



# L'astronomie dans le monde

## *Mars*

*Basé sur un communiqué NASA/JPL*

Une étude utilisant les données de l'orbiteur Mars Odyssey pourrait expliquer pourquoi le givre martien se voit difficilement et pourquoi des avalanches de poussière apparaissent sur certains reliefs de la Planète rouge.

L'année dernière, les scientifiques ont été déçus en étudiant les images de la surface martienne prises à l'aube par Odyssey. Lorsqu'ils observaient la surface en lumière visible, ils ne voyaient que des traces légèrement bleutées du givre matinal sous les rayons du Soleil levant. Mais en utilisant la caméra thermosensible de l'orbiteur, le givre est apparu plus clairement, y compris dans des zones où il n'était pas décelé dans les longueurs d'onde optiques.

Les scientifiques savaient qu'ils étaient en présence d'un givre formé pendant la nuit et composé principalement de dioxyde de car-

*Ces traînées sombres, dites « traînées de pente », résultent d'avalanches de poussière sur Mars. La caméra HiRISE à bord du Mars Reconnaissance Orbiter de la NASA les a capturées le 26 décembre 2017. (NASA/JPL-Caltech/UArizona)*

bone – neige carbonique ou « glace sèche » – plutôt que de glace d'eau. Mais pourquoi cette neige carbonique est-elle visible à certains endroits et pas à d'autres ?

Les scientifiques proposent une réponse surprenante qui pourrait également expliquer comment les avalanches de poussière, qui remodelent la planète, sont déclenchées après le lever du Soleil.

Lancée en 2001, Odyssey est la mission martienne la plus ancienne de la NASA. Son système d'imagerie thermique (THEMIS) offre une vue unique de la surface martienne. Avec son orbite actuelle, Odyssey est idéalement

placée pour observer la planète à 7 heures du matin, heure locale de Mars. On peut voir les longues ombres du lever du Soleil qui s'étendent sur la surface.

L'atmosphère de Mars étant très peu dense (seulement 1% de la densité de celle de la Terre), le Soleil réchauffe rapidement la glace qui s'accumule pendant la nuit. Au lieu de fondre, la glace sèche s'évapore dans l'atmosphère en quelques minutes.

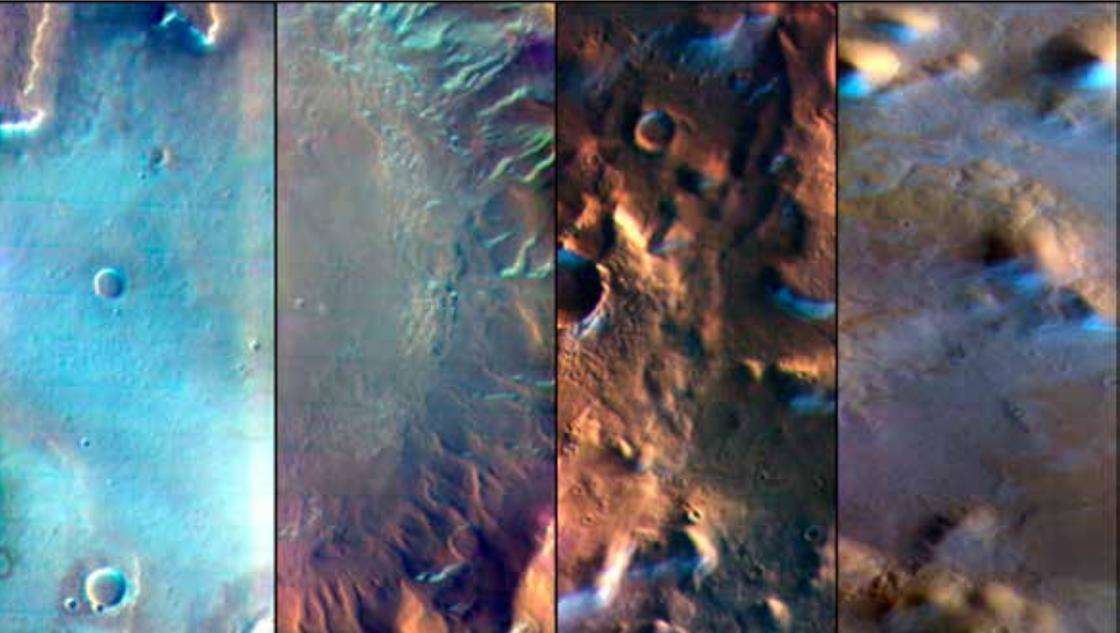
Les scientifiques ont remarqué les températures froides du givre dans de nombreux endroits où il n'était pourtant pas visible. En fait, ces températures apparaissent à très faible profondeur, quelques dizaines de microns sous terre.

La première idée était que de la glace sèche pouvait être enterrée là. La glace abonde près des pôles de Mars, mais *Odyssey* regardait près de l'équateur de la planète, où il fait généralement trop chaud pour que de la glace sèche se forme. Les auteurs ont donc supposé qu'ils voyaient du givre sale, de la glace sèche

mélangée à de fins grains de poussière qui l'obscurcissent en lumière visible mais pas dans les images infrarouges.

Ce phénomène a conduit les scientifiques à penser que le givre sale pouvait également expliquer certaines des stries sombres qui s'étendent parfois sur plus d'un kilomètre le long des pentes martiennes. Ces stries résultent essentiellement d'avalanches de poussière qui remodelent lentement le flanc des montagnes de la planète. Ces coulées de poussière laissent derrière elle des traînées de matière duveteuse et, en quelques heures, exposent le sol sous-jacent plus sombre.

*Le givre martien, fait essentiellement de neige carbonique, apparaît en bleu dans ces images prises par la caméra THEMIS (Thermal Emission Imaging System) d'Odyssey.  
(NASA/JPL-Caltech/ASU)*





***Trâinées de pente dans Acheron  
Fossae photographiées par HiRISE  
le 3 décembre 2006.  
(NASA/JPL-Caltech/UArizona)***

Ces stries sombres ne doivent pas être confondues avec celles, mieux documentées, appelées lignes de pente récurrentes (recurring slope lineae), qui réapparaissent toujours aux mêmes endroits, saison après saison, pendant des semaines (au lieu d'heures). Si l'on pensait autrefois qu'elles résultaient d'une eau saumâtre s'infiltrant lentement aux flancs des montagnes, on pense maintenant que les lineae récurrentes sont le résultat d'écoulements de sable sec ou de poussière.

En cartographiant les stries des pentes, les scientifiques ont constaté qu'elles ont tendance à apparaître dans des endroits où il y a des gelées matinales. Les chercheurs pensent que les stries résultent de la vaporisation du

givre qui crée une pression juste suffisante pour détacher les grains de poussière et provoquer une avalanche.

Ces hypothèses sont une preuve supplémentaire du caractère surprenant de la Planète rouge. Chaque mission martienne conduit à la découverte de processus nouveaux. Rien d'exactly semblable aux stries de pente n'existe sur Terre. Il faut penser au-delà de nos expériences terrestres pour comprendre Mars.

## ***Une nouvelle vision de la formation de Jupiter***

*Communiqué INSU*

En 1995, la sonde atmosphérique Galileo de la NASA réalisait la première mesure *in situ* de la composition de l'atmosphère de Jupiter. Elle révélait que l'atmosphère est enrichie en éléments volatils, tel que le carbone, l'azote, le phosphore ou les gaz nobles, mais que l'oxygène, présent sous forme d'eau, est moins abondant. De nombreuses théories sont développées pour expliquer ces observations, mais certains scientifiques remettent également en question les mesures.

Après 15 ans de préparation et 5 ans de trajet Terre-Jupiter, la sonde Juno de la NASA effectua une nouvelle mesure en 2020. Les données confirmèrent les enrichissements mesurés par Galileo, mais elles indiquèrent aussi un enrichissement en oxygène. Il devenait donc nécessaire de réviser les théories de la formation du système jovien.

Pour tenter d'expliquer la composition de l'atmosphère de Jupiter, des chercheurs proposent une nouvelle théorie pour la forma-

tion de Jupiter, compatible avec les mesures de Juno. Leur modèle simule l'évolution de la nébuleuse protosolaire, disque de gaz et de poussière en orbite autour du Soleil avant la formation des planètes. Les planètes se créent à partir de la matière contenue dans ce disque, qui peut être sous forme solide ou gazeuse. Jusqu'à maintenant, l'enrichissement en volatils dans Jupiter était attribué à un bombardement de son enveloppe par une masse importante de roches et de glaces au cours de sa croissance. Les résultats de ce modèle montrent que l'enveloppe de Jupiter aurait pu se former directement en amassant du gaz enrichi en volatils, sans qu'un apport en matériaux solides soit requis au cours de sa croissance.

*Vue d'artiste de la sonde atmosphérique Galileo (au centre) entrant dans l'atmosphère de Jupiter le 13 juillet 1995. L'orbiteur (à gauche) est resté en orbite pour recevoir les données de la sonde et les envoyer vers la Terre. (NASA)*



## Cérès

Basé sur un communiqué Virginia Tech

Ce n'est qu'en 2015, grâce à la mission Dawn de la NASA, que les scientifiques ont pu obtenir une image détaillée de la grosse planète naine, Cérès, et analyser sa composition et ses structures. Ces observations ont révélé une activité géologique inattendue.

Cérès a beau être le plus gros objet de la ceinture d'astéroïdes située entre Jupiter et Mars, sa taille est malgré tout modeste et l'on pensait qu'elle était géologiquement inactive. Au lieu de cela, Dawn a découvert un grand plateau sur un côté de Cérès qui couvre une fraction de la planète, semblable à ce qu'un continent pourrait occuper sur Terre. Autour de ce plateau se trouvent des fractures dans des zones rocheuses. Il y a aussi les signes d'un ancien monde océanique : de vastes dépôts où des minéraux s'étaient condensés lorsque l'eau s'était évaporée – la marque d'un océan gelé.

Comment un corps aussi petit que Cérès peut-il générer la chaleur nécessaire pour alimenter ce type d'activité géologique et expliquer les caractéristiques de surface relevées par Dawn ? Grâce à des modélisations, les chercheurs ont découvert que la désintégration d'éléments radioactifs à l'intérieur de Cérès est en mesure de maintenir son activité.

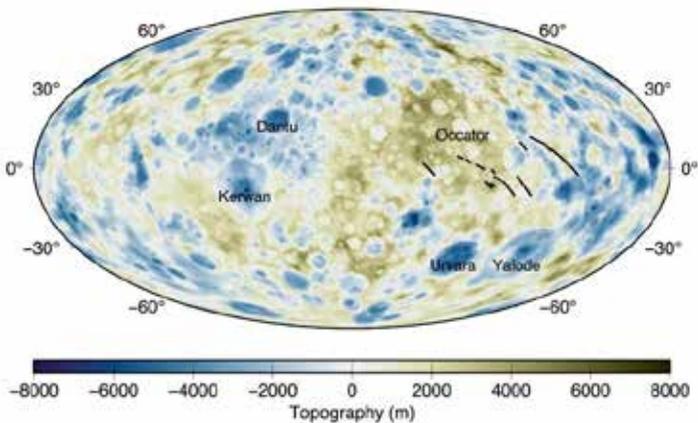
L'étude des planètes plus grosses, comme la Terre, Vénus et Mars, montre qu'elles sont initialement chaudes par suite des collisions qui les ont formées. Cérès, en revanche, n'a jamais été assez grosse pour générer de la chaleur de la même manière.

Le modèle de l'intérieur de la planète naine a révélé une séquence unique : Cérès a

commencé par être froide, puis s'est réchauffée en raison de la désintégration d'éléments radioactifs tels que l'uranium et le thorium – qui étaient seuls à alimenter son activité – jusqu'à ce que l'intérieur devienne instable. Tout d'un coup, une partie de l'intérieur commence à se réchauffer et se soulève, puis l'autre partie s'abaisse. Cette instabilité pourrait expliquer certaines des caractéristiques de surface qui se sont formées sur Cérès, comme l'a révélé la mission Dawn. Le grand plateau s'est formé d'un seul côté de Cérès, sans rien de l'autre côté, et les fractures se sont regroupées en un seul endroit autour de lui. La concentration des caractéristiques dans un seul hémisphère suggère qu'une telle instabilité s'est bien produite.

D'après le modèle, Cérès n'a donc pas suivi le schéma typique d'une planète : d'abord chaude, puis froide, avec son propre schéma de refroidissement, de réchauffement, puis de nouveau refroidissement. L'échauffement radiogénique à lui seul a été suffisant pour créer une géologie intéressante.

On peut voir des similitudes entre Cérès et les grosses lunes d'Uranus, astres récemment jugés hautement prioritaires pour une mission robotique majeure. Avec quelques améliorations, l'application du modèle à ces lunes serait d'un grand intérêt.



**Modélisation de la topographie de Cérès à partir du projet Dawn de la NASA. Les lignes noires représentent des failles. (King et al., AGU Advances, 2022)**

## **Trou noir à la dérive**

*Basé sur des communiqués Hubble et UC Berkeley*

Les astronomes ont découvert ce qui pourrait être un trou noir isolé en observant l'effet de microlentille gravitationnelle qu'il exerce sur une étoile lointaine. Ils estiment la masse de l'objet compact entre 1,6 et 4,4 fois celle du Soleil. On pense que les restes d'une étoile morte doivent être plus lourds qu'environ 2 ou 3 masses solaires pour s'effondrer en un trou noir, de sorte qu'il pourrait s'agir d'une étoile à neutrons plutôt que d'un trou noir. Les étoiles à neutrons sont également des objets denses et très compacts, mais leur gravité est équilibrée par la pression interne des neutrons, qui empêche tout effondrement supplémentaire en trou noir.

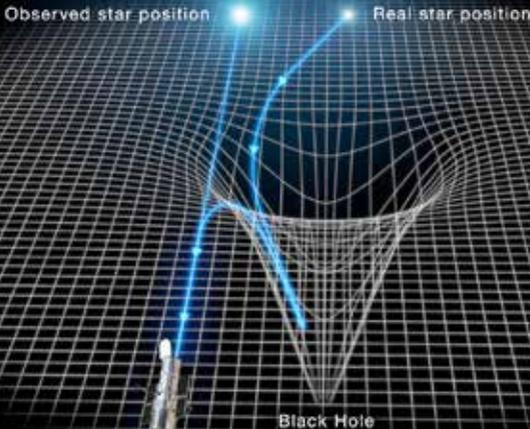
Qu'il s'agisse d'un trou noir ou d'une étoile à neutrons, l'objet est le premier vestige stellaire sombre – un « fantôme » stellaire – que l'on voit errer dans la Galaxie sans être apparié à une autre étoile.

Si, comme le pensent les astronomes, la mort des étoiles massives laisse derrière elles des trous noirs, il devrait y en avoir des centaines de millions disséminés dans la Voie lactée. Ils sont normalement invisibles mais l'effet de microlentille permet d'en détecter quelques-uns et de les peser.

Déterminer combien de ces objets compacts peuplent la Voie lactée aidera les astronomes à comprendre l'évolution des étoiles – en particulier, comment elles meurent – et de

*Le champ de gravité d'un trou noir déforme l'espace-temps et affecte l'image d'une étoile lointaine de sorte que sa position est décalée, vue de la Terre. Cette déviation, captée par le télescope spatial Hubble (au premier plan à gauche), et l'augmentation d'éclat permettent aux astronomes de découvrir ces objets dérivants qui seraient autrement invisibles, et de calculer leur masse et leur vitesse.  
(NASA, ESA, STScI, Joseph Olmsted)*

### Hubble Measures Deflection of Starlight by a Foreground Black Hole





notre galaxie, et révélera peut-être si certains des trous noirs invisibles sont des trous noirs primordiaux, dont certains cosmologistes pensent qu'ils ont été produits en grande quantité lors du Big Bang.

Les chercheurs qui ont réalisé cette étude ont également observé quatre autres événements de microlentille et conclu qu'ils n'étaient pas causés par un trou noir. Deux d'entre eux auraient été produits par une naine blanche ou une étoile à neutrons. L'équipe a également conclu que la population probable de trous noirs dans la galaxie est de 200 millions, en accord général avec les prévisions.

D'autres chercheurs qui ont analysé le même événement de microlentille estiment que la masse de l'objet compact est plus proche de 7,1 masses solaires et qu'il s'agit donc indiscutablement d'un trou noir. Les deux équipes ont utilisé les mêmes données : des mesures photométriques de l'étoile distante lors du transit de l'objet compact, et des mesures astrométriques montrant le déplacement apparent de l'étoile distante en raison de la distorsion gravitationnelle de l'objet. C'est l'ajout de ces données astrométriques qui a permis aux deux équipes de

*Illustration d'un trou noir dérivant dans notre galaxie, la Voie lactée. Le trou noir est le résultat de l'effondrement d'une étoile massive. Le noyau survivant a une masse plusieurs fois supérieure à celle du Soleil. Le champ de gravitation du trou noir agit comme une lentille déformante. Cet effet de lentille gravitationnelle constitue la seule preuve de l'existence de trous noirs solitaires dans notre galaxie. Le télescope spatial Hubble traque ces trous noirs en observant la déformation des images stellaires. (FECYT, IAC)*

## Microlensing Black Hole



déterminer la masse de l'objet compact et sa distance par rapport à la Terre (entre 2 280 et 6 260 années-lumière selon une équipe, et 5 150 pour l'autre).

Les données photométriques proviennent de deux études de microlentille : l'expérience OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment), qui utilise un télescope de 1,3 mètre au Chili, et l'expérience MOA (Microlensing Observations in Astrophysics), qui est montée sur un télescope de 1,8 mètre en Nouvelle-Zélande. Les données astrométriques proviennent du télescope spatial Hubble. Comme les deux études de microlentille ont capturé le même objet, celui-ci porte deux noms : MOA-2011-BLG-191 et OGLE-2011-BLG-0462.

*Ce champ stellaire photographié par le télescope spatial Hubble est situé dans la direction du centre galactique. En surveillant le ciel à la recherche d'étoiles qui brillent anormalement, le télescope en a découvert une (au centre) qui a subi une hausse temporaire d'éclat entre 2011 et 2017. Cela pourrait être dû à un trou noir d'avant-plan dérivant devant l'étoile.  
(NASA, ESA, Kailash Sahu/STScI, J.DePasquale/STScI)*

À ce jour, les trous noirs de masse stellaire n'ont été découverts qu'au sein de systèmes binaires et sont visibles soit dans le domaine des rayons X, produits lorsque le trou noir reçoit de la matière d'une étoile voisine, soit grâce aux ondes gravitationnelles lors de la fusion de deux trous noirs. Mais ces événements sont rares.

L'événement de microlentille OB110462 présentait les caractéristiques d'un objet compact : l'objet lentille semblait sombre, et n'était donc pas une étoile. L'amplification de la brillance de l'étoile lointaine a duré longtemps, près de 300 jours ; et la distorsion de la position de cette étoile a également duré longtemps.

La durée de l'effet de lentille était le principal indice, lié à la masse de la lentille. On estime que seul un événement de microlentille détectable sur cent est dû à un trou noir, de sorte que l'examen de tous les événements reviendrait à chercher une aiguille dans une botte de foin. Mais 40% des événements de plus de 120 jours pourraient provenir de trous noirs. Ce n'est toutefois pas une garantie, car la durée de l'épisode dépend non seulement de la masse de la lentille d'avant-plan, mais aussi de la vitesse à laquelle la lentille et l'étoile d'arrière-plan se déplacent l'une par rapport à l'autre. Toutefois, des mesures de la position apparente de l'étoile d'arrière-plan permettent de confirmer si la lentille d'avant-plan est réellement un trou noir.

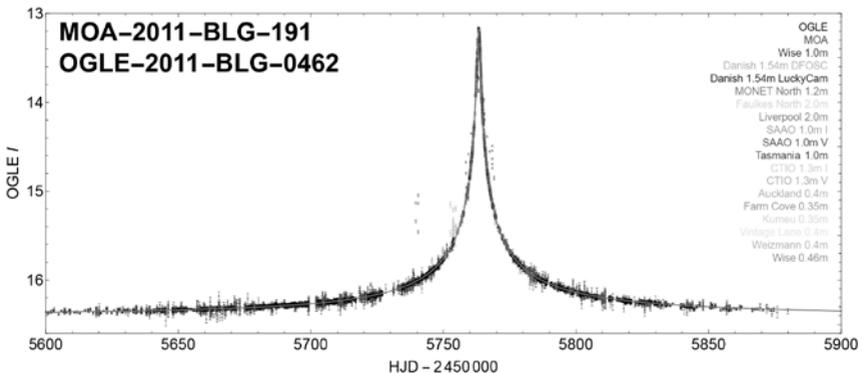
L'influence gravitationnelle de OB110462 sur la lumière de l'étoile d'arrière-plan a été étonnamment longue. Il a fallu environ un an pour que l'étoile augmente d'éclat jusqu'à son pic en 2011, puis environ un an pour revenir à la normale.

De nouvelles données Hubble ont montré que le changement de position de l'étoile dû au champ gravitationnel de la lentille est toujours observable 10 ans après l'événement.

On pense que les conclusions divergentes des deux équipes sont dues au fait que les données astrométriques et photométriques donnent des mesures différentes des mouvements relatifs des objets d'avant-plan et d'arrière-plan, 30 et 45 km/s. On espère résoudre cette divergence avec davantage de données Hubble et une meilleure analyse à l'avenir.

La plus faible vitesse relative pourrait être interprétée comme le fait que le trou noir ne provient pas d'une supernova normale, mais plutôt d'une supernova « ratée » qui ne donne pas d'impulsion au trou noir résiduel.

***Courbe de lumière de l'événement MOA-2011-BLG-191 observé par divers télescopes au sol. Les abscisses sont étiquetées en jours.***  
(Sahu et al., 2022)



## ***Galaxies proches vues sous un nouveau jour***

*Basé sur un communiqué NASA*

De nouvelles images réalisées à partir de données provenant de diverses missions de l'ESA et de la NASA montrent le gaz et la poussière qui remplissent l'espace entre les étoiles dans quatre des galaxies les plus proches. En plus de leur qualité esthétique, ces clichés constituent un trésor scientifique, en cartographiant la densité des nuages de poussière au sein de ces galaxies.

La poussière est créée par les étoiles mourantes et est l'un des matériaux qui forment les nouvelles étoiles. Les nuages sont constamment modelés par les vents stellaires, les explosions de supernovæ et les effets de la gravité.

Comprendre la poussière est une partie essentielle de la compréhension de notre Univers.

Près de la moitié de la lumière des étoiles dans l'Univers est absorbée par la poussière. De nombreux éléments chimiques lourds essentiels à la formation de planètes comme la Terre sont enfermés dans les grains de poussière de l'espace interstellaire.

Les images présentées ici proviennent principalement de l'observatoire spatial Herschel de l'ESA, qui a fonctionné de 2009 à 2013. Les instruments ultra-froids d'Herschel ont permis de détecter la poussière dans l'infrarouge thermique, une gamme de longueurs d'onde beaucoup plus longues que celles que l'œil humain peut détecter.

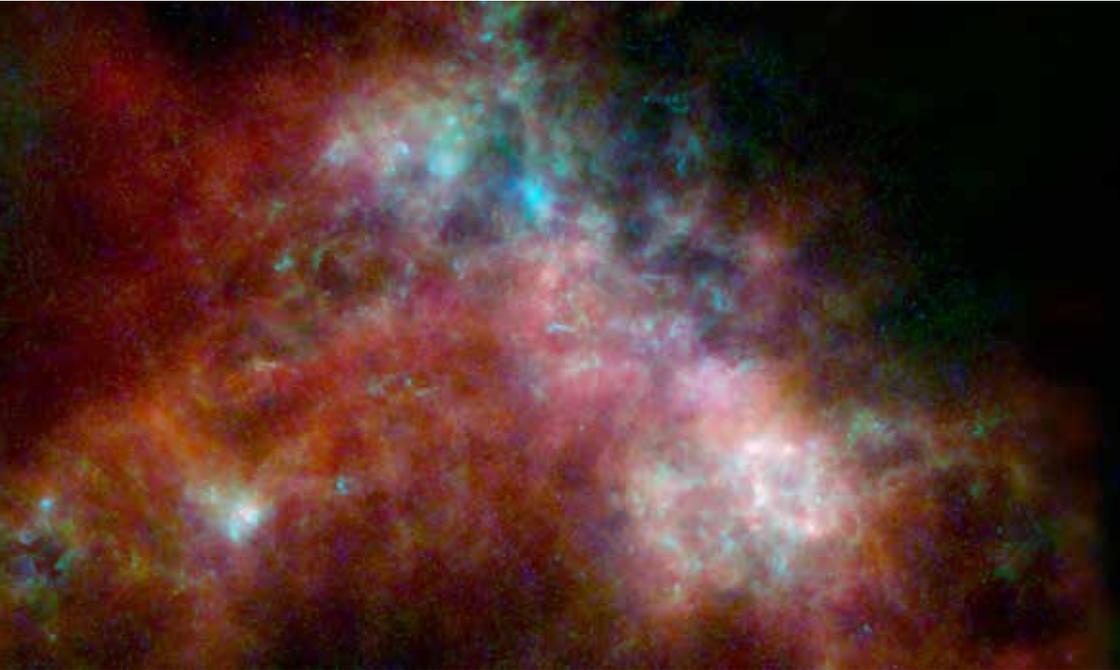
Les images de la poussière interstellaire prises par Herschel fournissent des vues à haute résolution des détails les plus fins de ces nuages, révélant des sous-structures complexes. Mais la conception du télescope spatial l'empêchait souvent de détecter la lumière provenant de nuages plus étalés et plus diffus, notamment dans les régions extérieures des galaxies, où les gaz et les poussières sont moins nombreux et donc moins lumineux. Pour certaines galaxies proches, cela signifie

que Herschel a manqué jusqu'à 30 % de la lumière émise par la poussière. Avec une telle lacune, les astronomes avaient du mal à utiliser les données d'Herschel pour comprendre le comportement de la poussière et du gaz dans ces environnements. Pour compléter les cartes de poussière d'Herschel, les nouvelles images combinent les données de trois autres missions : l'observatoire Planck de l'ESA, aujourd'hui retiré, ainsi que deux missions de la NASA, IRAS (Infrared Astronomical Satellite) et COBE (Cosmic Background Explorer).

Les images montrent la galaxie d'Andromède (M31), la galaxie du Triangle (M33), ainsi que les Nuages de Magellan – des galaxies naines en orbite autour de la Voie lactée qui n'ont pas la structure spirale des galaxies d'Andromède et du Triangle. Toutes les quatre se trouvent à moins de 3 millions d'années-lumière de la Terre.

Sur les images, le rouge indique l'hydrogène gazeux, l'élément le plus courant dans l'Univers. De nombreux éléments lourds présents dans la nature – comme le carbone, l'oxygène et le fer – peuvent se coller aux grains de poussière. La présence de différents éléments modifie la façon dont la poussière absorbe la lumière des étoiles. Dans les nuages de poussière les plus denses, presque tous les éléments lourds peuvent être enfermés dans les grains de poussière, ce qui augmente le rapport poussière/gaz. Mais dans les régions moins denses, le rayonnement destructeur des nouvelles étoiles, ainsi que les ondes de choc des étoiles en explosion, désintègrent les grains de poussière et renvoient certains des éléments lourds dans le gaz, ce qui modifie à nouveau le rapport. Les scientifiques qui étudient l'espace interstellaire et la formation des étoiles veulent mieux comprendre ce cycle permanent. Les images Herschel montrent que le rapport poussière/gaz peut varier d'un facteur 20 au sein d'une même galaxie, soit beaucoup plus que ce qui avait été estimé précédemment. Ces images Herschel améliorées montrent que les « écosystèmes » de poussière de ces galaxies sont étonnamment dynamiques.





*Page précédente : les galaxies d'Andromède (M31) et du Triangle (M33), vues en infrarouge lointain et en radio. Une partie du gaz d'hydrogène (rouge) qui trace le bord des galaxies provient de l'espace intergalactique, et une autre partie a été arrachée à des galaxies qui ont fusionné avec elles.*

*Les images sont composées de données provenant de la mission Herschel de l'ESA, complétées par des données de l'observatoire spatial Planck (ESA), et de deux missions de la NASA, IRAS (Infrared Astronomy Survey) et COBE (Cosmic Background Explorer), ainsi que les radiotélescopes terrestres GBT (Green Bank Telescope), WRST (Westerbork Synthesis Radio Telescope) et IRAM (Institut de Radioastronomie Millimétrique).*

*(ESA, NASA, NASA-JPL, Caltech, Christopher Clark/STScI, R. Braun/Observatoire SKA, C Nieten/ MPI Radioastronomie, Matt Smith/ Université de Cardiff, E. Koch/Université d'Alberta, C. Druard/Université de Bordeaux)*

*Ci-dessus, le Petit Nuage de Magellan est un satellite de la Voie lactée, contenant environ 3 milliards d'étoiles. Cette vue combinant l'infrarouge lointain et le domaine radio montre les poussières froides (vertes) et chaudes (bleues), ainsi que l'hydrogène (rouge). L'image est composée de données des missions spatiales Herschel, Planck, IRAS et COBE, ainsi que celles des radiotélescopes Parkes, ATCA (Australia Telescope Compact Array) et NANTEN (Chili). (ESA, NASA, NASA-JPL, Caltech, Christopher Clark/STScI, S. Stanimirovic/ UW-Madison, N. Mizuno/Université de Nagoya)*



*Le Grand Nuage de Magellan (LMC) est un autre satellite de la Voie lactée, contenant environ 30 milliards d'étoiles. Il est vu ici en infrarouge lointain et en radio. Les poussières froides et chaudes sont représentées respectivement en vert et en bleu, et l'hydrogène en rouge. La queue rouge en bas à gauche de la galaxie a probablement été créée lors de la collision avec le Petit Nuage de Magellan il y a environ 100 millions d'années. Les bulles d'espace vide indiquent les régions où les étoiles se sont récemment formées, car les vents intenses des étoiles naissantes emportent la poussière et le gaz environnants. La lumière verte autour des bords de ces bulles indique la présence de poussière froide qui s'est accumulée à cause de ces vents. La poussière plus chaude, représentée en bleu, indique les endroits de formation d'étoiles ou d'autres processus qui ont chauffé la poussière. L'image est composée de données des missions Herschel, Planck, IRAS, COBE ainsi que celles des radiotélescopes Parkes, ATCA et Mopra (Australie). (ESA, NASA, NASA-JPL, Caltech, Christopher Clark/STScI, S. Kim/ Université Sejong, T. Wong/UIUC)*

## Bételgeuse se rétablit

Basé sur un communiqué NASA

Les observations de Bételgeuse réalisées avec le télescope spatial Hubble et plusieurs autres observatoires indiquent que la supergéante rouge a littéralement explosé en 2019, perdant une quantité importante de matière et produisant une gigantesque éjection de masse dite « de surface » (SME). C'est un événement inédit pour une étoile normale.

Le Soleil fait régulièrement sauter des parties de son atmosphère extérieure ténue, la couronne, dans un événement connu sous le nom d'éjection de masse coronale (CME). Mais la SME de Bételgeuse a expulsé 400 milliards de fois plus de masse qu'une CME typique !

L'étoile géante se remet encore lentement de ce bouleversement catastrophique, tout en continuant à faire des choses très inhabituelles. L'intérieur est en quelque sorte en train de rebondir.

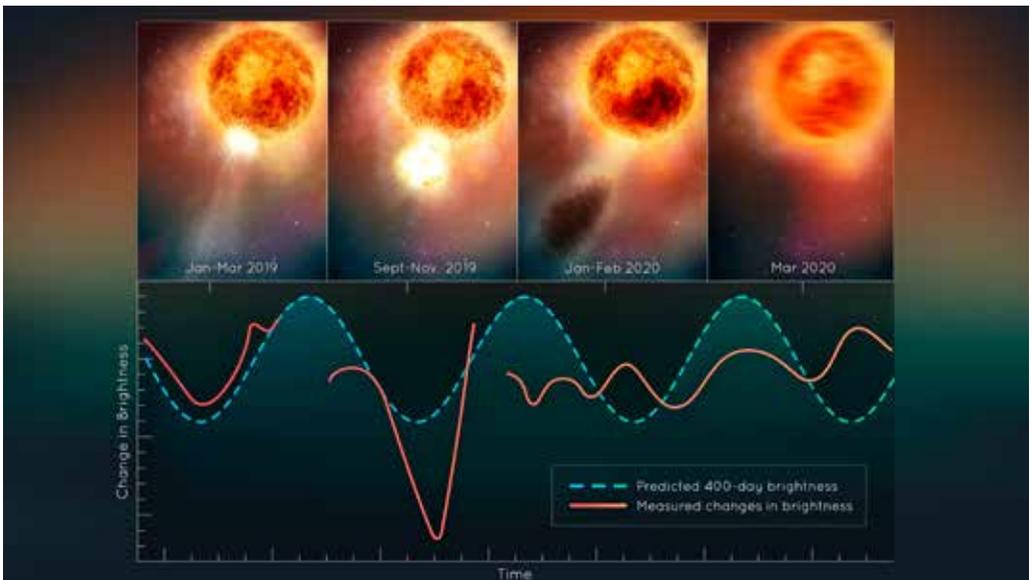
Ces nouvelles observations fournissent des indices sur la façon dont les étoiles rouges perdent de la masse à la fin de leur vie, lorsque

la fusion nucléaire s'épuise, avant d'exploser en supernovæ. L'ampleur de la perte de masse influe considérablement sur leur destin. Cependant, le comportement étonnamment capricieux de Bételgeuse n'est pas une preuve que l'étoile est sur le point d'exploser. L'événement de perte de masse n'est donc pas nécessairement le signal d'une explosion imminente.

C'est la première fois que les astronomes assistent à une énorme éjection de masse de

*Illustration de l'évolution de la luminosité de l'étoile supergéante rouge Bételgeuse, après l'éjection titanesque d'une grande partie de sa surface visible. Les images du haut montrent la masse éjectée de l'étoile au fil du temps, de janvier 2019 à mars 2020. Le graphique du bas représente l'évolution de la luminosité de l'étoile dans le temps.*

*La matière qui s'est échappée s'est refroidie pour former un nuage de poussière qui a temporairement assombri l'étoile. Cet événement stellaire sans précédent a perturbé la période d'oscillation de 400 jours de l'étoile, que les astronomes avaient mesurée pendant plus de 200 ans. (NASA, ESA, Elizabeth Wheatley - STScI)*



la surface d'une étoile. C'est un phénomène totalement nouveau qu'ils peuvent observer directement et dont ils peuvent résoudre les détails de surface avec Hubble – ils voient l'évolution stellaire se dérouler en temps réel sous leurs yeux.

L'explosion titanesque de 2019 a probablement été causée par un panache convectif, de plus d'un million de kilomètres de diamètre, qui a bouillonné depuis les profondeurs de l'étoile. Il a produit des chocs et des pul-

sations qui ont fait exploser une partie de la photosphère, laissant l'étoile avec une grande surface froide sous le nuage de poussière produit par le morceau de photosphère qui s'est refroidi. Bételgeuse lutte maintenant pour se remettre de cette blessure.

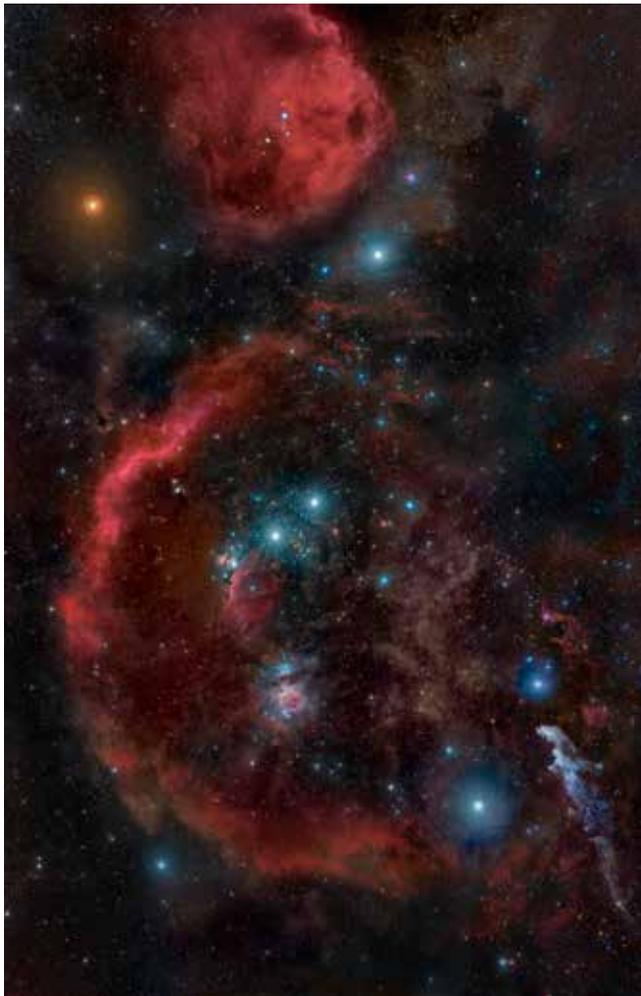
Pesant plusieurs fois le poids de la Lune, le fragment de photosphère a été éjecté dans l'espace et s'est refroidi pour former un nuage de poussière qui nous a masqué l'étoile. L'assombrissement, qui a commencé fin 2019 et a duré quelques mois, était facilement perceptible à l'œil nu.

Plus fantastique encore, la pulsation de 400 jours de la supergéante a maintenant disparu, peut-être temporairement. Pendant près de 200 ans, les astronomes ont mesuré ce rythme comme en témoignent les variations de luminosité et les mouvements de surface de Bételgeuse. Sa perturbation témoigne de la férocité de l'éruption.

Selon les astronomes, les cellules de convection à l'intérieur de l'étoile, qui sont à l'origine de la pulsation régulière, pourraient être agitées comme dans un tambour déséquilibré de lave-linge. Les spectres indiquent que les couches externes sont peut-être revenues à la normale, mais que la surface frémit toujours comme un dessert à la gélatine alors que la photosphère se reconstruit.

Le télescope spatial Webb de la NASA pourrait être en mesure de détecter les matériaux éjectés en train de s'éloigner de l'étoile.

*La région d'Orion, de Bételgeuse en haut à gauche, à Rigel en bas à droite.  
(Rogelio Bernal Andreo, CC BY-SA 3.0)*



## Gaia révèle le passé et l'avenir du Soleil

Basé sur un communiqué ESA

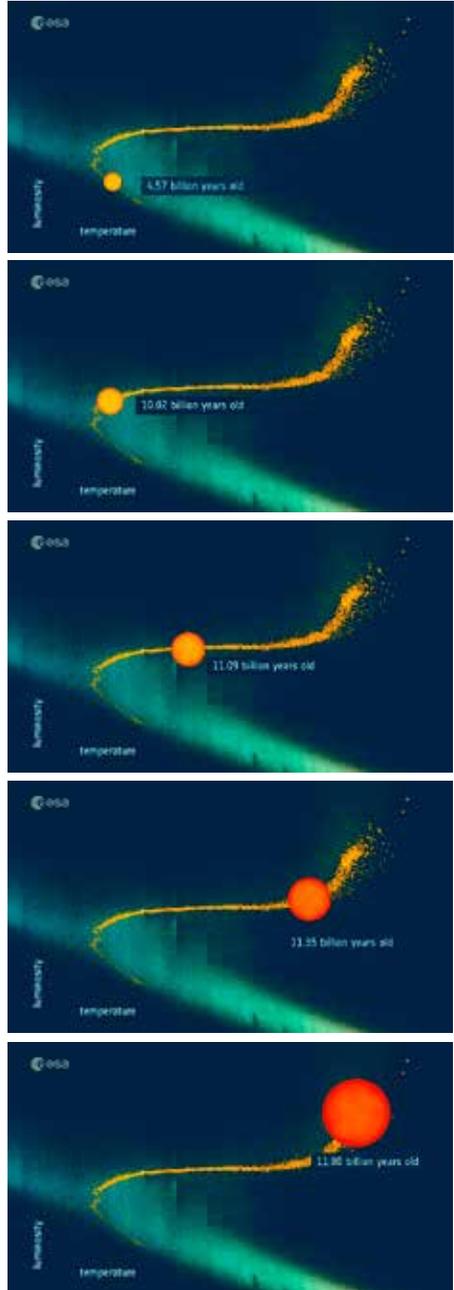
La troisième version majeure des données de Gaia (DR3) a été rendue publique le 13 juin 2022. L'un des principaux résultats est une base de données des propriétés intrinsèques de centaines de millions d'étoiles. Ces paramètres comprennent leur température, leur taille et leur masse.

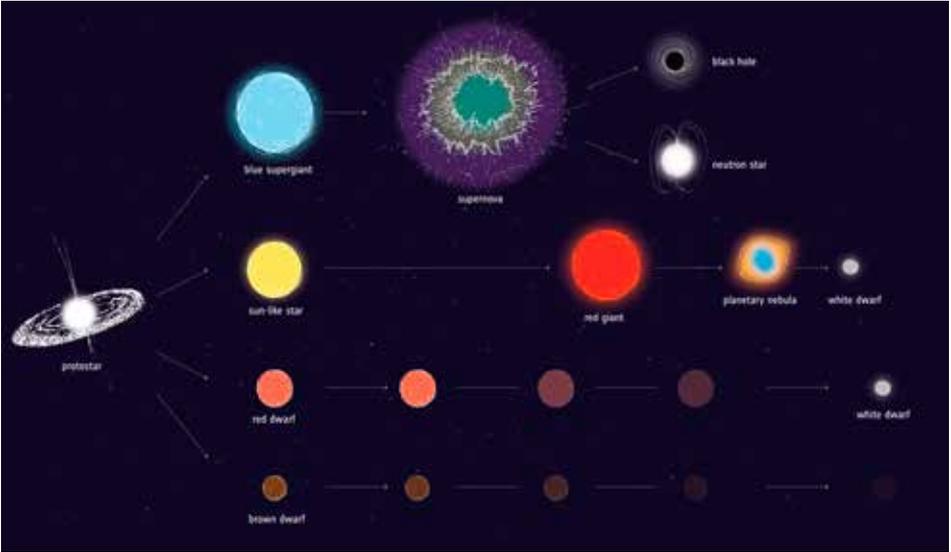
Alors que la masse de l'étoile change relativement peu au cours de sa vie, sa température et sa taille varient fortement à mesure qu'elle vieillit. Ces changements sont déterminés par le type de réactions de fusion nucléaire qui ont lieu à l'intérieur de l'étoile à ce moment-là.

Avec un âge d'environ 4,57 milliards d'années, le Soleil est actuellement dans son âge moyen, fusionnant l'hydrogène en hélium et étant généralement plutôt stable, voire stationnaire. Ce ne sera pas toujours le cas. Lorsque l'hydrogène s'épuisera dans son noyau et que le processus de fusion commencera à changer, le Soleil se transformera en étoile géante rouge, abaissant du même coup sa température de surface. La manière exacte dont cela se produit dépend de la masse de l'étoile et de sa composition chimique. C'est là que DR3 entre en jeu.

Les chercheurs ont concentré leurs efforts sur les étoiles dont la température de surface se situe entre 3 000 et 10 000 K, car ce sont les étoiles qui vivent le plus longtemps et qui peuvent donc révéler l'histoire de la Voie lactée. Ce sont également des candidates prometteuses pour la recherche d'exoplanètes, car

*L'évolution future du Soleil dans le diagramme de Hertzsprung-Russell, telle qu'elle ressort de la version 3 des données de la mission Gaia de l'ESA. La première image le montre à son âge actuel, la dernière, juste avant sa contraction en naine blanche.*  
ESA/Gaia/DPAC, CC BY-SA 3.0 IGO





elles ressemblent beaucoup au Soleil, dont la température de surface est de 6000K.

L'échantillon a été filtré pour ne montrer que les étoiles qui avaient la même masse et la même composition chimique que le Soleil. Les étoiles sélectionnées se sont placées le long d'une ligne à travers le diagramme H-R qui représente l'évolution complète du Soleil. Cela a révélé la manière dont la température et la luminosité varieront au fur et à mesure qu'elle vieillira.

D'après ces travaux, il apparaît clairement que le Soleil atteindra une température maximale à l'âge d'environ 8 milliards d'années, puis il se refroidira et grossira pour devenir une étoile géante rouge vers 10 ou 11 milliards d'années. Après cette phase il deviendra une naine blanche peu lumineuse.

Il est essentiel de trouver des étoiles semblables à la nôtre, des « analogues solaires », pour comprendre comment nous nous situons dans l'Univers au sens large. Si nous ne comprenons pas le Soleil – et il y a beaucoup de choses que nous ne savons pas à son sujet – comment pouvons-nous espérer comprendre toutes les autres étoiles. Il est assez ironique de constater que le Soleil est l'étoile la plus proche et la plus étudiée, mais que sa

*Illustration de certaines voies d'évolution possibles pour des étoiles de différentes masses.*

*Certaines protoétoiles, les naines brunes, ne sont jamais assez chaudes pour s'enflammer et devenir des étoiles à part entière, elles se contentent de se refroidir et de disparaître. Les naines rouges, le type d'étoile le plus courant, continuent de brûler jusqu'à ce qu'elles aient transformé tout leur hydrogène en hélium, devenant ainsi des naines blanches.*

*Les étoiles semblables au Soleil se transforment en géantes rouges avant de laisser échapper leur enveloppe extérieure dans une nébuleuse colorée, tandis que leur cœur s'effondre en naine blanche.*

*Les étoiles les plus massives s'effondrent brusquement une fois qu'elles ont épuisé leur combustible, déclenchant une explosion de supernova ou un sursaut gamma, et laissant derrière elles une étoile à neutrons ou un trou noir.*

*(ESA)*

proximité nous oblige à l'étudier avec des instruments complètement différents de ceux que nous utilisons pour observer les autres. Les analogues solaires du même âge que le Soleil permettent de combler ce fossé observationnel.

Pour identifier ces jumeaux solaires dans les données de Gaia, les astronomes ont recherché des étoiles dont la température, la composition, la masse et le rayon sont les mêmes que pour le Soleil actuel. Ils ont trouvé 5 863 étoiles qui correspondaient à leurs critères.

Les chercheurs peuvent maintenant aborder de nombreuses questions. Par exemple, les

analogues solaires ont-ils des systèmes planétaires semblables au nôtre? Est-ce que tous les analogues solaires tournent sur eux-mêmes à une vitesse semblable à celle du Soleil?

Avec la sortie des données 3, l'instrumentation extrêmement précise de Gaia a permis de déterminer les paramètres stellaires d'un plus grand nombre d'étoiles avec plus de précision que jamais auparavant. Cette précision se répercutera sur de nombreuses autres études. Ainsi une connaissance plus précise des étoiles peut aider à étudier les galaxies, dont la lumière est l'amalgame de milliards d'étoiles individuelles.

## **Le Diagramme de Hertzsprung-Russell**

Le diagramme de Hertzsprung-Russell (HR) est un outil fondamental pour étudier les populations d'étoiles et leur évolution.

Dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, les efforts des astronomes étaient centrés sur la classification des raies spectrales qui apparaissent dans l'arc-en-ciel produit lorsque la lumière d'une étoile est divisée à l'aide d'un prisme. Annie Jump Cannon a conçu une séquence de classification spectrale qui ordonnait les étoiles en fonction de l'intensité des raies spectrales. On a découvert par la suite que cet ordre était directement lié à la température des étoiles. Antonia Maury a établi une classification distincte basée sur la largeur de certaines raies. Plus tard il s'est avéré que cette largeur était liée à la luminosité et à l'âge d'une étoile.

La corrélation de ces deux propriétés permet de représenter toutes les étoiles de l'Univers sur un seul diagramme. Ce diagramme est devenu l'une des pierres angulaires de l'astrophysique. Conçu indépendamment en 1911 par Ejnar Hertzsprung et en 1913 par Henry Norris Russell, le diagramme HR porte la luminosité intrinsèque d'étoiles en fonction de leur température de surface effective. Ce faisant, il révèle comment les étoiles évoluent tout au long de leur long cycle de vie.

Le diagramme de Hertzsprung-Russell, obtenu en sélectionnant les étoiles dans le deuxième catalogue de Gaia, est le plus détaillé à ce jour réalisé sur l'ensemble du ciel. Il contient environ cent fois plus d'étoiles que celui obtenu grâce aux données de la mission Hipparcos de l'ESA, le prédécesseur de Gaia, dans les années 1990. Ce nouveau diagramme contient tellement d'informations très précises que les astronomes ont pu identifier des détails fins qui n'avaient jamais été notés auparavant.

Le diagramme de Hertzsprung-Russell peut être imaginé comme un portrait de famille stellaire : les étoiles sont regroupées dans différentes régions du diagramme en fonction principalement de leur masse, de leur composition chimique, de leur âge et des étapes du cycle de vie stellaire. Les informations sur les distances stellaires sont fondamentales pour calculer la luminosité réelle, ou magnitude absolue, des étoiles.

Les étoiles les plus brillantes sont représentées dans la partie supérieure du diagramme, tandis que les étoiles les moins brillantes se trouvent dans la partie inférieure. Les étoiles plus bleues, dont la surface est plus chaude, se trouvent à gauche, et les étoiles plus rouges, dont la surface est plus froide, à droite. L'échelle de couleurs de cette image ne représente pas la couleur des

étoiles, mais le nombre d'étoiles dans chaque partie du diagramme : le noir représente les étoiles les moins nombreuses, tandis que le rouge, l'orange et le jaune correspondent aux étoiles les plus nombreuses.

La grande bande qui traverse le graphique en diagonale est la « séquence principale ». C'est là que se trouvent les étoiles « adultes » qui produisent de l'énergie en transformant l'hydrogène en hélium. Les étoiles massives, qui ont des couleurs plus bleues ou plus blanches, se trouvent à l'extrémité supérieure gauche de la séquence principale, tandis que les étoiles de masse intermédiaire comme le Soleil, caractérisées par des couleurs jaunes, sont situées à mi-chemin. Les étoiles plus rouges et de faible masse se trouvent en bas à droite.

En vieillissant, les étoiles gonflent et deviennent plus brillantes et plus rouges. Les étoiles qui connaissent ce phénomène sont représentées sur le diagramme par le bras vertical qui part de la séquence principale et tourne vers la droite. C'est ce qu'on appelle la branche des géantes rouges.

Tandis que les étoiles les plus massives se transforment en géantes rouges et explosent en supernovæ, les étoiles comme le Soleil terminent leurs jours de manière moins spectaculaire, se transformant finalement en naines blanches – les noyaux chauds des étoiles mortes. Ces dernières se trouvent dans la partie inférieure gauche du diagramme.

Le grand bond en avant réalisé entre Hipparcos et Gaia est particulièrement visible dans la région des naines blanches du diagramme. Alors qu'Hipparcos n'avait obtenu des mesures

de distance fiables que pour une poignée de naines blanches, plus de 35 000 objets de ce type sont inclus ici. Cela permet aux astronomes de voir la signature de différents types de naines blanches, de sorte qu'une différenciation peut être faite entre celles dont le cœur est riche en hydrogène et celles dominées par l'hélium.

**Plus de quatre millions d'étoiles sont représentées sur ce diagramme HR réalisé à partir des données de Gaia DR2. (DPAC; Carine Babusiaux, IPAG; Université Grenoble Alpes, GEPI - Observatoire de Paris; ESA/Gaia/DPAC, CC BY-SA 3.0 IGO)**

