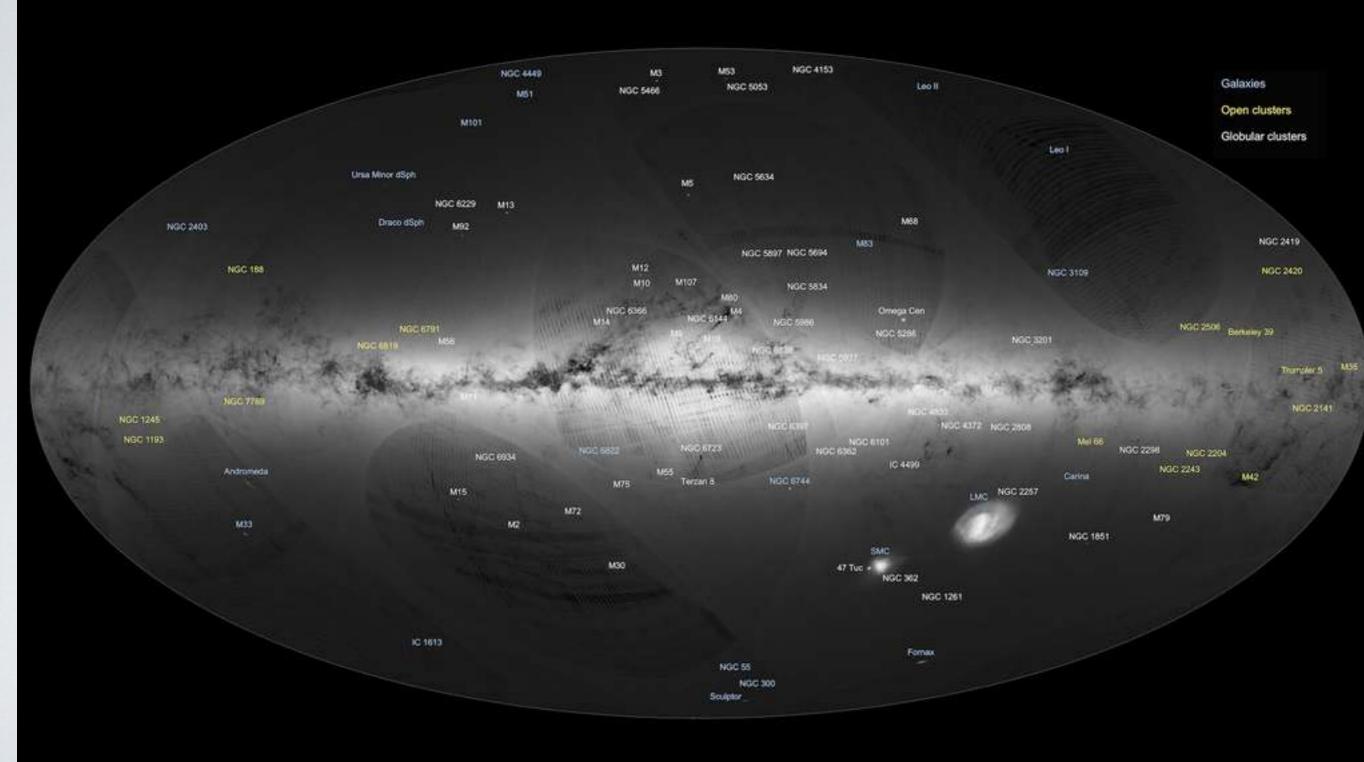
Un évènement majeur: la fusion d'une galaxie Gaia-Enceladus il y a environ 10 Gyr (Helmi et al, 2019, Nature)



Etoiles associées à Gaia-Enceladus, étoiles variables et amas globulaires



Peut-être que le halo de la Voie lactée est fait essentiellement de ces accrétions, pas de halo formé in-situ ?



Les Nuages de Magellan



· Hiérarchie des structures:

- Voie lactée
 - Nuages de Magellan, satellite de VL
 - Galaxies naines, satellites de VL ou de NM?
 - Gaia mouvements propres et Vitesses
 Doppler: satellites de satellites (Kallivayalil+ 2018)



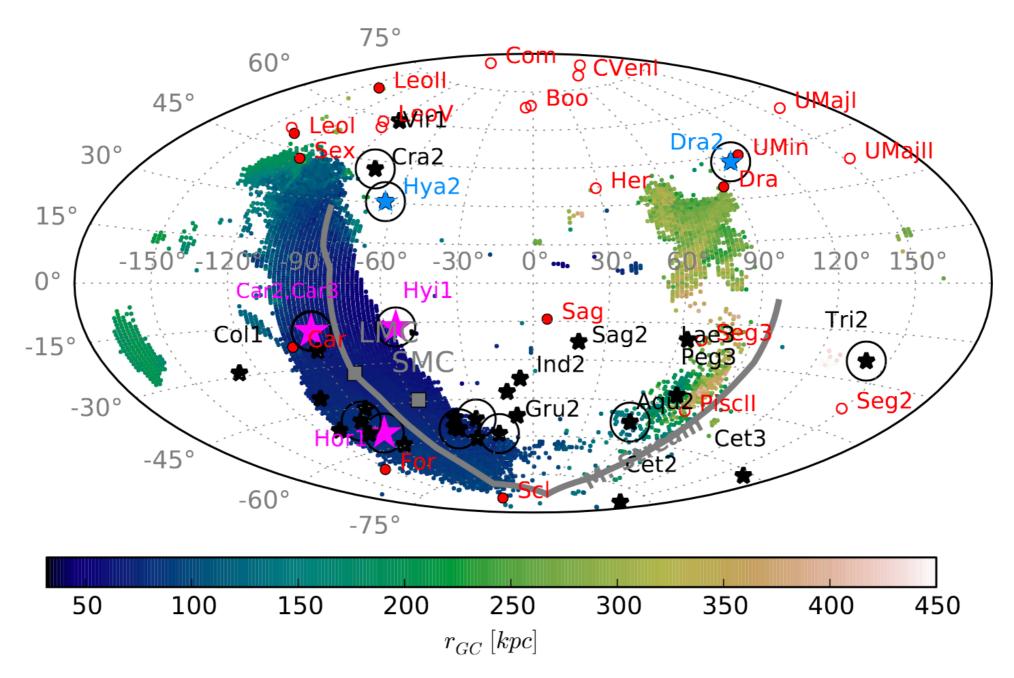
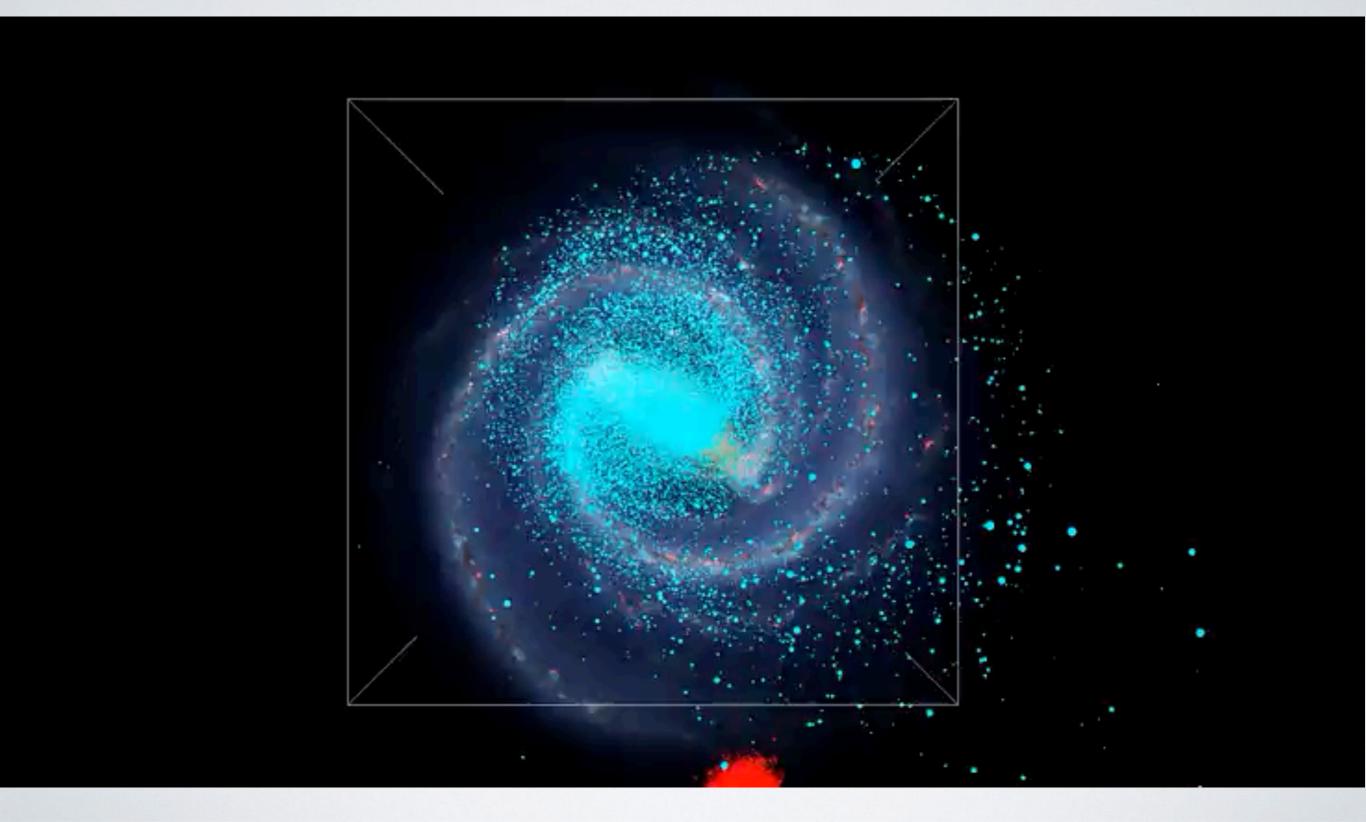


Figure 4. The location of debris associated with LMCa prior to infall (colored points), now that the LMC is just past first pericenter, and color-coded by Galactocentric distance. Particles previously associated to the LMCa at infall outline today a clear stream on the sky that follows roughly the location of the Magellanic Stream (thick gray line) and with a well defined distance gradient (color bar). Over-plotted are the previously known satellites of the MW (red circles) with the "classical" dwarfs shown as filled-in red circles. The newly discovered dwarfs that are the subject of this work are shown with black stars and encircled black stars for those with a successful proper motion measurement. Dwarfs with kinematics consistent with an LMC association are highlighted in magenta (Hyi1, Car2, Car3 and Hor1) and in light blue we show Hya2 and Dra2 which membership certainty deserves more analysis in the future. See text and Figs. 5 and 6 for more details.

Kallivayalil+ (2018)

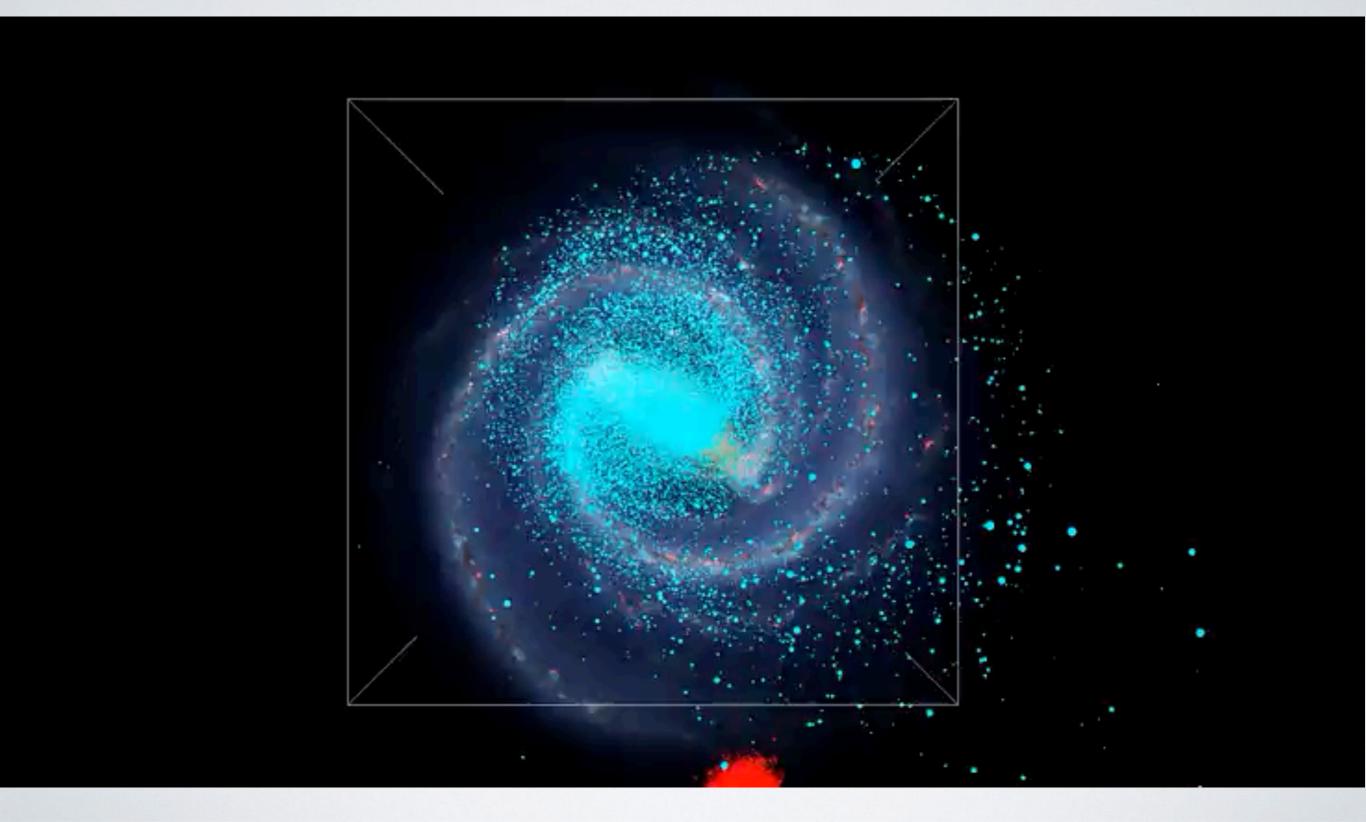
Simulation de l'interaction de la Voie lactée avec une galaxie satellite

Copyright Koppelman, Villalobos & Helmi, Kapteyn Astronomical Institute, University of Groningen, The Netherlands



Simulation de l'interaction de la Voie lactée avec une galaxie satellite

Copyright Koppelman, Villalobos & Helmi, Kapteyn Astronomical Institute, University of Groningen, The Netherlands



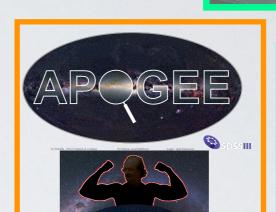
RELEVÉS SPECTROSCOPIQUES

- · Gaia spectroscopie : limitée aux étoiles brillantes
- Bonne référence, mais besoin d'explorer plus profonds, à d'autres longueurs d'onde
- Relevés spectro au sol : Visible / infrarouge proche, télescope 4m/8m
- · Ciblés sur des régions particulières, échantillonnage

Grand relevés

Propriétés de surface des étoiles

- T_{eff}, logg
- Composition chimique



LAMOST 與原新望護鏡

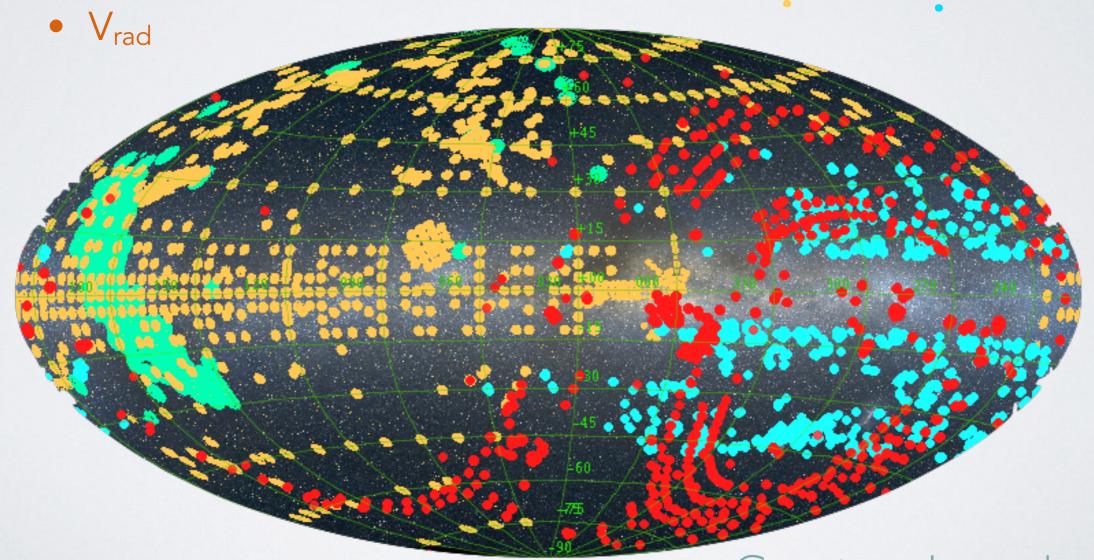






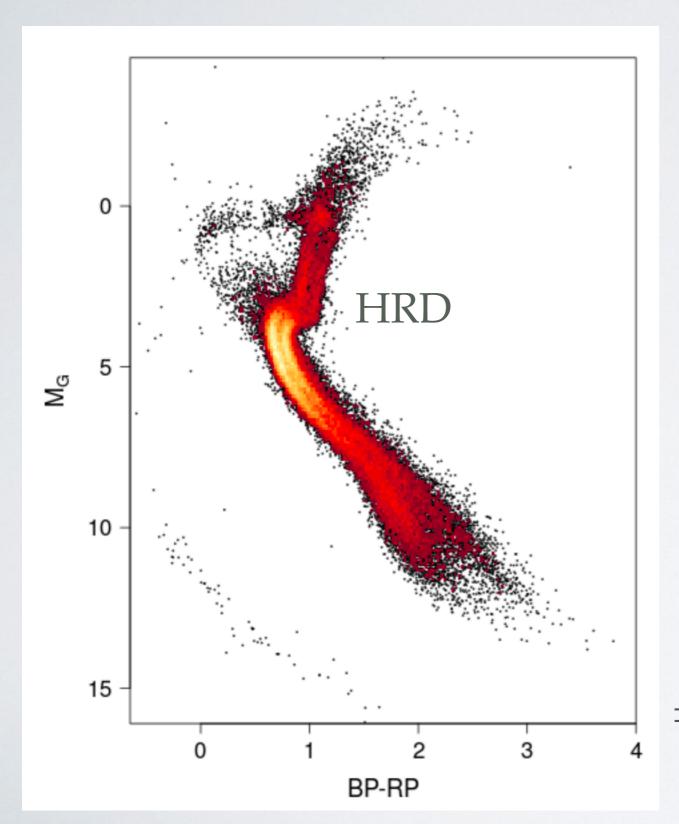


GaiaESO



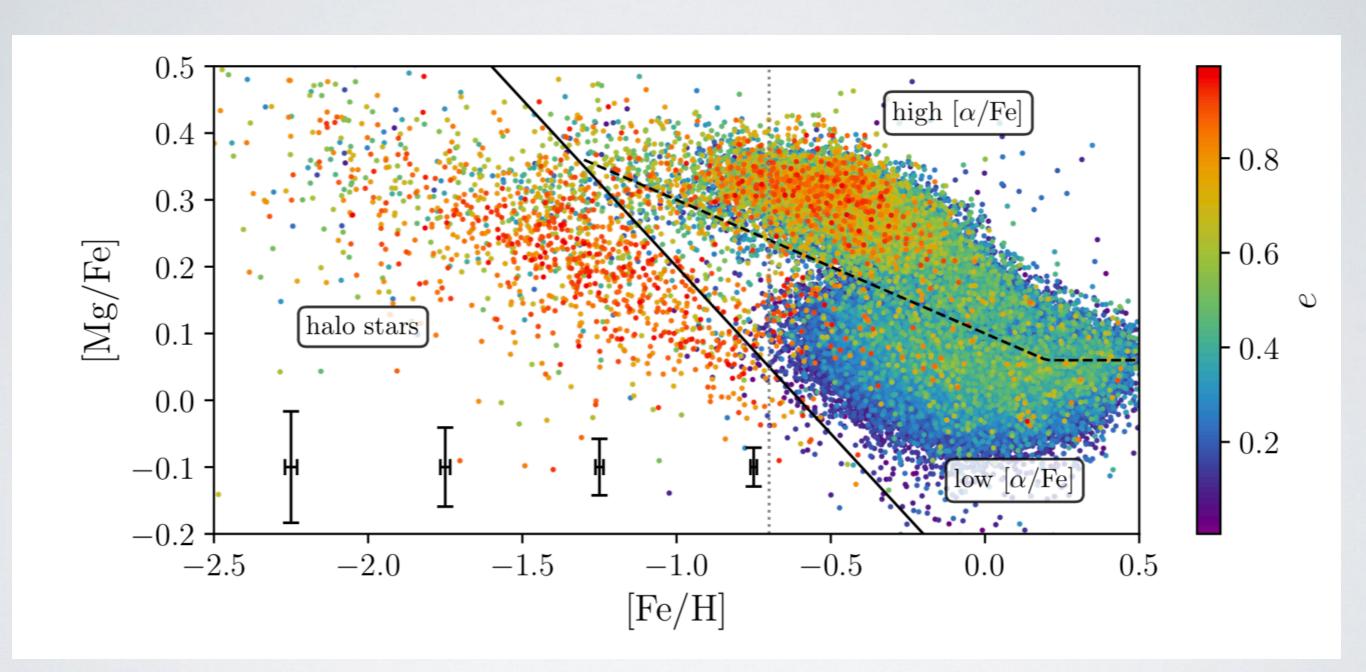
Courtesy: Lagarde, 2019

MERGERS ET ORIGINE DU HALO



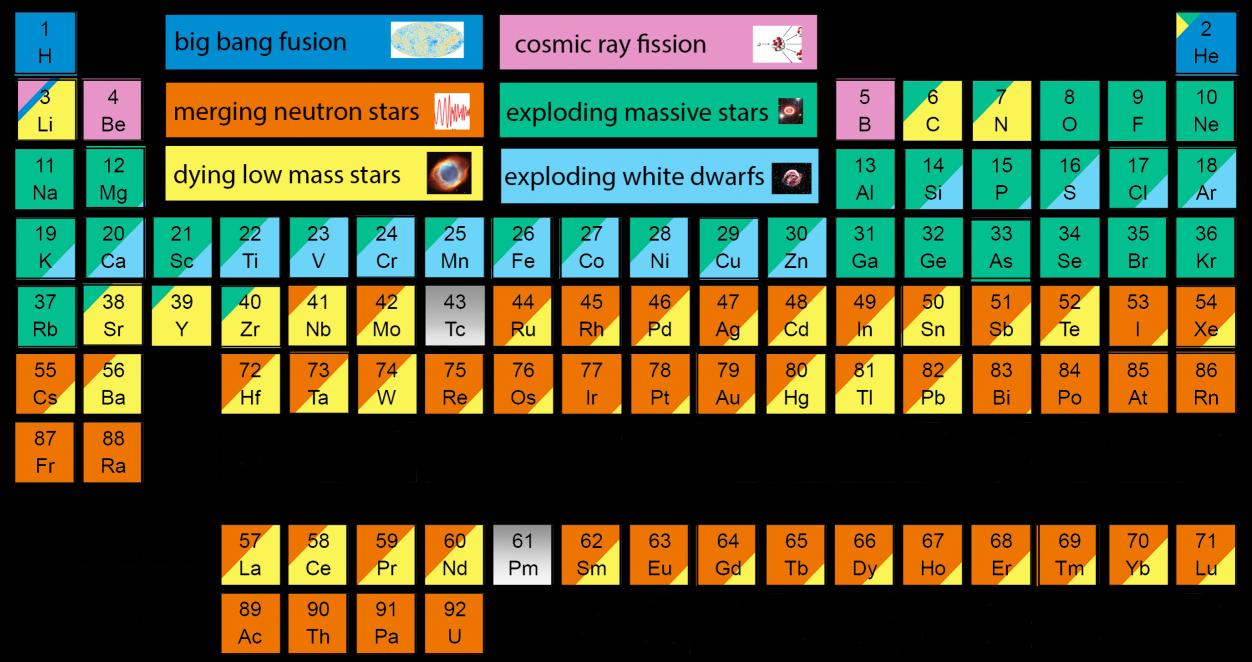
- Structure du halo:
 Analyse du diagramme HR
- Sélection en vitesses :
 les étoiles qui ne
 tournent pas comme le
 disque
- => 2 populations d'âge/métallicité différents
- Gaia coll. Babusiaux+ 2018, Haywood+ 2018, Mackereth+2018

MERGERS ET ORIGINE DU HALO



Combinaison: vitesses, HRD, orbites, composition chimique => Gaia-Enceladus (Helmi+2018)

The Origin of the Solar System Elements



Astronomical Image Credits: ESA/NASA/AASNova

Conclusions

- Scénario de formation de la Galaxie plus complexe, avec fusions hiérarchiques
- · Voie lactée en accord avec le modèle cosmologique
- N'est pas stationnaire, ni axisymmétrique, traces de perturbations récentes du disque
- · Grâce à la complémentarité des données
 - astrométriques, photométriques et

Conclusions

- Scénario de formation de la Galaxie plus complexe, avec fusions hiérarchiques
- · Voie lactée en accord avec le modèle cosmologique
- N'est pas stationnaire, ni axisymmétrique, traces de perturbations récentes du disque
- Grâce à la complémentarité des données astrométriques, photométriques et

- Encore de nombreuses analyses en cours sur la DR2 de Gaia
- Futurs catalogues Gaia : DR3 mi 2020, 2021, meilleures précisions, abondances chimiques, etc.
- Les **relevés spectroscopiques** en projets (WEAVE, MOONS, 4MOST) : la 6ème dimension, + âges et composition chimique
- Pour aller plus loin : LSST, Euclid, ELT plus profonds de plusieurs magnitudes, extragalactiques, galaxies résolues en étoiles, étoiles de très petites masses et naines brunes de la Voie lactée, etc...

- Encore de nombreuses analyses en cours sur la DR2 de Gaia
- Futurs catalogues Gaia : DR3 mi 2020, 2021, meilleures précisions, abondances chimiques, etc.
- Les **relevés spectroscopiques** en projets (WEAVE, MOONS, 4MOST) : la 6ème dimension, + âges et composition chimique
- Pour aller plus loin : LSST, Euclid, ELT plus profonds de plusieurs magnitudes, extragalactiques, galaxies résolues en étoiles, étoiles de très petites masses et naines brunes de la Voie lactée



- Encore de nombreuses analyses en cours sur la DR2 de Gaia
- Futurs catalogues Gaia : DR3 mi 2020, 2021, meilleures précisions, abondances chimiques, etc.
- Les **relevés spectroscopiques** en projets (WEAVE, MOONS, 4MOST) : la 6ème dimension, + âges et composition chimique
- Pour aller plus loin : LSST, Euclid, ELT plus profonds de plusieurs magnitudes, extragalactiques, galaxies résolues en étoiles, étoiles de très petites masses et naines brunes de la Voie lactée





- Encore de nombreuses analyses en cours sur la DR2 de Gaia
- Futurs catalogues Gaia : DR3 mi 2020, 2021, meilleures précisions, abondances chimiques, etc.
- Les **relevés spectroscopiques** en projets (WEAVE, MOONS, 4MOST) : la 6ème dimension, + âges et composition chimique
- Pour aller plus loin : LSST, Euclid, ELT plus profonds de plusieurs magnitudes, extragalactiques, galaxies résolues en étoiles, étoiles de très petites masses et naines brunes de la Voie lactée

Merci de votre attention