

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. ➤