

L'ESSENTIEL

> Tout au long de l'histoire cosmique, la Voie lactée a grandi par l'accrétion de galaxies de plus petite taille. Ces interactions ont laissé une trace dans les propriétés, les positions et les trajectoires des étoiles.

> Pour les étudier, l'Agence spatiale européenne a lancé en 2013 le satellite *Gaia*. L'année dernière, la mission a publié le catalogue stellaire le plus complet de l'histoire de l'astronomie.

> Les nouvelles données, en nombre et en précision sans précédent, portent sur plus de 1,3 milliard d'étoiles ainsi que sur les orbites de 14 000 astéroïdes.

> Elles ont déjà révélé certains épisodes du passé de la Voie lactée et précisé nos connaissances sur l'évolution stellaire. Elles commencent à transformer différents domaines de l'astrophysique et de la cosmologie.

La première carte

Plus de 1,3 milliard d'étoiles de notre galaxie cartographiées avec une précision inédite : ce catalogue astronomique dressé par la mission *Gaia* de l'Agence spatiale européenne est en train de transformer la vision et la compréhension que nous avons de notre environnement cosmique.

LES AUTEURS



CARME JORDI
chercheuse à l'institut des sciences du cosmos
de l'université de Barcelone et à l'institut d'études
spatiales de Catalogne, en Espagne, et membre
de l'équipe scientifique de *Gaia*



EDUARD MASANA
chercheur à l'institut des sciences du cosmos
et à l'Institut d'études spatiales de Catalogne,
coresponsable du groupe de travail sur
les simulations au sein de l'équipe scientifique de *Gaia*

3D de la Voie lactée



Le satellite *Gaia* a mesuré avec une très grande précision les parallaxes et les mouvements propres de milliards d'étoiles de la galaxie. La parallaxe d'un astre est due à son mouvement apparent sur le fond du ciel (*ellipses*) sous l'effet de la révolution de la Terre autour du Soleil. Étant donné la très faible valeur de ces parallaxes, elles ont été ici agrandies par un facteur 100 000.

Comment la Voie lactée s'est-elle formée? D'où viennent ses étoiles? Quelles sont, de façon générale, ses propriétés? C'est pour répondre à ces questions que l'ESA, l'Agence spatiale européenne, a lancé fin 2013 le satellite *Gaia*, l'une des missions astronomiques récentes les plus ambitieuses. Au bout de quatre années d'observations, le consortium *Gaia* a publié en avril 2018 un catalogue indiquant la position, la parallaxe, le mouvement, la couleur et l'éclat de plus de 1,3 milliard d'étoiles. Ce nombre gigantesque – sans équivalent dans l'histoire de l'astronomie – et l'exquise précision des mesures ont commencé à remettre en cause une bonne part de ce que nous croyions savoir sur notre galaxie, ainsi que sur les mécanismes d'évolution stellaire.

On admet généralement que la formation des galaxies suit un scénario hiérarchique: les galaxies petites fusionnent peu à peu et forment des galaxies plus grandes. Ce mécanisme d'agrégation peut s'étaler sur des millions d'années, et l'on est aujourd'hui capable de le reconstituer en étudiant les orbites et les propriétés des étoiles d'une galaxie donnée. Les étoiles provenant d'une galaxie naine engloutie par le passé présentent en effet des trajectoires et des caractéristiques qui les distinguent des autres et permettent de remonter jusqu'à leur origine. Ainsi, le meilleur moyen de reconstituer le passé de la Voie lactée consiste à cartographier avec le maximum de précision le mouvement, la distance, l'âge et la composition chimique d'autant d'étoiles que possible. Tel est bien l'objectif de la mission *Gaia*.

L'analyse de ces données a déjà produit son lot de surprises. Nous avons par exemple appris qu'il y a 10 milliards d'années, la Voie lactée est entrée en collision et a fusionné avec une autre galaxie environ quatre fois plus petite qu'elle. De même, il semble qu'à une époque bien plus récente, le passage rapproché d'une autre galaxie naine a déclenché une série de perturbations des orbites des étoiles du disque de la Voie lactée, perturbations observées encore aujourd'hui.

L'énorme quantité des nouvelles données et leur précision permettent d'analyser les mécanismes d'évolution stellaire comme jamais auparavant. Ces travaux ont déjà révélé l'existence de populations d'étoiles inattendues et offert des preuves observationnelles de phénomènes jusque-là hypothétiques. Au-delà du voisinage galactique immédiat, les mesures de *Gaia* révèlent la dynamique du halo sphérique et diffus d'étoiles qui entoure le disque galactique, ainsi que celle des galaxies naines satellites qui gravitent autour de son centre. Cette vague de découvertes ne fait que commencer.

Le satellite *Gaia* a été lancé en décembre 2013 et a été placé au point de Lagrange L2 du



LA VOIE LACTÉE EN QUELQUES CHIFFRES

Notre galaxie présente un disque épais d'environ 1 000 années-lumière en moyenne et de diamètre compris entre 100 000 et 200 000 années-lumière. On estime qu'elle contient 100 à 400 milliards d'étoiles, dont beaucoup auraient des planètes. Sa masse est estimée entre $1,1 \times 10^{12}$ et $2,3 \times 10^{12}$ masses solaires, soit plus de 10 fois celle des étoiles. Le Soleil se trouve à environ 26 500 années-lumière du centre galactique, autour duquel il effectue une révolution en quelque 250 millions d'années, à la vitesse de 230 kilomètres par seconde.

système Terre-Soleil (à 1,5 million de kilomètres de la Terre dans la direction opposée au Soleil) où il se maintiendra jusqu'à la fin de sa mission. Ses observations ont débuté en juillet 2014. Le satellite tourne en 6 heures sur son axe, lequel suit lui-même un mouvement de précession autour de la direction Terre-Soleil avec une période de 63 jours. Ces deux mouvements, alliés à son déplacement autour du Soleil en même temps que la Terre (en un an, donc), permettent à ses capteurs de couvrir l'ensemble du ciel en 6 mois environ.

70 MILLIONS D'ÉTOILES INSPECTÉES PAR JOUR

Grâce à ce balayage de la voûte céleste, *Gaia* inspecte en moyenne 70 millions d'étoiles par jour. Chacune de ces observations donne lieu à 9 mesures de la position et de l'éclat, à l'obtention de deux spectres de basse résolution dans les parties bleues et rouges du spectre visible ainsi qu'à trois autres spectres de plus haute résolution dans l'infrarouge. On déduit des premiers spectres la nature de l'astre observé et certaines de ses propriétés telles que sa température et sa gravité de surface. Les seconds servent à déterminer la vitesse radiale de l'étoile (c'est-à-dire sa vitesse le long de la ligne de visée) ainsi que sa composition chimique. *Gaia* est équipé d'un ensemble de 106 dispositifs à transfert de charge (des CCD) qui équivalent à une caméra de 1 gigapixel, la caméra la plus performante jamais lancée dans l'espace. Le



Octobre 2013 : les ingénieurs de l'Agence spatiale européenne se préparent à inspecter le satellite *Gaia* sur la base de Kourou, en Guyane française. Le satellite, d'une masse totale de près de 2 tonnes, a été lancé en décembre de la même année.

14 avril 2018, deux semaines avant la publication de son dernier catalogue en date, *Gaia* a franchi la barre des 100 milliards d'observations.

Le traitement de cette masse d'informations permet d'extraire les caractéristiques de chaque étoile: sa position et son mouvement, à chaque fois en trois dimensions (c'est-à-dire sur la voûte céleste et en profondeur, le long de la ligne de visée), et ses propriétés physiques et chimiques. Le consortium pour l'analyse des données (DPAC, d'après le sigle anglais) est réparti sur 6 centres de calcul et regroupe 450 personnes, chercheurs et ingénieurs, dans différents pays d'Europe.

Pour bien comprendre l'importance de *Gaia*, il faut rappeler que lorsqu'on observe un objet astronomique, on ne sait pas *a priori* s'il est proche et peu lumineux ou lointain et très brillant. Certaines étoiles variables, telles les céphéides ou les RR Lyrae, pulsent d'autant plus rapidement qu'elles sont massives et lumineuses. De telles étoiles étant repérées dans une galaxie lointaine, la mesure de leur période de pulsation indique alors leur luminosité absolue ce qui, étant donné leur éclat apparent, détermine leur distance. L'accumulation de ces mesures de distances de galaxies lointaines et la mesure de leurs vitesses de fuite par effet Doppler (mesure relativement aisée) précise ensuite la relation dite de Hubble, qui donne la vitesse à laquelle l'expansion cosmique emporte une galaxie en fonction de son éloignement. Ce qui permet d'établir les distances d'objets bien trop éloignés pour qu'on y distingue la moindre étoile variable.

Mais pour que tout cela fonctionne, encore faut-il avoir calibré la relation période-luminosité d'un grand nombre de céphéides ou de RR Lyrae assez proches pour que l'on puisse établir leur distance par une mesure directe indépendante. Toutes les distances stellaires, les distances galactiques ainsi que la taille estimée de l'Univers visible reposaient donc jusqu'ici sur le catalogue de 120 000 étoiles proches dressé au début des années 1990 par le précurseur de *Gaia*, le satellite *Hipparcos*. *Gaia* a élevé ce nombre à plus de 1 milliard et amélioré de façon spectaculaire la précision des données. C'est d'autant plus important qu'il semble maintenant exister plusieurs populations aux propriétés légèrement différentes au sein des étoiles variables, ce qui pourrait modifier un peu les « chaînes d'arpenteur » utilisées par les astronomes et les cosmologistes.

Les mesures de distances directes, c'est-à-dire les mesures des parallaxes stellaires, sont donc un des résultats clés de *Gaia*. La parallaxe d'une étoile est l'angle qui sous-tend le couple Soleil-Terre tel qu'il est vu depuis l'étoile. On peut la mesurer en notant la position apparente de l'étoile sur la voûte céleste lorsque la Terre se trouve en deux points opposés de son orbite

autour du Soleil, et elle est directement reliée à la distance de l'étoile: plus l'étoile est lointaine, plus la parallaxe est petite. La précision de la mesure de la parallaxe en fin de mission de *Gaia* sera de moins de 0,01 milliseconde d'arc pour les étoiles les plus lumineuses (l'équivalent du diamètre apparent d'une pièce de 1 euro posée sur la Lune, vue de la Terre), et quelque 0,6 milliseconde d'arc pour les astres les moins brillants. À titre de comparaison, la précision des parallaxes du catalogue de *Hipparcos* n'atteignait que 1 milliseconde d'arc.

Jusqu'à présent, le consortium a publié deux catalogues. Le premier, en septembre 2016, incluait la position et l'éclat de 1 milliard d'étoiles ainsi que la distance et le mouvement sur la voûte céleste de près de 2 millions d'étoiles brillantes. Le second, publié en 2018, a porté cette quantité à 1,33 milliard. De surcroît, il fournit la couleur de 1,4 milliard d'étoiles, les paramètres physiques de centaines de millions d'entre elles et la vitesse radiale de 7 millions. À tout cela s'ajoute un demi-million de courbes de luminosité (la mesure de l'éclat en fonction du temps) correspondant à autant d'étoiles variables ainsi que des informations sur les orbites de 14 000 astéroïdes présélectionnés. Cette masse d'informations dépasse de plusieurs ordres de grandeur tous les catalogues astrométriques précédents.

UNE FENÊTRE SUR LE PASSÉ DE NOTRE GALAXIE

L'image que nous nous faisons de la Voie lactée est celle d'une galaxie spirale constituée d'un disque d'étoiles en rotation enchâssé dans un halo diffus d'étoiles plus anciennes. Ce halo a une forme à peu près sphérique autour du bulbe galactique, l'agglomération dense d'étoiles qui occupe la partie centrale de la Voie lactée. En ce qui concerne sa formation, on a découvert au cours des dernières années divers indices suggérant que la galaxie a subi plusieurs interactions avec des galaxies plus petites, interactions qui ont modifié sa structure.

Comme nous l'avons déjà évoqué, les interactions des galaxies laissent des traces dans les orbites de leurs étoiles. D'un autre côté, on est en droit de penser que si deux groupes d'étoiles ont des origines différentes, ils se distingueront aussi par leur composition chimique. Ce type d'analyse chimicodynamique a été mené l'année dernière sous la direction d'Amina Helmi, de l'université de Groningen. Grâce au second catalogue *Gaia*, l'équipe a identifié un groupe d'étoiles proches du Soleil, mais dont la composition chimique est différente et qui tournent autour du centre galactique en sens inverse de notre étoile.

Ces différences s'expliquent s'il s'agit d'étoiles provenant d'une autre galaxie qui aurait été avalée par la Voie lactée dans le passé. >

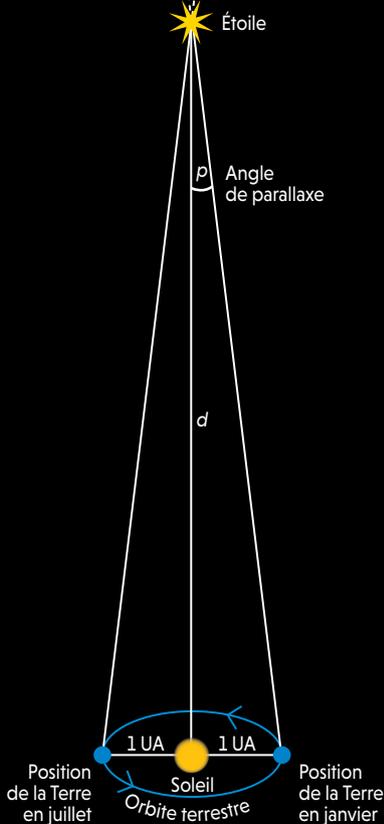
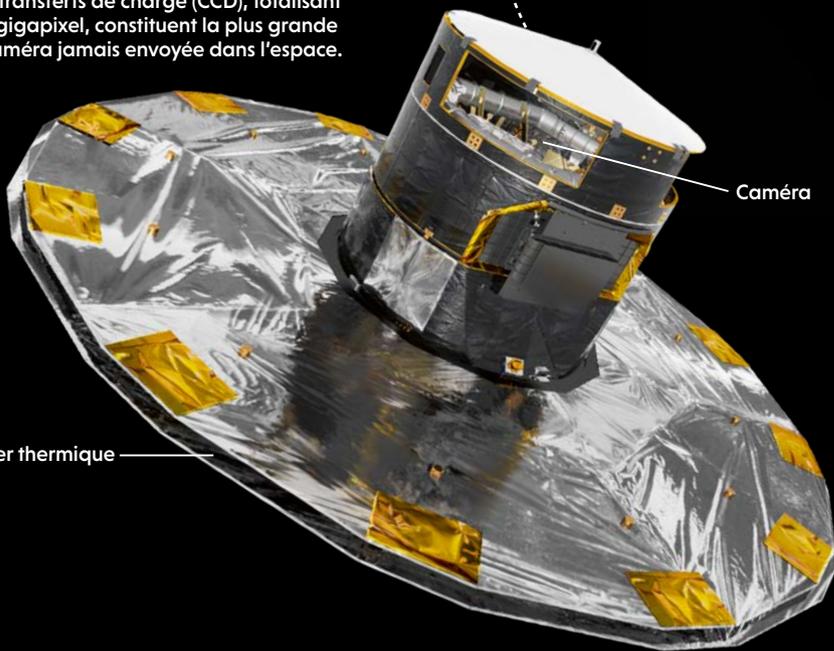
UNE CARTE STELLAIRE D'UNE PRÉCISION INÉGALÉE

Le satellite *Gaia* a été conçu par l'ESA pour mesurer la position, le mouvement et les propriétés physiques et chimiques des étoiles de la Voie lactée. À l'aide de ces données, les astronomes commencent à reconstituer le passé de la Voie lactée et à mieux comprendre les mécanismes de l'évolution stellaire. En avril 2018, le consortium *Gaia* a rendu public un catalogue contenant les caractéristiques de plus de 1,3 milliard d'étoiles, masse de données qui occupera les astronomes pendant des années.



LE SATELLITE

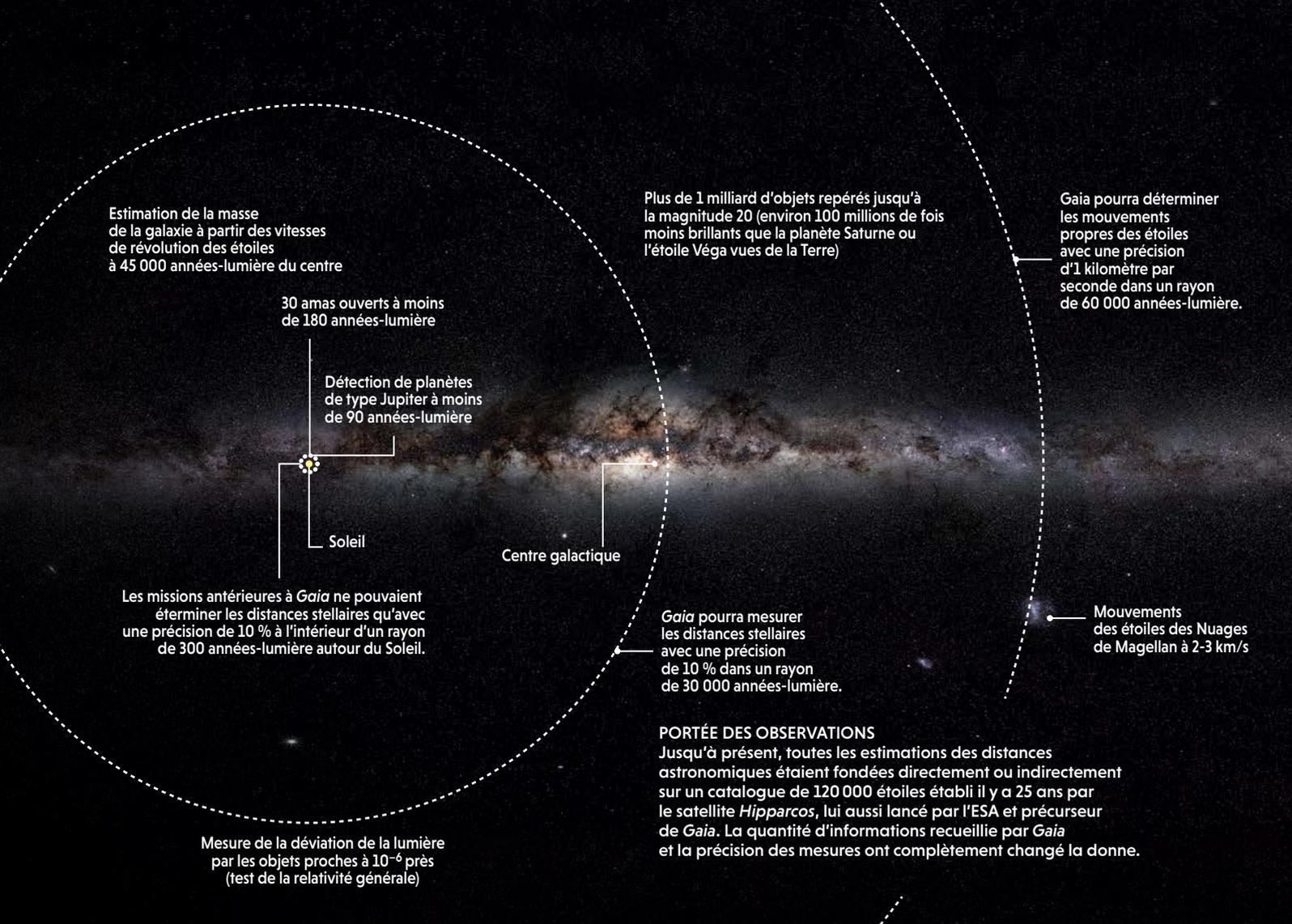
D'une masse de près de 2 tonnes pour un diamètre de 11 mètres et une hauteur de 2,3 mètres, le satellite *Gaia* (ci-dessous) se trouve au point de Lagrange L2 du système Terre-Soleil, soit à environ 1,5 million de kilomètres de la Terre dans la direction opposée au Soleil. Il inspecte 70 millions d'étoiles par jour et effectue un balayage complet de la voûte céleste tous les six mois. Ses 106 dispositifs à transferts de charge (CCD), totalisant 1 gigapixel, constituent la plus grande caméra jamais envoyée dans l'espace.



PARALLAXES, DISTANCES ET VITESSES

Gaia mesure l'angle sous lequel est vu le couple Terre-Soleil depuis une étoile donnée (à gauche). Un calcul élémentaire de trigonométrie permet de trouver la distance à l'étoile à partir de cet angle. Par rapport aux missions précédentes, *Gaia* a multiplié par plusieurs dizaines la précision des mesures de ce paramètre. Dans le même temps, le fait de pouvoir observer une même étoile pendant de longues périodes de temps permet de mesurer son mouvement propre dans le plan de la voûte céleste. Quant à sa vitesse radiale (le long de la ligne de visée), elle est donnée par l'analyse du spectre électromagnétique de l'étoile, grâce à l'effet Doppler.

d = distance à l'étoile
UA = unité astronomique
(la distance Soleil-Terre soit environ 150 millions de kilomètres)



> Les données de *Gaia* sont assez précises pour que les modèles théoriques d'interactions entre galaxies remontent jusqu'aux caractéristiques de la galaxie incidente et même à la date où l'événement s'est produit. Amina Helmi et ses collègues estiment ainsi qu'il y a environ 10 milliards d'années (lorsque l'Univers avait le quart de son âge actuel), la Voie lactée est entrée en collision avec une galaxie à peu près quatre fois moins massive qu'elle. Les chercheurs ont nommé Gaia-Enceladus cette galaxie disparue.

UNE GALAXIE NAIN AURAIT TRAVERSÉ LA VOIE LACTÉE

La fusion de la Voie lactée avec Gaia-Enceladus semble avoir été l'un des événements les plus importants de l'histoire de notre galaxie. Mais cet événement, évidemment, n'est pas unique. Considérons ce qui se serait passé si une galaxie naine avait carrément traversé le disque de la Voie lactée. Un tel événement produirait une perturbation locale, les étoiles se trouvant entraînées dans le sillage de la galaxie naine sans toutefois être complètement expulsées du disque, retenues qu'elles sont par sa gravité. Les étoiles perturbées acquerraient ainsi un mouvement d'oscillation autour du plan galactique en

même temps qu'elles continueraient leur orbite autour du centre de la Voie lactée, tels les chevaux de bois d'un manège. Existe-t-il aujourd'hui des indices d'un tel événement?

Si l'on s'en réfère aux données de *Gaia*, la réponse est oui. C'est ce qu'a montré une étude dirigée par Teresa Antoja, de l'institut des sciences du cosmos de Barcelone, et publiée en 2018. Les chercheurs ont analysé les positions et les vitesses de près de 1 million d'étoiles du voisinage solaire et en particulier la relation entre leur vitesse dans la direction perpendiculaire au plan galactique et leur distance à ce plan. La comparaison de ces données avec des simulations montre qu'elles sont compatibles avec la survenue, il y a environ 500 millions d'années, d'un événement comme celui que nous venons de décrire. Cette date coïncide avec le dernier passage de la galaxie du Sagittaire (une des galaxies naines proches de la Voie lactée) au point de son orbite le plus proche du centre galactique. Les données de *Gaia* démontrent ainsi que la dynamique du disque galactique est beaucoup plus complexe qu'on ne l'imaginait et qu'il faut réviser nos modèles actuels.

L'étude des amas stellaires, ces groupes d'étoiles qui se sont formées à partir d'un >

LE PASSÉ ET LE PRÉSENT DE LA VOIE LACTÉE

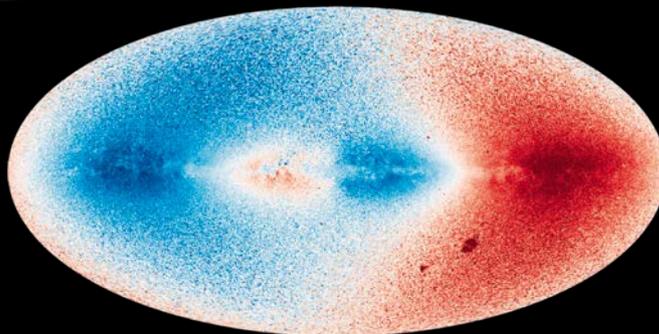
Par le passé, la Voie lactée s'est agrandie en fusionnant successivement avec des galaxies plus petites. Les vestiges de ces interactions subsistent aujourd'hui dans les propriétés des étoiles, puisque les astres provenant d'une galaxie naine engloutie autrefois par la Voie lactée présentent encore aujourd'hui des mouvements et des caractéristiques communes. Grâce aux cartes des positions et des vitesses élaborées par *Gaia* (ci-dessous), les astronomes commencent à reconstituer certains détails de l'histoire de notre galaxie (page ci-contre).



LES POSITIONS ET LES ÉCLATS DES ÉTOILES
Carte du ciel obtenue à partir des données du second catalogue *Gaia*. En plus des étoiles de la Voie lactée, on observe les deux Nuages de Magellan (en bas à droite), deux galaxies satellites de la nôtre.

CARTE DES VITESSES

Cette carte du ciel montre la vitesse de chaque étoile le long de la ligne de visée : dans les tons rouges, celles qui s'éloignent du Soleil, et en bleu, celles qui s'en rapprochent. Cette information, alliée aux données sur le mouvement propre sur le fond du ciel et à la parallaxe, permet de reconstituer le mouvement de révolution de ces étoiles autour du centre galactique.



> même nuage de gaz et de poussière, bénéficient également des données de *Gaia*. Du fait de leur origine commune, les étoiles d'un amas ont le même âge et la même composition chimique initiale, ainsi qu'un même mouvement d'ensemble dans l'espace, vestige de celui du nuage originel. Malheureusement, lorsque nous observons le ciel, les étoiles d'un même amas nous apparaissent, sur le fond de la voûte céleste, superposées à d'autres étoiles qui se trouvent à l'avant-plan ou à l'arrière-plan de l'amas. Seule la coïncidence des mouvements et des parallaxes permet de distinguer les étoiles qui appartiennent à l'amas des autres.

Plusieurs équipes ont exploité cette idée pour découvrir des groupes d'étoiles ayant des comportements communs. Grâce à la précision des données de *Gaia*, on a découvert des dizaines d'amas stellaires inconnus jusque-là. De surcroît, l'analyse des amas déjà connus (environ 3000) a révélé que beaucoup d'entre eux sont en réalité bien plus étendus qu'on ne le croyait et que, par ailleurs, certains n'étaient pas de véritables amas, mais de simples astérismes (des étoiles qui semblent regroupées sur la voûte céleste, mais qui n'ont en fait aucun

lien physique entre elles). Tel était le cas par exemple des « amas » les plus âgés de la partie interne du disque galactique. D'après les modèles théoriques, de tels amas auraient dû se désagréger rapidement sous l'effet de leurs nombreuses interactions avec les autres étoiles du disque et auraient dû s'y dissoudre depuis longtemps. Ces vieux amas jetaient donc un doute sur la validité des modèles. Or *Gaia* a permis de montrer qu'en fait, ces « amas » inexplicables n'existent pas.

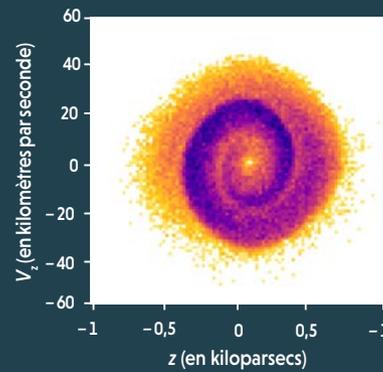
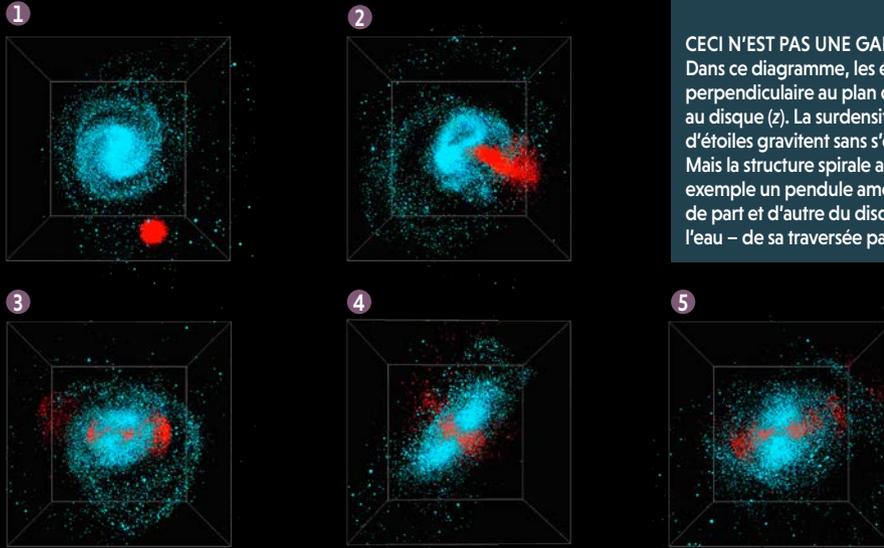
DES APPORTS À LA PHYSIQUE DES ÉTOILES

Les résultats de *Gaia* vont plus loin que la reconstitution du passé de la Voie lactée. En particulier, l'abondance des mesures commence à remplir des trous qui subsistaient dans notre compréhension de la structure et de l'évolution des étoiles.

L'un des principaux outils de la physique stellaire est le diagramme de Hertzsprung-Russell (H-R). Il a été conçu il y a plus d'un siècle par l'astronome danois Ejnar Hertzsprung et de façon indépendante par l'Américain Henry Norris Russell qui eut, comme lui, l'idée

CANNIBALISME GALACTIQUE

Les simulations informatiques reconstituent les mouvements que devraient adopter au cours du temps (1 à 5) les étoiles de deux galaxies (en rouge et en bleu) qui entrent en collision. Lorsqu'on les compare aux données observationnelles de *Gaia*, ces simulations nous font remonter dans le passé de la Voie lactée. Par exemple, ce type d'analyse a révélé récemment qu'il y a 10 milliards d'années la Voie lactée a englouti une galaxie quatre fois plus petite qu'elle, nommée depuis Gaia-Enceladus.



CECI N'EST PAS UNE GALAXIE...

Dans ce diagramme, les étoiles (en couleurs) sont repérées par leur vitesse perpendiculaire au plan du disque galactique (V_z) et leur distance au disque (z). La surdensité visible au centre indique qu'un grand nombre d'étoiles gravitent sans s'éloigner du disque et en restant dans son plan. Mais la structure spirale autour est typique de ce que montrerait par exemple un pendule amorti. Elle suggère que nombre d'étoiles oscillent de part et d'autre du disque galactique, vestige – tels des ronds dans l'eau – de sa traversée par une galaxie naine il y a 500 millions d'années.

d'y placer les étoiles observées en fonction de leur température (en abscisse) et de leur luminosité (en ordonnée), deux grandeurs qui évoluent de la naissance à la mort de l'étoile.

UN DIAGRAMME H-R PORTANT SUR 4 MILLIONS D'ÉTOILES

Lorsque nous observons une étoile et que nous mesurons ses propriétés, sa position dans le diagramme H-R dépend essentiellement de son âge d'une part et de sa masse et de sa composition chimique d'autre part. Cependant, nous ne disposons jusqu'ici que de données partielles sur certaines étapes de la vie stellaire correspondant à leur passage dans des régions particulières du diagramme H-R. *Gaia* a changé la donne. Puisque le satellite mesure les distances stellaires, la luminosité apparente d'un astre (sa luminosité vue de la Terre) donne accès à sa luminosité absolue (sa luminosité intrinsèque). En conséquence, nous pouvons placer les étoiles sur le diagramme avec une telle précision que nous commençons à y voir des détails impossibles à apprécier auparavant.

Sur la base des données de *Gaia*, on a réalisé un diagramme H-R contenant plus de 4 millions

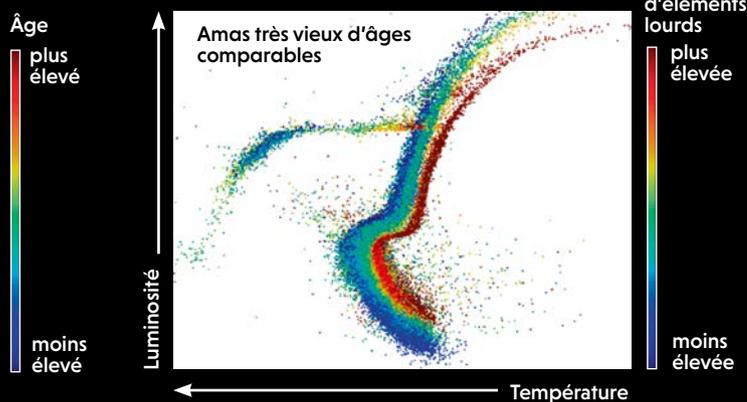
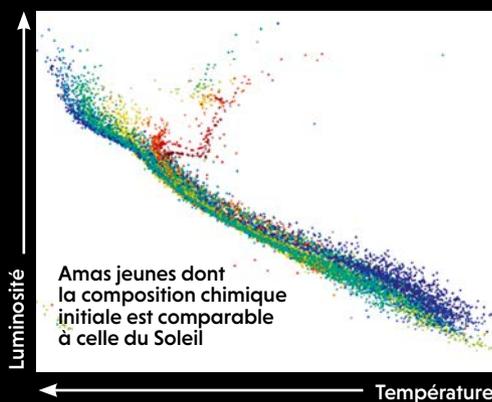
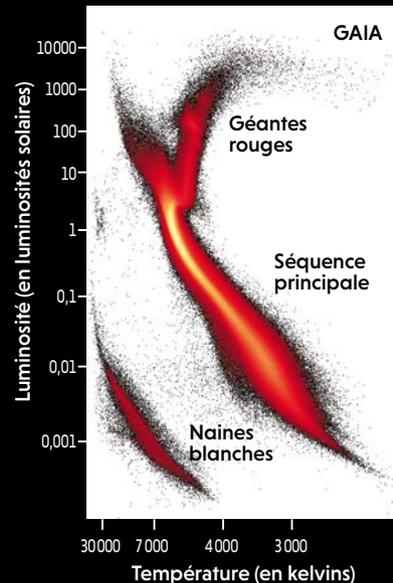
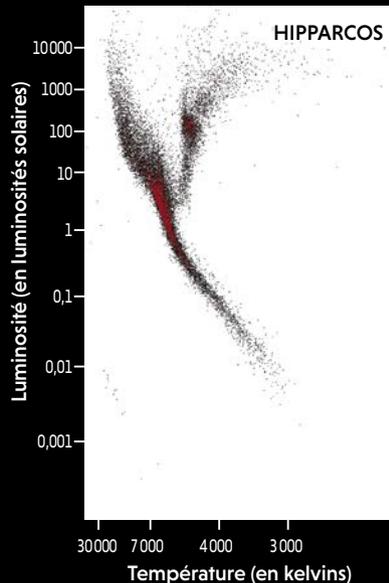
d'étoiles, celles pour lesquelles les données étaient les plus précises. À titre de comparaison, celui réalisé à l'époque de *Hipparcos* n'incluait les propriétés que de 20 000 étoiles. Ces nouvelles données font ressortir très clairement plusieurs populations d'étoiles, en particulier celles de la séquence principale (les étoiles qui, comme le Soleil, en sont encore à fusionner l'hydrogène de leur cœur), les géantes (qui fusionnent l'hydrogène dans leur enveloppe ou ont déjà atteint l'étape de la fusion de l'hélium) et les naines blanches (des résidus stellaires compacts qui subsistent après qu'une étoile comme le Soleil a épuisé son combustible nucléaire). Les naines blanches sont très nombreuses, mais difficiles à observer parce qu'elles émettent très peu de lumière. Leur distribution en luminosité (combien on observe de naines blanches pour chaque luminosité) et leur distribution en masse (combien il y a de naines en fonction de la masse) nous renseignent sur l'histoire de la production stellaire dans la galaxie. Les données de *Gaia* contiennent un échantillon de plus de 15 000 naines blanches du voisinage solaire, contre à peine 250 auparavant. Les détails du nouveau diagramme H-R >

UN NOUVEAU REGARD SUR LA VIE DES ÉTOILES

La mission *Gaia* commence également à transformer notre compréhension de l'évolution des étoiles. Un des principaux outils de la physique stellaire est le diagramme de Hertzsprung-Russell (H-R) : la relation observée entre la température d'une étoile et sa luminosité. Les astronomes testent leurs modèles d'évolution

stellaire sur la base de ce diagramme. L'énorme quantité d'étoiles étudiées par *Gaia* a permis de reconstituer le diagramme H-R avec un niveau de détail inédit (*ci-dessous*). Il en ressort l'existence de populations d'étoiles passées jusqu'ici inaperçues et la possibilité d'étudier séparément un grand nombre d'amas stellaires connus (*en bas*).

LE PLUS GRAND RECENSEMENT DE L'HISTOIRE DE L'ASTRONOMIE
Gaia a constitué un diagramme de Hertzsprung-Russell à partir des données observationnelles de 4276690 étoiles (*à droite*); le précédent comprenait 20000 étoiles du catalogue Hipparcos (*à gauche*). Les étoiles de la séquence principale (qui brûlent de l'hydrogène dans leur cœur) s'alignent le long d'une diagonale qui signifie simplement que les plus chaudes sont aussi les plus brillantes (ce sont aussi les plus massives et celles qui consomment leur hydrogène le plus vite). Celles qui passent ensuite à un nouvel équilibre fondé sur la fusion de l'hydrogène dans leur enveloppe gonflent et deviennent plus froides en surface, puis fusionnent l'hélium : elles sont à la fois très lumineuses (à cause de leur surface émettrice plus étendue) et plus rouges, c'est la population des géantes. Lorsque le combustible nucléaire s'épuise, elles s'effondrent en scories très chaudes, mais peu lumineuses au vu de leur très petite taille : les naines blanches. Le diagramme *Gaia* a révélé une diversité insoupçonnée dans le groupe des naines blanches, notamment le phénomène encore jamais observé de cristallisation.



AMAS D'ÉTOILES

Les étoiles d'un amas ont toutes le même âge et la même composition chimique initiale. On compare (*à gauche*) des « amas ouverts » de compositions chimiques semblables et on constate que leurs séquences principales sont presque superposables. Principale différence : dans les amas les plus anciens (*en rouge*), les étoiles les plus massives ont déjà eu le temps de consommer leur hydrogène et sont en train de s'échapper vers la zone des géantes rouges du diagramme H-R. On observe le même coude avec les « amas globulaires » qui sont beaucoup plus âgés (*à droite*). Mais cette fois, les populations ne se superposent pas. Leur position dépend de leur contenu en éléments lourds.

> dans cette région mettent en lumière plusieurs structures distinctes, différenciant les naines blanches selon leur atmosphère (notamment entre celles constituées surtout d'hydrogène et celles dominées par l'hélium), leur masse ou leur statut d'étoile double.

Les données de *Gaia* soutiennent l'idée de nombreuses fusions et accrétions de galaxies

Par ailleurs, l'astrophysicien Hugh Van Horn avait postulé en 1968 qu'en se refroidissant, l'intérieur d'une naine blanche pourrait passer à l'état solide en se cristallisant progressivement, cette transition de phase libérant une chaleur latente qui modifierait le rythme de refroidissement de l'astre. Or l'une des structures du diagramme H-R dans le groupe des naines blanches est la signature, observée pour la première fois, de ce phénomène prévu il y a cinquante ans.

Nous avons déjà mentionné que les étoiles d'un amas, qui partagent une même origine, ont le même âge et la même composition chimique initiale. Mais chacune de ces étoiles évolue selon un rythme imposé par sa masse. En reportant sur un diagramme H-R les luminosités et les températures de toutes les étoiles appartenant à un même amas, on obtient une « isochrone »: un instantané des propriétés d'un ensemble d'étoiles de même âge. En comparant les isochrones d'amas d'âges différents, il devient ainsi possible de comparer les observations avec les modèles d'évolution stellaire. C'est la première fois que l'on dispose d'isochrones empiriques et précises pour une multitude d'amas. Cela suscitera sans aucun doute de précieuses améliorations de nos modèles de structure et d'évolution stellaires.

Les données de *Gaia* sont également précieuses pour étudier le halo extérieur et le voisinage de la galaxie. Grâce à l'analyse des étoiles contenues dans à peu près la moitié des amas globulaires (des pelotes compactes d'étoiles qui gravitent autour du centre galactique), dans les quelques galaxies sphéroïdales voisines et dans les deux Nuages de Magellan (deux galaxies satellites de la Voie lactée), on connaît désormais leurs

mouvements avec beaucoup plus de précision, même s'il subsiste des biais systématiques dans les données.

L'analyse des surdensités d'étoiles au sein du halo externe révèle pour la première fois une carte cinématique et structurelle des courants stellaires de la Voie lactée. Il existe en effet un réseau complexe de tels courants qui s'entrecroisent et qui présentent bien souvent une cohérence cinématique surprenante. Plusieurs de ces structures étaient inconnues jusqu'ici. Cette nouvelle carte accrédite bien le scénario selon lequel la Voie lactée a subi un nombre considérable de fusions et d'accrétions de galaxies mineures au cours de son histoire.

Les galaxies naines sphéroïdales voisines ne se trouvent pas toutes dans le même plan, même si toutes ont des orbites très inclinées par rapport au disque galactique. On a observé des asymétries et, peut-être, des traces d'un effet de marée chez certaines de ces galaxies. L'analyse du mouvement de ces galaxies satellites permet aussi d'estimer la masse de la Voie lactée.

UNE MISSION PROLONGÉE

Que nous réserve le futur? Il était prévu que la mission dure jusqu'en juillet 2019 avec une extension possible d'un an. Mais la mission s'est révélée moins gourmande en carburant que prévu et la mise en orbite a été très efficace. On prévoit aujourd'hui que le carburant s'épuisera vers 2024; c'est pourquoi l'ESA a déjà décidé d'étendre la mission à la fin 2020, et elle étudie la possibilité de la faire durer encore deux années supplémentaires. Plus on observe une étoile longtemps, meilleure est la détermination de son mouvement. Il devient également possible de mesurer toute déviation de ce mouvement par rapport à la ligne droite. Si tel est le cas, cela indique que l'étoile possède un compagnon – une autre étoile ou une planète. On estime que *Gaia* pourrait détecter ainsi près de 20 000 planètes comparables à Jupiter et 6000 autres par la méthode du transit (la brève baisse de luminosité d'une étoile lorsqu'une planète vient à passer devant elle).

Pendant que la communauté scientifique dépouille les données de son second catalogue, le satellite *Gaia* poursuit ses observations quotidiennes. La prochaine livraison de données est prévue pour 2020. Ce troisième catalogue précisera les données existantes et inclura une nouvelle information: la classification de certains objets observés en étoiles, galaxies ou quasars, les température, gravité de surface, composition chimique et autres propriétés de multiples étoiles, ainsi que les orbites précises de certains corps du Système solaire. La communauté astronomique peut se réjouir, les données déjà fournies par *Gaia* et celles qui restent à venir lui donneront du travail pour des décennies. ■

BIBLIOGRAPHIE

P.-E. Tremblay et al., **Core crystallization and pile-up in the cooling sequence of evolving white dwarfs**, *Nature*, vol. 565, pp. 202-205, 2019.

A. Helmi et al., **The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk**, *Nature*, vol. 563, pp. 85-88, 2018.

T. Antoja et al., **A dynamically young and perturbed Milky Way disk**, *Nature*, vol. 561, pp. 360-362, 2018.

Archives de la mission *Gaia* : <http://gea.esac.esa.int/archive/>