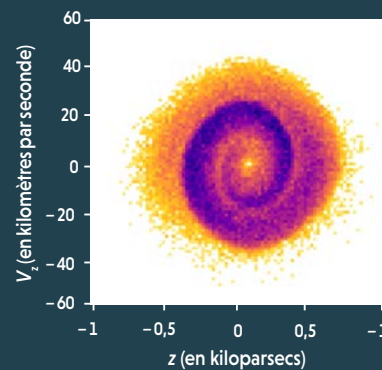
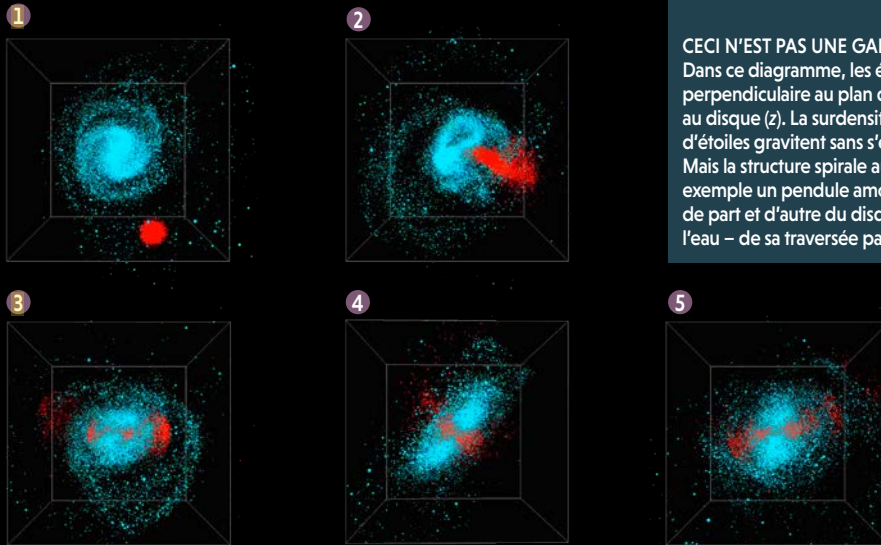


CANNIBALISME GALACTIQUE

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

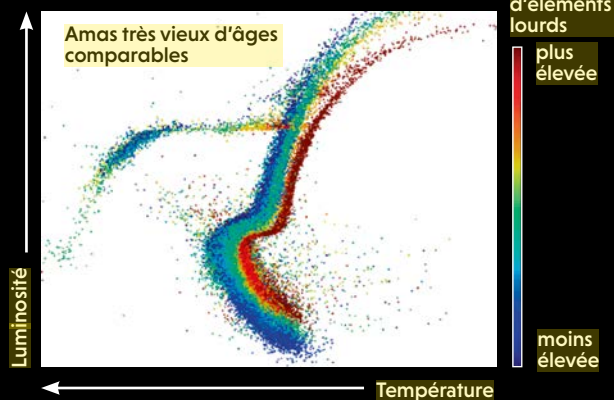
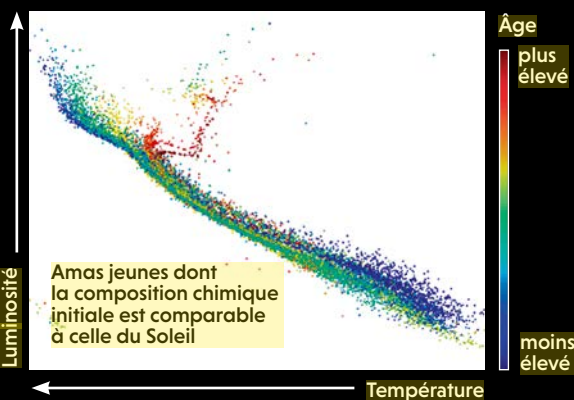
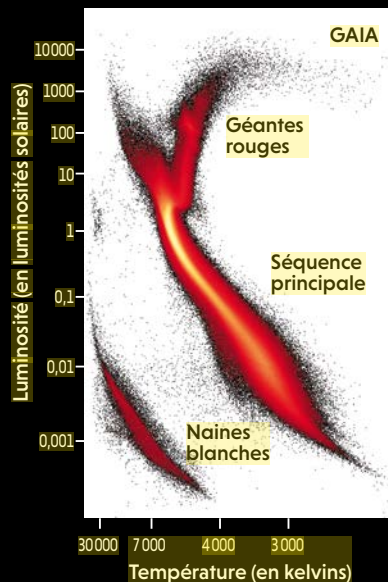
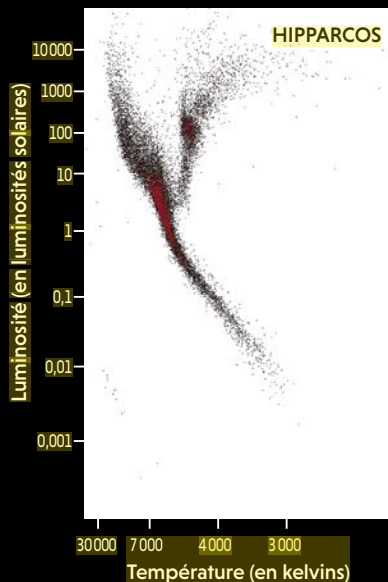
d'étoiles, celles pour lesquelles les données étaient les plus précises. À titre de comparaison, celui réalisé à l'époque de *Hipparcos* n'incluait les propriétés que de 20 000 étoiles. Ces nouvelles données font ressortir très clairement plusieurs populations d'étoiles, en particulier celles de la séquence 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 4 276 690 étoiles (à droite); le précédent comprenait 20 000 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 6 000 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/>