



Plus d'un milliard trois cent millions d'objets dont on connaît désormais la position, la parallaxe trigonométrique (donc la distance), le mouvement sur le ciel (le mouvement propre), l'éclat et la couleur avec une précision sans précédent.

LE NOUVEAU CATALOGUE GAIA UNE RÉVOLUTION!

Cela représente environ 1% des étoiles de notre Galaxie, la Voie lactée, ce qui peut paraître peu, mais elles couvrent toutes les populations qui la composent. Et il y a aussi de nombreuses étoiles des galaxies voisines : les Nuages de Magellan, Andromède et les galaxies naines du Groupe local, et encore un demi-million de quasars et 14 000 astéroïdes. Et pour 400 millions d'étoiles supplémentaires, les positions et magnitudes sont aussi précisément connues. Enfin, pour la première fois, sont disponibles des vi-

tesses radiales, les vitesses des objets le long de la ligne de visée, pour plus de sept millions d'étoiles, ainsi que des courbes de lumière pour plus de 500 000 étoiles variables.

Gaia a été conçu pour cartographier plus d'un milliard d'étoiles dans notre Galaxie et au-delà et obtenir des positions, parallaxes et mouvements propres à un niveau de précision sans précédent, bien au-dessous d'une milliseconde de degré. Les précisions ultimes ne peuvent être atteintes qu'après un traitement informatique complexe uti-

Cette illustration ressemble à une photo ... et pourtant ce n'en est pas une ! C'est une carte du ciel tracée à partir des positions, éclats et couleurs des 1,3 milliard d'étoiles observées par *Gaia* entre juillet 2014 et mai 2016 et publiés dans Gaia DR2. On y distingue clairement le plan de notre Galaxie, la Voie lactée, très riche en étoiles, mais aussi en poussières qui obscurcissent la lumière provenant d'étoiles en arrière-plan. On y voit aussi, en bas à droite, les deux taches laiteuses que forment l'ensemble des étoiles observées par *Gaia* dans les Grand et Petit Nuages de Magellan. Si on zoome sur n'importe quelle partie de la carte, on voit la multitude de points qui la compose, même dans les zones très peu denses en étoiles. Sur l'écran, la précision de localisation de chaque étoile est de un Ångström. Voir la figure à très haute résolution (58,15 Mo) disponible sur le site de l'Esa (www.esa.int/spaceinimages/Images/2018/04/Gaia_s_sky_in_colour2) ou sur l'outil de visualisation accessible sur le site de l'Esa à (<https://gea.esac.esa.int/archive/visualization/>) (©ESA/Gaia/DPAC).



lisant l'ensemble des observations qui seront effectuées par *Gaia*. C'est pour cette raison que les résultats définitifs de la mission nominale (5 années) ne seront pas disponibles avant les années 2022. Cependant, un certain nombre de catalogues intermédiaires (Gaia Data Release n°x= Gaia DRx) ont été prévus, s'appuyant sur un nombre de plus en plus grand d'observations, couvrant des périodes de plus en plus longues, donnant de plus en plus d'informations de plus en plus précises. Une autre des spécificités uniques de *Gaia* est d'être équipé de trois instruments, astrométrique, spectro-photométrique et spectroscopique, qui font des mesures quasi simultanées. Ceci apporte, en parallèle aux données de po-

sition en 3D ainsi que de mouvement, aussi en 3D, une description physique de chaque étoile mesurée.

GAIA DR2

Le deuxième catalogue *Gaia*, *Gaia-DR2*, a été publié le 25 avril 2018. Il est basé sur les observations obtenues pendant les 22 premiers mois (668 jours) de la phase opérationnelle de *Gaia*, du 25 juillet 2014 au 23 mai 2016. On peut rappeler, pour comparaison, que le premier catalogue *Gaia*, *Gaia DR1*, publié le 14 septembre 2016, ne reposait que sur les 14 premiers mois de données. Les nombres d'objets publiés dans *Gaia DR2* sont donnés page suivante : des nombres que l'on ne peut qualifier que d'astronomiques !

	Nb de sources (<i>Gaia</i> DR2)	Nb de sources (<i>Gaia</i> DR1)
Sources avec positions et magnitudes	1 692 919 135	1 142 679 769
Sources avec parallaxes et mouvements propres	1 331 909 727	2 057 050
Sources avec la couleur rouge, G_{RP}	1 383 551 713	-
Sources avec la couleur bleue, G_{BP}	1 381 964 755	-
Sources avec vitesse radiale	7 224 631	-
Courbes de lumière de sources variables	550 737	3 194
Objets du Système solaire	14 099	-
Sources avec température de surface	161 497 595	-
Sources avec une mesure de l'extinction sur la ligne de visée	87 733 672	-
Sources avec rayon et luminosité	76 956 778	-

Le premier catalogue, *Gaia* DR1, comprenait les positions sur le ciel d'un milliard d'étoiles ainsi que des parallaxes trigonométriques et des mouvements propres pour un petit (!) sous-ensemble de 2 millions d'étoiles brillantes. Il a déjà suscité un vif intérêt au sein de la communauté astronomique mondiale et a donné lieu à des centaines de publications scientifiques¹.

Gaia DR2 marque une étape majeure, attendue avec impatience par les astronomes du monde entier, car il représente un saut en quantité et en qualité par rapport à *Gaia* DR1, avec des étoiles partout dans la Galaxie, bulbe, disque et halo, amas ouverts, amas globulaires, et dans toutes les populations stellaires, ainsi que dans les galaxies les plus proches, et des précisions inégalées sur tous les paramètres mesurés : incertitudes sur les parallaxes variant de 0,04 milliseconde de degré (mas) pour les sources plus brillantes que la magnitude $G = 15$, à environ 0,7 mas pour $G = 20$, incertitudes sur les magnitudes G , G_{BP} et G_{RP} allant de 1 à quelques millimagnitudes pour les étoiles plus brillantes que $G = 13$ à environ 200 millimagnitudes pour les étoiles de $G = 20$. De plus, pour la première fois, des données du spectrographe RVS (*Radial Velocity Spectrometer*) sont publiées : les vitesses radiales de plus de 7 millions d'étoiles entre les magnitudes $G = 4$ et 13 (le plus grand catalogue de mesures au sol compte 500 000 étoiles) avec une précision variant de 200-300 m/s à environ 2,5 km/s selon la magnitude et le type spectral des étoiles. Pour la première fois

aussi, des positions en fonction du temps sont publiées pour plus de 14 000 astéroïdes déjà connus.

QUATRE EXEMPLES D'APPLICATIONS

En un mois, une centaine d'articles utilisent déjà les données de *Gaia* DR2, essentiellement dans le domaine de l'astrophysique. En particulier, plusieurs articles écrits par des membres du Consortium DPAC (*Data Processing and Analysis Consortium*) décrivent le catalogue, le traitement des données et leur validation scientifique (voir <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr2-papers>). Ici, nous ne prendrons que quatre exemples : le diagramme de Hertzsprung-Russell (diagramme HR) et un tout petit aperçu de tous les détails que les données de *Gaia* permettent de mettre en évidence ; la cinématique galactique, qui montre que notre Galaxie ne se comporte pas comme une galaxie axisymétrique à l'équilibre ; l'étude des étoiles variables, dont les variations de position dans le diagramme HR sont remarquablement bien illustrées; et le Grand Nuage de Magellan, dont on voit déjà très nettement non seulement la structure, mais aussi la rotation.

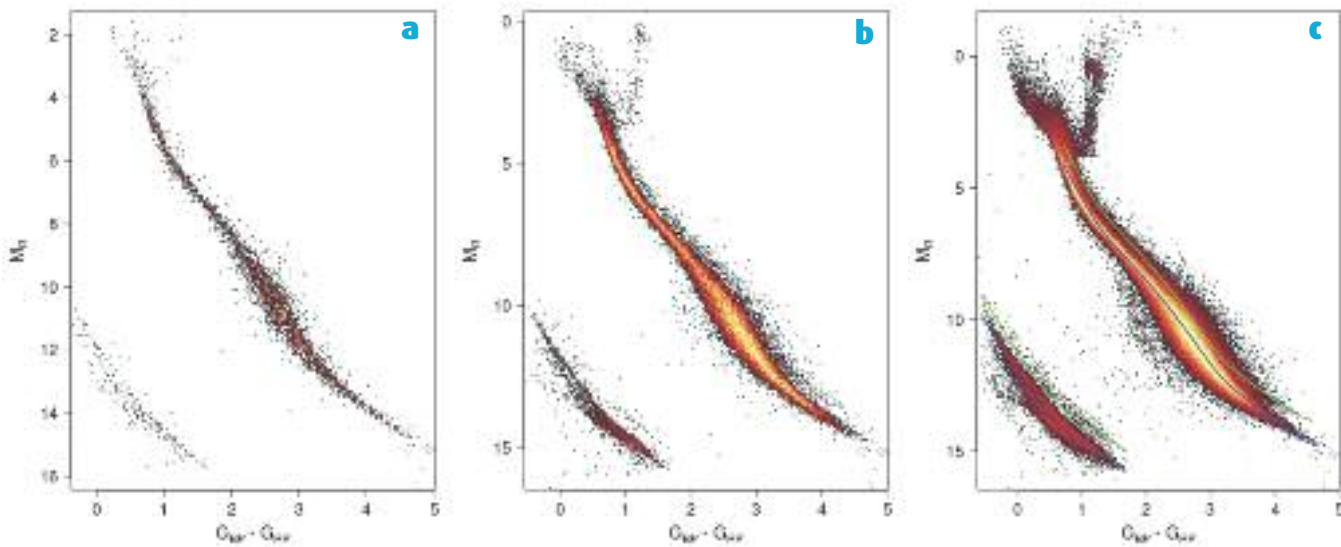
En un mois, une centaine d'articles [scientifiques] utilisent déjà les données de *Gaia* DR2.

Le diagramme de Hertzsprung-Russell

Le diagramme HR est très utilisé en astronomie car il reflète de nombreux paramètres décrivant les étoiles. En effet, leur position dans ce diagramme magnitude absolue (éclat intrinsèque) – couleur (donc température) dépend non seulement de leur masse et de leur âge, mais aussi de la population à laquelle elles appartiennent, du contenu en éléments lourds de leur atmosphère, de leur appartenance à un système binaire, etc. La quantité, la très haute précision et l'homogénéité des données de ce deuxième catalogue *Gaia* permettent de distinguer un luxe de détails jamais vus auparavant. Les figures 1a, 1b, et 1c montrent les diagrammes obtenus pour les étoiles avec une très bonne précision sur les mesures de distances (incertitude relative sur les parallaxes trigonométriques inférieure à 10 %) et de magnitudes (étoiles situées dans des zones à faible extinction interstellaire) situées à moins de 25 pc, 50 pc et 100 pc. Sur les figures 1a et 1b on remarquera la finesse de la séquence principale pour les étoiles de type spectral F, G et K ($G_{BP} - G_{RP}$ entre 1 et 2), s'élargissant ensuite vers les étoiles de type M ($G_{BP} - G_{RP}$ entre 2 et 3) pour redevenir plus fine ensuite vers les naines brunes. Plus on s'éloigne et plus on couvre des types d'étoiles un peu moins fréquents : ● de plus en plus d'étoiles géantes, jusqu'à mettre clairement en évidence les grumeaux des géantes rouges en haut à droite du diagramme de la figure 1c ; ● de plus en plus de naines blanches, avec la séparation entre naines blanches à hydrogène et naines blanches à hélium visible pour la première fois sur un diagramme HR ; ● la séquence des étoiles binaires non résolues qui se peuple de plus en plus (soulignée par la ligne verte sur la fig. 1c).

La précision et la quantité de données obtenues par *Gaia* permettent de faire de fins découpages, par population d'étoiles, par type d'amas (ouvert ou globulaire), par intervalle de vitesse, etc. : dans *Gaia* DR2, il y a près de 4,3 millions d'étoiles avec des erreurs sur la parallaxe plus faibles que 10 %, une photométrie précise et une faible extinction sur leur ligne de visée, contre 30 579 étoiles avec une précision relative sur la parallaxe meilleure que 10 % dans *Hipparcos*, et moins de 1 000 avant l'ère de l'astrométrie spatiale.

¹ (voir http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-abs_connect?library&libname=Gaia&libid=554cb27c57 et quelques exemples illustrés sur <http://gaia.obspm.fr/la-mission/les-observations/article/en-attendant-gaia-dr2-quelques-resultats-de-dr1>).



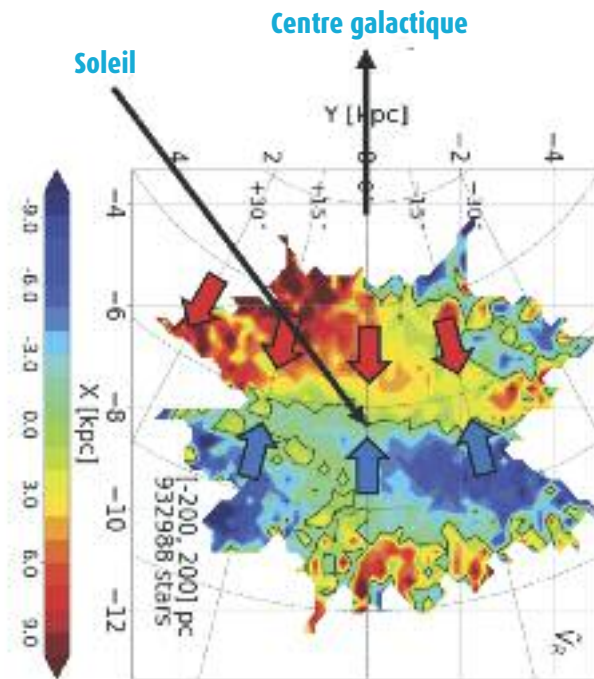
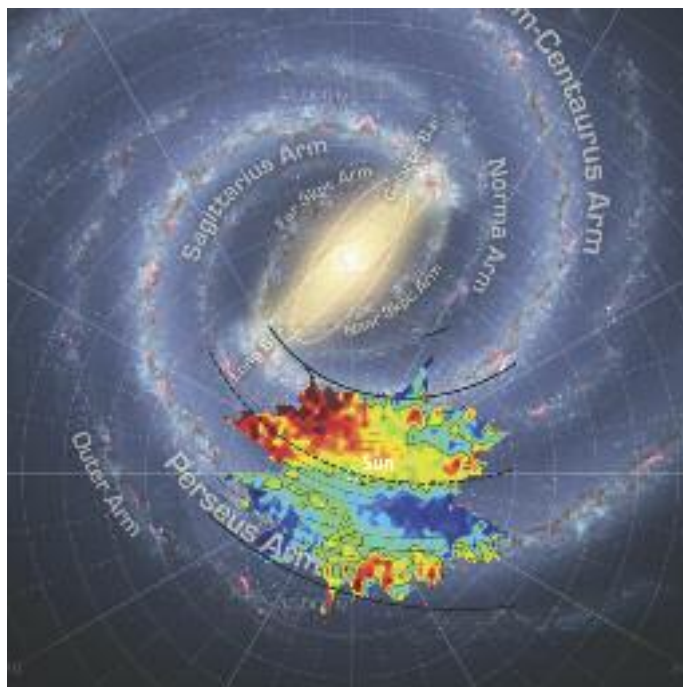
1. Diagrammes HR construits avec les données astrométriques et photométriques les plus précises de *Gaia DR2* pour les étoiles plus proches que 25 pc (3 724 étoiles), 50 pc (26 683 étoiles) et 100 pc (212 728 étoiles). (Gaia/Esa/DPAC/Gaia Collaboration, C. Babusiaux et al., *A&A* 2018)

La cinématique galactique

Grâce aux mesures de vitesses radiales, combinées aux distances et aux mouvements propres, les vitesses spatiales (vitesses des étoiles dans la Galaxie) de 7224631 étoiles peuvent être calculées.

Elles permettent de tracer une cartographie inédite des mouvements des étoiles dans un rayon d'environ 5 000 pc (16 000 années-lumière) autour du Soleil. La figure 2 montre que le disque de notre Galaxie n'est pas à l'équilibre : dans la zone cartographiée, en plus du mouvement

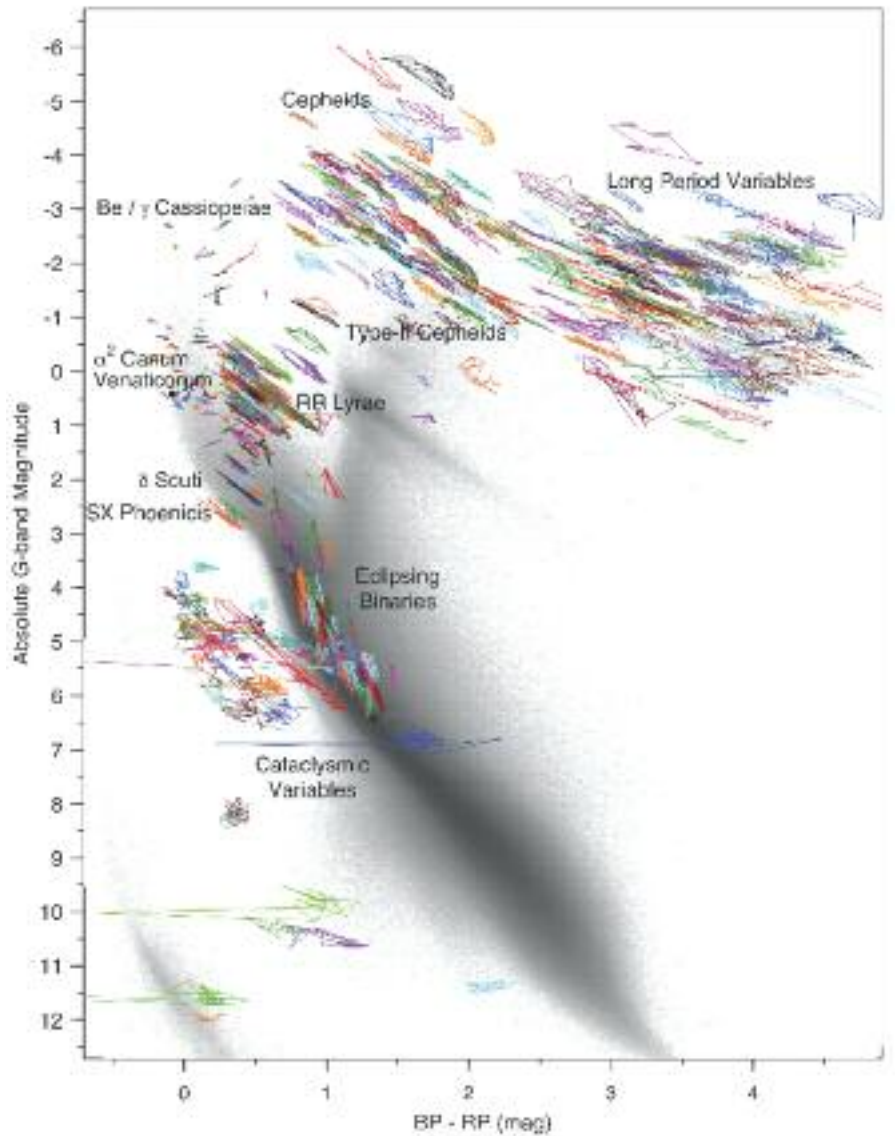
global de révolution autour du centre galactique, les étoiles plus proches que le Soleil du centre galactique que le Soleil se déplacent vers l'extérieur de la Galaxie, les étoiles plus lointaines se déplacent vers l'intérieur.



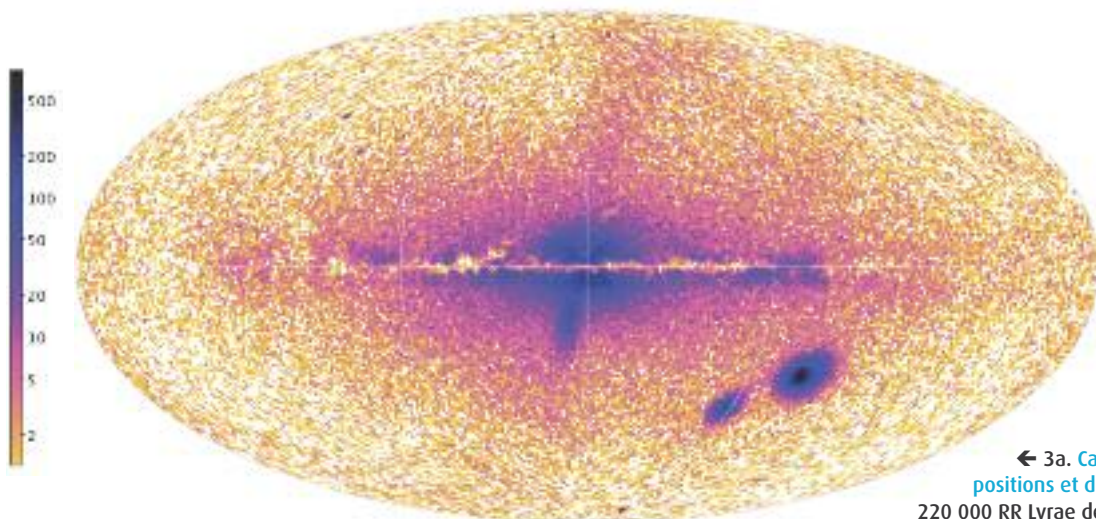
2. Cartographie des mouvements radiaux dans le disque galactique. À gauche, les mesures de *Gaia* sont superposées au tracé supposé des bras. À droite les flèches rouges indiquent des mouvements vers l'extérieur du disque galactique, les flèches bleues, des mouvements vers l'intérieur du disque. (Gaia/Esa/DPAC/Gaia Collaboration, D. Katz et al., *A&A* 2018)

Les étoiles variables

Les étoiles variables sont des outils essentiels en astrophysique, en particulier dans deux domaines : la détermination de l'échelle des distances et l'évolution stellaire. Dans *Gaia DR2*, les courbes de lumière de 500 000 étoiles variables (Céphéides, RR Lyrae, Mira et semi-régulières et bien d'autres) sont publiées, contre environ 3 200 dans *Gaia DR1*. La figure 3a montre l'ensemble des 220 000 RR Lyrae publiées dans *Gaia DR2* : elles sont essentiellement localisées dans le disque de notre Galaxie, dans les amas globulaires, dans les Nuages de Magellan et dans la galaxie du Sagittaire. Elles dessinent remarquablement bien la position et l'étendue de cette galaxie, qui est entrée en collision avec la nôtre. La calibration de leur magnitude absolue et de ses variations avec leur couleur et d'autres paramètres astrophysiques à l'aide des parallaxes trigonométriques très précises des RR Lyrae les plus proches permettra une description en 3D et en mouvement de cette galaxie et des Nuages de Magellan. La figure 3b illustre les variations en magnitude absolue G et en couleur G_{BP} et G_{RP} d'une sélection des différents types de variables observés par *Gaia*. Elles sont superposées au diagramme HR des étoiles de *Gaia DR2* avec 20 % de précision relative sur la parallaxe trigonométrique. Ces variations dans le diagramme magnitude absolue-couleur permettront d'obtenir une bien meilleure classification des étoiles variables et de nombreuses études sur l'évolution stellaire.



↑ 3b. Variation des positions des différents types d'étoiles variables observés par *Gaia* dans le diagramme HR magnitude absolue G -couleur G_{BP} et G_{RP} superposées aux étoiles de *Gaia DR2* avec 20 % de précision relative sur la parallaxe trigonométrique (Gaia/EsA/DPAC/Gaia Collaboration, L. Eyer et al., A&A 2018)



← 3a. Carte tracée à partir des positions et distances des plus de 220 000 RR Lyrae de *Gaia DR2* (RR Lyrae connues et nouvellement découvertes par l'analyse des données *Gaia*, en coordonnées galactiques) (Gaia/EsA/DPAC/Gaia Collaboration, G. Clementini et al., A&A 2018).



4. Le Grand Nuage de Magellan. (EN HAUT) Illustration combinant la densité des étoiles observée par *Gaia* dans chaque pixel avec les mouvements propres mesurés pour plusieurs millions d'étoiles du Grand Nuage. (EN BAS) Illustration reconstituée à partir du flux reçu par *Gaia* par pixel, combiné au flux reçu à travers les différents filtres pour obtenir la couleur. (Gaia/EsA/DPAC/A. Moitinho *et al.*) http://www.esa.int/spaceimages/Images/2018/04/Rotation_of_the_Large_Magellanic_Cloud2

Le Grand Nuage de Magellan

Le Grand Nuage de Magellan (LMC, pour Large Magellanic Cloud) est situé à environ 50 kpc. Il fait partie, comme notre Galaxie, du Groupe local, ensemble d'une soixantaine de galaxies qui comprend aussi le Petit Nuage de Magellan, la belle galaxie d'Andromède et de nombreuses galaxies naines sphéroïdales. Grâce à sa faible magnitude limite ($G = 21$) et à sa précision astrométrique unique, *Gaia* a pu observer et mesurer de très nombreuses étoiles dans les galaxies du Groupe local et, en particulier, plusieurs millions dans le Grand Nuage de Magellan. La *figure 4* montre une image reconstituée à partir du flux total reçu par *Gaia* par pixel dans chacune des trois bandes G , G_{BP} et G_{RP} . L'image est dominée par les étoiles les plus brillantes et les plus massives. La barre du LMC est dessinée en détail, ainsi que les régions de formations d'étoiles, zones bleues dans la barre et dans les bras. Sur la figure du haut, l'information sur les mouvements propres est superposée à la figure du bas, montrant très nettement la rotation du Nuage. ■