



LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

DES MASQUES AUX USAGES DÉVOYÉS

Les masques de protection sont souvent mal utilisés, contestés ou détournés. Le résultat d'une perception brouillée des risques sanitaires et des décisions administratives.



Masque FFP2 (pour *filtrant facial piece*), chirurgical, grand public dit « alternatif », en tissu artisanal, à usage unique, lavable... La rue est aujourd'hui un laboratoire social où les codes sanitaires du gouvernement soumettent à rude épreuve les comportements quotidiens. Officiellement, le respect des gestes barrières constitue l'injonction qui domine la généralisation de cette protection faciale. S'y conformer n'est pourtant pas le nerf de la confiance collective.

Depuis le déconfinement, les dévoiements de l'usage des masques sont nombreux sans que cela ne suscite de fortes réprobations. Réutilisés à de multiples reprises, les masques chirurgicaux sont rarement changés deux fois par jour comme il est préconisé. S'il doit couvrir le nez, la bouche et le menton, on le voit fréquemment accroché autour du cou de personnes téléphonant, voire fumant une cigarette... Aussi, la décontraction de la population concernant sa propre protection contraste avec la façon dont elle

percevait les risques il y a peu. Début mai, seuls 21 % des Français n'éprouvaient pas de peur associée à l'épidémie de Covid-19, selon l'enquête du Cevipof sur les attitudes face à la pandémie.

Comprendre cette contradiction apparente suppose de prêter attention à l'application concrète des normes sanitaires. Face à la pénurie d'équipements de protection durant l'état d'urgence sanitaire, le Conseil

**Libertés et port
du masque : l'expertise
juridique est pointue
et technique**

d'État a été saisi par plusieurs dizaines de requêtes en référé-liberté émanant de professionnels de santé, d'avocats, de détenus, d'associations de défense des droits humains, de la magistrature, de victimes ou de précaires. Ces procédures d'urgence ont pour objet de dénoncer les atteintes graves

et illégales à une liberté fondamentale émanant de l'administration.

Le nombre anormalement élevé de ces recours témoigne de la difficulté pratique à établir la démarcation entre le droit à la santé des citoyens et les libertés fondamentales. Dans chaque jugement, l'impératif du masque est discuté à l'aune des risques de contamination selon la quantité, la taille des gouttelettes de toux de personnes infectées, les soins opérés sur les voies respiratoires, la vitesse de propagation du virus au regard de la densité carcérale, la durée de rétention des personnes testées positives...

À partir d'un état des connaissances scientifiques, ces professionnels du droit évaluent les risques sanitaires. Ils ont ainsi rappelé au maire de Sceaux, souhaitant rendre obligatoire le port du masque dans l'espace public que celui-ci ne pouvait pas être imposé en l'absence de circonstances particulières. La délimitation de nos libertés individuelles passe ainsi par une expertise juridique pointue, dont la technicité peut apparaître brutale aux yeux des citoyens et des élus locaux. Dès lors, la perception collective, tant de l'aléa biologique que de la légitimité du pouvoir de l'autorité en question, est brouillée.

À cette difficulté d'appréciation des risques d'exposition sur le terrain s'ajoute le florilège des masques exotiques « qui font mieux que rien », depuis le bandana négligemment posé en foulard ou noué à l'arrière du crâne en gangster, à celui en peau de python et d'iguane, proposé par un artisan en Floride, destiné à lutter contre ces reptiles envahissants de la région. À visée esthétique ou militante, le masque acquiert au cours du déconfinement des significations allant bien au-delà du seul impératif sanitaire pour lequel il a été généralisé.

Dans cette polyphonie sociale où le danger ne fait pas consensus, le porter relève autant de la prévention que d'un rituel collectif au sein duquel chacun tente de trouver sa place en se singularisant dans ce nouveau formalisme. ■

VIRGINIE TOURNAY, biologiste de formation, est politologue et directrice de recherche du CNRS au Cevipof, à Sciences Po, à Paris.

**Vous êtes un fidèle lecteur de
Pour la Science et vous êtes concerné
par la vie de votre magazine ?**

Q u'il s'agisse de choisir la prochaine couverture du magazine, de débattre des thématiques abordées ou de construire un nouveau format de revue, votre point de vue nous est précieux et nous permet de répondre au mieux à vos attentes. C'est en maintenant le lien avec vous que nous souhaitons avancer.

Pour cela, nous souhaitons constituer un **Club de lecteurs**. Pour y participer, il s'agirait dans un premier temps de nous faire part de votre désir de contribuer à ce projet et de nous en dire plus sur vous.

Pour plus de détails et pour répondre au formulaire d'inscription, merci de vous connecter à l'adresse suivante :

pouirlascience.fr/statics/club-lecteurs

**Nous avons
besoin de votre
avis !**

**En vous remerciant pour
votre fidélité et pour le
temps accordé,**

L'équipe de *Pour la Science*



L'ESSENTIEL

> La structure de la Voie lactée, notamment le nombre de ses bras spiraux, est encore mal connue.

> De récents programmes d'observation, tels que *Bessel* dans le domaine radio, ont permis de dresser la carte de la Galaxie la plus précise à ce jour.

> La Voie lactée présenterait une barre centrale, quatre bras spiraux principaux et des segments de bras plus petits, comme celui où se trouve le Soleil.

LES AUTEURS

MARK J. REID
astronome
à l'observatoire
d'astrophysique
Smithsonian,
du centre
d'astrophysique
Harvard-Smithsonian,
aux États-Unis

XING-WU ZHENG
professeur
d'astronomie
à l'université
Nanjing,
en Chine

Il nous est impossible d'avoir une vue d'ensemble de la Voie lactée. Des observations nous donnent néanmoins une idée de sa structure, illustrée par cette représentation d'artiste, qui montre une barre centrale très lumineuse et quatre bras spiraux principaux.



Combien de bras pour la Voie lactée?

La structure de notre galaxie ne nous est pas bien connue. Mais à l'aide de radiotélescopes, les astronomes viennent d'en brosser un portrait plus précis, où se dessinent mieux les bras spiraux et la position du Système solaire.

Bravant les océans et les continents sauvages, les explorateurs du passé partageaient à l'aventure, dressant au passage une carte des contrées qu'ils découvraient. Depuis cinquante ans, des explorateurs d'un nouveau genre se sont intéressés à une nouvelle *terra incognita*: l'espace. Ils ont envoyé des sondes pour étudier les planètes et les autres corps du Système solaire.

Nous commençons à avoir une bonne vision de ce voisinage proche. Cependant, celui plus étendu de la Voie lactée reste encore assez flou. La raison est simple: nous ne pouvons pas y aller pour y jeter un coup d'œil. L'idée d'expédier une machine sur un voyage de plusieurs millions d'années pour sortir de la Galaxie afin de l'observer dans son ensemble est complètement irréaliste. De fait, la Voie lactée cache bien des mystères que les astrophysiciens ont du mal à percer. Par exemple, de combien de bras spiraux la Galaxie est-elle dotée? Où se trouve précisément le Système solaire dans cet ensemble?

Grâce à de récents projets astronomiques, nous commençons à cartographier ce voisinage de l'intérieur. Avec les données collectées, nous construisons une image de plus en plus nette de la structure galactique. Cette entreprise d'envergure a impliqué plusieurs télescopes

optiques et radio. Nous avons eu la chance d'obtenir près de cinq mille heures d'observation sur le réseau de radiotélescopes VLBA (*Very Long Baseline Array*). Nos premiers résultats précisent déjà la physionomie générale de la Voie lactée. Mais en plus d'avoir une meilleure idée de son aspect, nous commençons aussi à mieux comprendre pourquoi les galaxies comparables à la nôtre présentent des motifs spiraux et comment ceux-ci se forment.

L'étude des galaxies spirales prend sa source au début des années 1800. William Parsons, troisième comte de Rosse, en Irlande, a fait construire un télescope de 183 centimètres de diamètre, un géant pour l'époque, d'ailleurs surnommé le *Léviathan de Parsonstown*. Grâce à cet instrument, il a observé et dessiné ce que nous savons aujourd'hui être la galaxie du Tourbillon (M51). Ces travaux ont mis en évidence une des caractéristiques les plus singulières de M51, son tracé en spirale.

À cette époque, les savants n'avaient aucune indication sur la distance à laquelle se trouvait cet objet (ni les autres «nébuleuses» similaires) ni même sur les dimensions de la Voie lactée. Il était alors impossible de dire si le Tourbillon était une petite structure dans notre Galaxie ou un objet très grand et très lointain. Les débats sur la nature des nébuleuses se sont poursuivis pendant près d'un



siècle. Au début des années 1920, Edwin Hubble a définitivement tranché la question. En utilisant une technique développée par l'astronome Henrietta Leavitt pour mesurer les distances de certaines étoiles, il a montré que le Tourbillon et les autres galaxies se trouvaient loin au-delà de la Voie lactée. Cette découverte a aussi mis fin à l'idée que la Voie lactée englobait la totalité de l'Univers.

Quand on observe les galaxies lointaines, on distingue trois grandes catégories: les spirales, les elliptiques et les irrégulières. Les astronomes ont assez vite établi que nous vivons dans une galaxie spirale (en analysant les mouvements du gaz dans le disque galactique, la vaste région en forme de galette qui constitue la partie principale de la Voie lactée). Mais quel est son aspect précisément? Toutes les galaxies spirales ne sont pas identiques, comme l'illustrent les galaxies spirales voisines NGC 1300 et Messier 101, ou M101 (*voir les photos ci-dessous*).

La première, NGC 1300, présente une structure allongée et brillante dans sa zone centrale, que l'on nomme une barre, et deux bras bleutés spiraux qui démarrent aux extrémités de la barre et se courbent progressivement vers l'extérieur. À l'inverse de NGC 1300, la galaxie M101, dite aussi «du Moulinet», est dépourvue d'une barre centrale brillante, mais a davantage de bras spiraux.

On observe des barres dans la plupart des galaxies spirales et on pense que ces structures ont pour origine des instabilités gravitationnelles dans la partie la plus dense du disque galactique. Ensuite, le mouvement d'entraînement dû à la rotation de la barre donne naissance aux bras spiraux. D'autres mécanismes sont également proposés pour expliquer les bras: des instabilités gravitationnelles dues à d'importantes concentrations de masse dans le disque ou à des galaxies voisines. Les bras spiraux tendent à briller avec une lumière bleue; celle-ci est émise par de gigantesques pouponnières de gaz où se forment en grand nombre des étoiles massives.

QUEL GENRE DE SPIRALE ?

Les astronomes ont longtemps pensé que la Voie lactée partageait des caractéristiques de ces deux galaxies. Elle aurait une barre comme NGC 1300 et plusieurs bras à l'image de M101. Mais au-delà de ces grandes caractéristiques, les chercheurs sont loin d'être unanimes sur les attributs de notre Galaxie. Des observations dans l'infrarouge du télescope spatial *Spitzer*, réalisées il y a plus de dix ans, suggéraient que la Galaxie ne possédait que deux bras. Mais des analyses portant sur les émissions radio de nuages de gaz interstellaires contenant de l'hydrogène neutre et du monoxyde de carbone, >

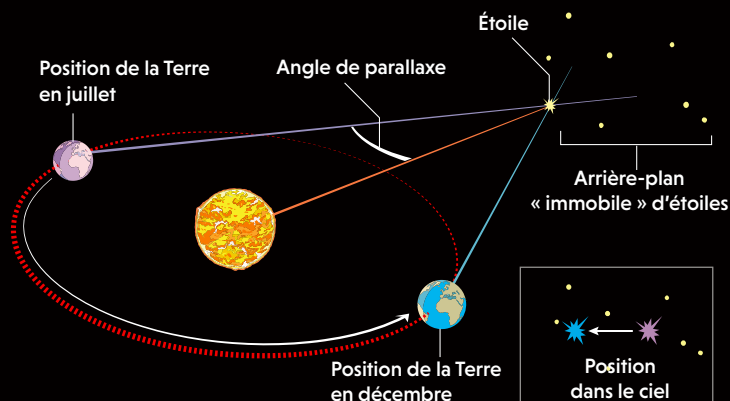
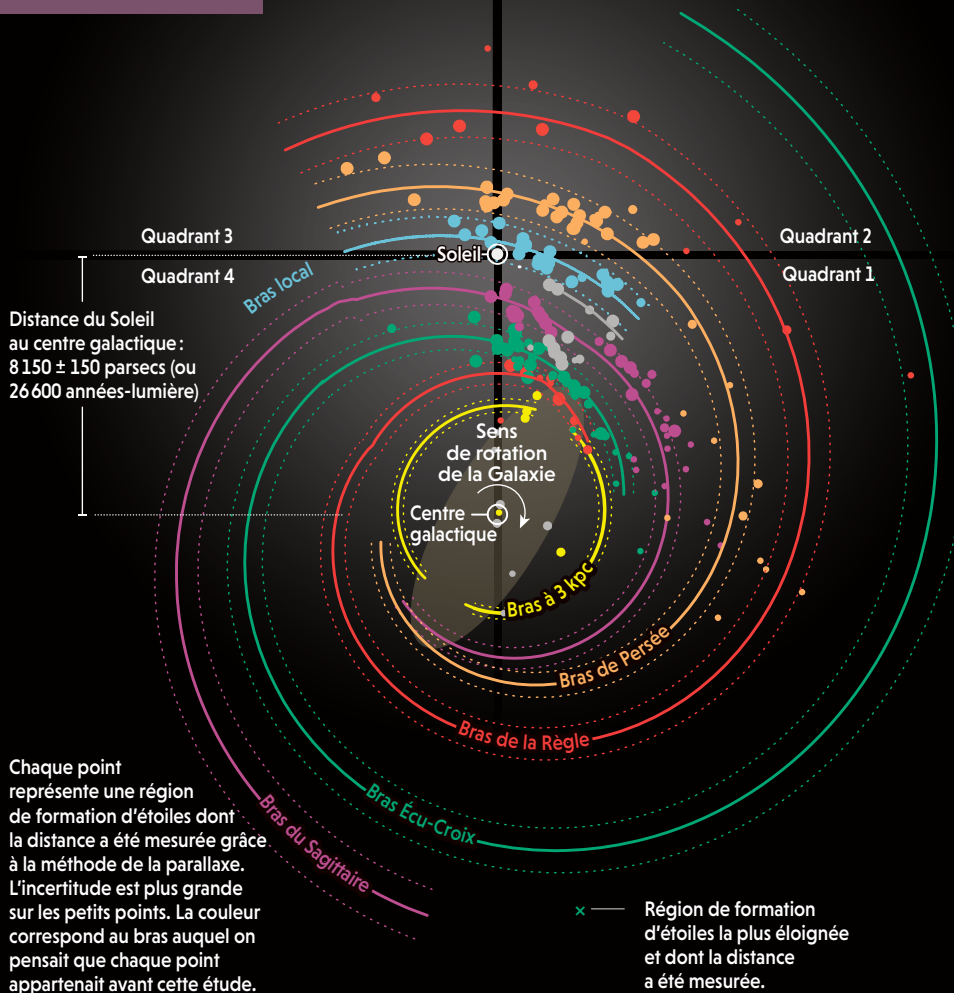
La Voie lactée est une galaxie spirale, mais quelle est sa structure précise? La galaxie NGC 1300 (à gauche) est constituée d'une magnifique barre centrale, de 100 000 années-lumière de longueur, et de deux bras spiraux. La galaxie M101 est dépourvue de barre, mais présente quatre bras spiraux. La Voie lactée partagerait des attributs de ces deux exemples.



© Nasa, ESA

UN TOURBILLON D'ÉTOILES

À partir des mesures de distances collectées durant des milliers d'heures d'observation (ci-dessous), les chercheurs ont construit cette image de la Voie lactée (à droite). Les données mettent en évidence quatre bras spiraux s'enroulant autour d'une barre centrale d'étoiles. À l'intersection de quatre quadrants qui subdivisent la Galaxie, le Soleil réalise un tour de la Galaxie en 212 millions d'années. Il se trouve près d'un fragment de bras spiral (en bleu). De futures observations menées depuis l'hémisphère Sud de la Terre permettront de réaliser des mesures dans le quatrième quadrant.



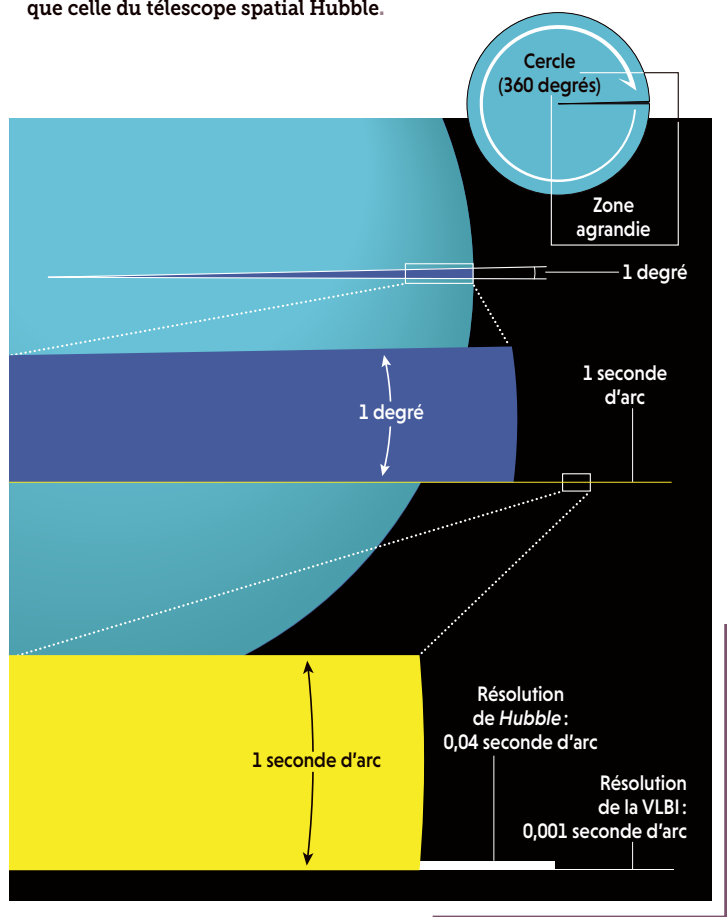
LA PARALLAXE TRIGONOMÉTRIQUE

Les astronomes mesurent les distances interstellaires en étudiant le décalage, ou parallaxe angulaire, de la position d'une étoile quand elle est observée depuis deux points opposés de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Plus une étoile est proche, plus la parallaxe est grande. Connaissant la distance Terre-Soleil et l'angle de parallaxe, un simple calcul de trigonométrie permet de calculer la distance de l'étoile.



UN ŒIL DE LYNX TOURNÉ VERS LE CIEL

Pour mesurer la minuscule parallaxe d'étoiles très lointaines, se trouvant de l'autre côté de la Galaxie, les télescopes doivent avoir une résolution angulaire extrême. Cela n'est possible qu'en combinant les observations simultanées de plusieurs radiotélescopes à travers la planète. Cette illustration montre la performance de la technique VLBI (interférométrie à très longue base), dont la résolution est quarante fois meilleure que celle du télescope spatial Hubble.



> surtout présents dans les bras spiraux, laissaient penser que la Voie lactée avait quatre bras. Autre interrogation, les astronomes discutaient de la place du Soleil par rapport au centre de la Galaxie et à quelle distance il se trouve du plan du disque galactique.

Les premiers indices de l'existence de bras galactiques remontent à près de soixante-dix ans. Dans les années 1950, l'Américain William Morgan et ses collègues ont mesuré la distance d'environ 900 étoiles bleues et lumineuses. En positionnant ces astres sur une carte, ils ont fait apparaître trois segments de bras spiraux: le bras du Sagittaire, le bras local (ou bras d'Orion) et le bras de Persée. Peu après, Morgan et son équipe ont confirmé ce résultat en

utilisant cette fois les émissions électromagnétiques de nuages d'hydrogène neutre (une raie d'émission caractéristique à la longueur d'onde de 21 centimètres). Quand le gaz est en mouvement par rapport à la Terre, la longueur d'onde enregistrée se décale à cause de l'effet Doppler (vers des longueurs d'onde plus courtes si le gaz se rapproche ou plus grandes s'il s'éloigne). Les chercheurs ont ainsi mesuré la vitesse du gaz dans la Galaxie, fournissant des indices sur sa distribution.

Pour cartographier la Voie lactée, les astronomes utilisent un système de coordonnées adaptées ayant pour origine le Soleil: par analogie avec la longitude et la latitude sur Terre, on définit la longitude galactique (l) et la latitude galactique (b). La longitude galactique vaut zéro dans la direction du centre galactique et augmente suivant le plan de la Voie lactée tel qu'on le voit depuis l'hémisphère nord. La latitude galactique dénote l'angle par rapport au plan de la Galaxie.

En traçant des graphiques représentant la vitesse du gaz (hydrogène neutre, mais aussi monoxyde de carbone) en fonction de la longitude, Morgan et ses collègues ont obtenu des arcs continus. Ces derniers pouvaient être interprétés comme des bras spiraux. Cette approche, cependant, est confrontée à de nombreuses difficultés (ambiguïtés sur les distances et incertitudes assez élevées) qui ne permettent pas de préciser avec assurance la structure spirale de la Galaxie.

Pour observer les objets de la Galaxie, les astronomes sont confrontés à un obstacle: la présence de grandes quantités de poussières dans le milieu interstellaire. Ces poussières absorbent une part non négligeable de la lumière qui se propage dans la Voie lactée. Dès lors, dans à peu près toutes les directions où nous regardons, notre vue ne porte pas très loin dans le disque galactique. La taille de la Voie lactée présente un second obstacle. La lumière émise par des astres se trouvant de l'autre côté de la Galaxie met plus de 50 000 ans à nous parvenir. Du fait de ces distances, il est très difficile de déterminer quelles étoiles sont proches et lesquelles sont vraiment lointaines.

UNE GALAXIE POUSSIÉREUSE

Ces dernières années, de nouveaux télescopes spatiaux sensibles à la lumière visible et des radiotélescopes au sol sont entrés en fonction. Ils fournissent de nombreuses informations sur les questions qui nous intéressent. Par exemple, la mission *Gaia*, lancée en 2013, a pour objectif de mesurer avec précision la distance de plus de un milliard d'étoiles dans la Galaxie. Ces données révolutionneront certainement nos connaissances sur les différentes populations stellaires présentes dans la Voie lactée. Mais parce que cet observatoire

spatial travaille dans la gamme optique, dont la lumière est absorbée par la poussière interstellaire, *Gaia* ne peut pas sonder facilement des bras galactiques lointains. Par chance, ces nuages de particules sont transparents pour les ondes radio. Ce qui fait de ces dernières un bon outil pour explorer l'intégralité du disque et en cartographier la structure.

Actuellement, il existe deux grands projets de cartographie de la Voie lactée qui utilisent la même technique d'astronomie radio: l'interférométrie à très longue base ou VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*). Le programme *Vera* (*VLBI exploration of radio astronomy*) implique quatre radiotélescopes japonais répartis sur tout l'archipel. *Bessel* (*Bar and Spiral Structure Legacy*) s'appuie sur les dix radiotélescopes du VLBA (distribués de Hawaï aux îles Vierges américaines dans les Caraïbes). Les télescopes de ces deux dispositifs sont séparés par des distances comparables au diamètre de la Terre. Dès lors, ces réseaux atteignent une résolution angulaire qui surpasse celle de n'importe quel autre télescope actuel, quelles que soient les longueurs d'onde considérées.

La mise en place technique de la VLBI est délicate. Les radiotélescopes du réseau doivent effectuer leurs observations simultanément et

télescope spatial Hubble présente une résolution de 0,04 seconde d'arc.

Grâce à la technique VLBI et la précision angulaire associée, nous calculons la distance d'étoiles lointaines en utilisant la méthode de la parallaxe. Cela consiste à observer un objet depuis deux positions différentes et à mesurer le déplacement apparent par rapport à un arrière-plan très lointain et considéré comme fixe. On peut reproduire cet effet avec son pouce, bras tendu, que l'on examine alternativement avec l'œil gauche puis l'œil droit. Nos yeux étant séparés de quelques centimètres, le pouce semble bouger d'un angle, la parallaxe, d'environ six degrés quand on ferme un œil puis l'autre. Si l'on connaît la distance qui sépare les deux points d'observation et que l'on mesure la parallaxe, on peut calculer la distance. Plus un objet est lointain, plus la parallaxe est faible, d'où la nécessité de faire appel à la VLBI pour les grandes distances au sein de la Voie lactée.

DES MASERS INTERSTELLAIRES

Pour cartographier les bras spiraux de la Galaxie, nous nous sommes intéressés à un type particulier d'étoiles jeunes et massives. Ces astres, à courte durée de vie, sont souvent associés aux régions des bras où la formation d'étoiles est intense. Par ailleurs, ils ont une température si élevée qu'ils ionisent le gaz environnant: ce dernier brille alors de la lumière bleue si caractéristique des bras spiraux que nous observons dans les galaxies lointaines. Mais de notre point de vue, plongés dans la Voie lactée, cette lumière bleue et ces étoiles sont difficiles à voir directement à cause de la poussière interstellaire.

La solution se trouve en périphérie de ces régions fortement ionisées: les molécules d'eau et de méthanol y sont excitées par la lumière de l'étoile et constituent alors de puissantes sources d'émission radio. Il s'agit en fait d'un phénomène naturel de «maser» dont le rayonnement est peu atténué par la poussière galactique. Le maser est l'équivalent en radio des lasers dans le domaine optique. Dans le contexte astrophysique, les émissions maser proviennent de nuages de gaz aussi vastes que le Système solaire et d'une masse comparable à Jupiter. Sur une image radio du ciel, ces régions forment des «points» très brillants, auxquels il est possible d'appliquer la méthode de la parallaxe pour déterminer leur distance.

Avec les projets *Bessel* et *Vera*, les astronomes ont calculé (à partir des masers et de la parallaxe) la distance de près de 200 jeunes étoiles chaudes à travers la Voie lactée. Ces résultats nous donnent un assez bon aperçu d'environ un tiers de la Galaxie et mettent en évidence la présence de quatre bras principaux. ➤



La Voie lactée serait dotée d'une barre centrale et de quatre bras spiraux



synchroniser les données recueillies grâce aux meilleures horloges atomiques. Les chercheurs centralisent ensuite ces informations sur un ordinateur qui doit calculer des corrélations croisées de tous les signaux. Après une phase de calibration importante, le résultat est une image numérique de ce que l'on pourrait voir si nos yeux étaient séparés l'un de l'autre par une distance supérieure à 12 000 kilomètres (le diamètre terrestre). On atteint ainsi une résolution angulaire incroyable, meilleure que 0,001 seconde d'arc (il y a 3 600 secondes d'arc dans 1 degré et l'ensemble de la sphère céleste fait 360 degrés). Par comparaison, l'œil humain est capable de distinguer des éléments séparés au mieux de 40 secondes d'arc, et le

> La carte montre également que le Soleil est très proche d'une cinquième structure, le bras local, qui semble être un fragment isolé de bras spiral. Ce fragment est aussi nommé l'«éperon d'Orion», ou «éperon local». On pensait, comme le suggère ce nom, que cette structure mineure était une sorte de ramification annexe d'un bras spiral, comme on en voit dans d'autres galaxies. Cette interprétation pourrait être erronée. Dans nos données, ce fragment ressemble plutôt à un segment orphelin d'un bras qui s'enroule sur moins d'un quart de la Voie lactée.

Malgré sa longueur réduite et son statut secondaire, ce tronçon de bras hébergerait une activité de formation d'étoiles massives comparable à celle du bras de Persée voisin. D'ailleurs, certains astronomes pensent que le bras de Persée est l'un des deux bras principaux de la Galaxie (l'autre étant le «bras Écu-Croix», aussi nommé «bras du Centaure»). Nous constatons cependant que la formation d'étoiles massives y diminue fortement alors que le bras se replie vers le centre de la Galaxie. Le bras de Persée n'apparaîtrait donc probablement pas aussi important pour un observateur extérieur.

En utilisant la position des étoiles massives et en modélisant leur mouvement, nous avons estimé certaines caractéristiques de la Voie lactée. Le Soleil se trouve à 8 150 parsecs (environ 26 600 années-lumière) du centre galactique, avec une incertitude de plus ou moins 150 parsecs. Cette valeur est inférieure à celle de 8 500 parsecs officiellement recommandée depuis des décennies par l'Union astronomique internationale. Nous avons aussi déterminé que le Système solaire se déplace à une vitesse de 236 kilomètres par seconde sur son orbite, soit près de huit fois celle de la Terre autour du Soleil. À partir de ces données, on peut déduire que le Soleil effectue un tour de la Galaxie en 212 millions d'années.

UNE FORME DE CHIPS

Si l'on ne considère pas la barre centrale, la partie interne du disque de poussière galactique (entre l'orbite du Soleil et le centre galactique) est très mince et quasiment plate. Ce résultat est connu depuis longtemps; en revanche, la position du Soleil par rapport à ce plan était davantage débattue. Récemment, le consensus chez les astronomes était que le Système solaire était situé à 25 parsecs (82 années-lumière) au-dessus du plan. Nous obtenons une valeur un peu différente. En ajustant le plan galactique grâce à la position des étoiles massives, nous concluons que le Soleil se trouve seulement 6 parsecs (20 années-lumière) au-dessus du plan, une différence qui reste à élucider mais qui confirme que nous sommes situés très près du plan galactique.

Depuis quelques années, les astronomes ont découvert que le disque de poussière n'est

pas parfaitement plan et prend une forme de chips. De nombreuses expériences ont confirmé cette observation (*voir, par exemple, la figure page ci-contre*). Nous confirmons aussi ce résultat avec nos étoiles massives, ce qui renforce la pertinence de notre méthode d'observation.

Pour se repérer facilement dans la Galaxie, les astronomes ont divisé la Voie lactée en quadrants, qui se rejoignent au niveau du Soleil. Nous avons tracé les bras dans trois des quatre quadrants. Pour compléter notre carte, nous aurions besoin d'observations menées depuis l'hémisphère Sud de la Terre. Un tel projet est en préparation; il fera appel à des télescopes en Australie et en Nouvelle-Zélande.

En attendant, nous pouvons extrapoler dans le quatrième quadrant les bras que nous avons déjà identifiés, en nous appuyant également sur d'autres informations comme les émissions de l'hydrogène neutre ou du monoxyde de carbone. On retrouve ainsi les quatre bras qui avaient été postulés précédemment: le bras de la Règle (ou bras du Cygne), le bras Écu-Croix, le bras du Sagittaire et le bras de Persée. Il nous faut cependant être prudents, car nous n'avons

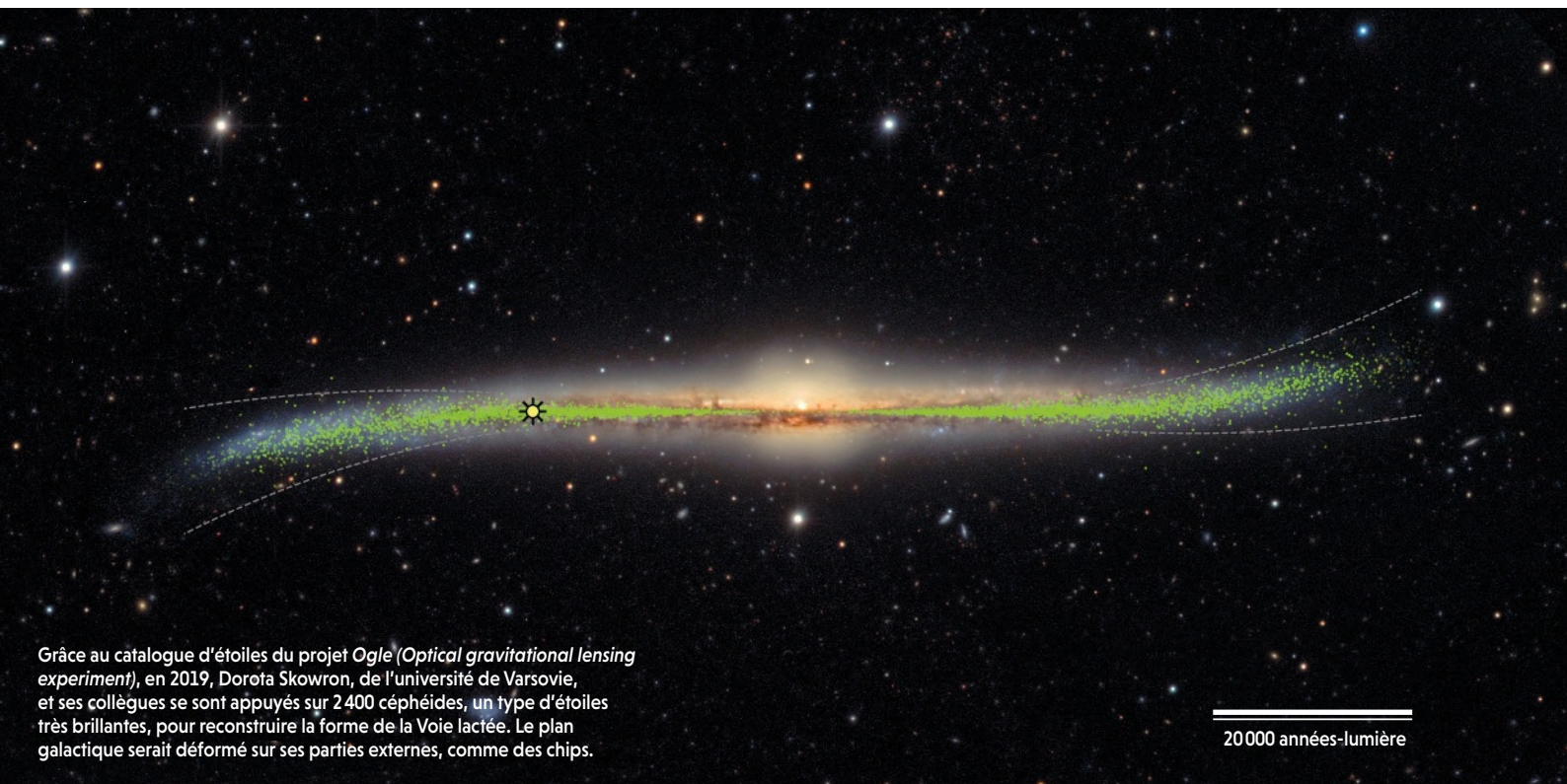


Le Soleil serait situé à environ 26 600 années-lumière du centre galactique



qu'une seule mesure de pouponnière d'étoiles à grande distance du centre galactique. La position de cette région, sa vitesse (obtenue grâce au monoxyde de carbone) nous donne assez de confiance sur la validité de notre extrapolation et notre façon de connecter les bras dans ce quatrième quadrant. Mais d'autres mesures seront nécessaires pour consolider ce résultat.

Nous avons donc maintenant une vision plus claire de notre voisinage cosmique. Il semble que la Voie lactée soit une galaxie spirale à quatre bras, avec une barre centrale lumineuse et relativement symétrique. Le Soleil se situerait sur le plan galactique assez loin du centre. En plus des bras qui s'enroulent quasiment sur un tour complet, la Galaxie présente au moins un autre segment de bras (le



Grâce au catalogue d'étoiles du projet Ogle (*Optical gravitational lensing experiment*), en 2019, Dorota Skowron, de l'université de Varsovie, et ses collègues se sont appuyés sur 2 400 céphéides, un type d'étoiles très brillantes, pour reconstruire la forme de la Voie lactée. Le plan galactique serait déformé sur ses parties externes, comme des chips.

20 000 années-lumière

bras local) et en a sûrement d'autres. Ces caractéristiques sont finalement assez banales pour une telle galaxie, sans être pour autant la norme. Environ deux galaxies spirales sur trois sont dotées d'une barre centrale; en ce sens, la Voie lactée appartient à la majorité. En revanche, ses quatre bras clairement définis et très symétriques constituent une structure plus exceptionnelle, car la plupart des galaxies spirales ont moins de bras ou ont une organisation moins régulière et nette.

Néanmoins, de nombreuses questions sur l'aspect de la Voie lactée en particulier et des galaxies spirales en général restent en suspens. Les astronomes s'interrogent notamment sur les mécanismes qui mènent à la formation des bras spiraux. Deux théories s'opposent. Selon l'une, des instabilités gravitationnelles à l'échelle de la galaxie créent des motifs d'ondes spirales à longue durée de vie. Selon l'autre, des instabilités à petite échelle s'étirent et s'amplifient au cours du temps pour former des segments de bras qui ensuite se combinent pour donner des bras entiers. Dans le premier scénario, les bras spiraux perdurent des milliards d'années, alors que dans le second, les bras persistent peu, mais sont régulièrement remplacés par d'autres.

Une autre énigme concerne l'âge de la Voie lactée. On pense qu'une galaxie se construit en plusieurs milliards d'années grâce à une multitude de coalescences successives de petites

protogalaxies qui se sont formées plus tôt dans l'histoire de l'Univers. La Voie lactée a probablement atteint le rang de grande galaxie il y a 5 milliards d'années. Mais son aspect était certainement très différent à l'époque, car des collisions ultérieures avec d'autres galaxies ont sûrement réarrangé sa structure spirale.

EN ATTENTE DE LA FUTURE GÉNÉRATION DE RADIOTÉLESCOPES

Pour améliorer notre connaissance de la Voie lactée, d'autres observations au moyen de la future génération de radiotélescopes utilisant la technique de VLBI seront nécessaires. Parmi ces projets qui s'étendent à l'échelle de continents, notons SKA (*Square Kilometer Array*), dont la première phase en Afrique du Sud sera opérationnelle vers 2024. Une deuxième phase est en préparation avec des radiotélescopes en Australie. Un autre projet est également à l'étude en Amérique du Nord. En augmentant la surface de collecte du rayonnement par rapport à celle des réseaux actuels, nous serons en mesure d'observer des sources radio de la Voie lactée plus faibles et donc plus lointaines. À terme, nous espérons cartographier avec précision notre galaxie et, peut-être, mettre à l'épreuve les deux théories sur les mécanismes de formation des bras spiraux. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. J. Reid et al., **Trigonometric parallaxes of high-mass star forming regions : Our view of the Milky Way**, *Astrophysical Journal*, vol. 885(2), article 131, 2019.

A. Sanna et al., **Mapping spiral structure on the far side of the Milky Way**, *Science*, vol. 358, pp. 227-230, 2017.

K. Johnston, **Les fossiles de la Voie lactée**, *Pour la Science*, n° 453, juillet 2015.

T. M. Dame et al., **The Milky Way in molecular clouds : a new complete CO survey**, *Astrophysical Journal*, vol. 547(2), pp. 792-813, 2001.

W. W. Morgan et al., **Studies in galactic structure. I. A preliminary determination of the space distribution of the blue giants**, *Astrophysical Journal*, vol. 118, pp. 318-322, 1953.

**CARINE
BABUSIAUX**

est astronome à l'institut de
planétologie et d'astrophysique
de Grenoble. Elle est spécialiste
de la structure, de la formation
et de l'évolution de la Voie lactée.
Elle est membre de la
collaboration Gaia.



Le Système solaire est peut-être né d'une collision galactique



Le satellite Gaia livre de nombreuses informations
sur la Voie lactée, sa structure, l'histoire de sa formation...
et celle du Système solaire. Carine Babusiaux nous
présente les résultats les plus récents de cette mission.

En quoi consiste la mission Gaia ?

Il s'agit d'une mission spatiale de l'Agence spatiale européenne dont l'objectif principal est un relevé astrométrique de près de 2 milliards d'étoiles dans la Voie lactée (qui en compte quelques centaines de milliards). Elle prend le relais du satellite *Hipparcos*, qui avait rassemblé un catalogue de 120 000 étoiles il y a vingt-cinq ans ! Le satellite *Gaia* a été lancé en 2013 et réalise des mesures de distance, position et vitesse des astres. Ces relevés sont complétés avec des données spectrophotométriques et spectroscopiques. L'idée est d'établir un catalogue public que les chercheurs utilisent ensuite pour étudier différents aspects de la Galaxie. La troisième version du catalogue sortira en deux temps, cette année et l'année prochaine. La mission nominale devait durer cinq ans, mais comme le satellite avait assez de gaz de propulsion en réserve, le programme continue grâce à une extension de mission.

Comment sont réalisées les différentes mesures ?

Le satellite utilise la méthode de la parallaxe pour calculer la distance d'une étoile. Quand on regarde depuis deux positions différentes un objet en avant-plan d'un fond considéré comme fixe, l'objet semble se décaler. L'angle correspondant est nommé la parallaxe. Si l'on connaît la distance entre les deux points d'observation et que l'on mesure précisément la parallaxe, un simple calcul de trigonométrie permet de déterminer la distance de l'objet et donc sa position dans l'espace. Pour *Gaia*, on mesure la parallaxe en utilisant le fait que la Terre tourne autour du Soleil pour avoir deux positions éloignées sur son orbite.

Quand on calcule plusieurs fois la position d'une étoile au cours du temps, on voit son déplacement dû à sa vitesse propre dans le plan du ciel. Par ailleurs, pour accéder à la vitesse des

étoiles les plus brillantes dans la direction de la ligne de visée, on utilise une technique spectroscopique. On décompose la lumière de l'étoile en fonction de la longueur d'onde et on regarde certaines raies caractéristiques, par exemple celles du calcium. À cause de l'effet Doppler, ces raies se décalent d'autant plus vers le bleu que l'étoile se rapproche vite de nous (ou vers le rouge si l'astre s'éloigne). Avec toutes ces données, on a la position et la vitesse des étoiles en trois dimensions, ce qui permet d'établir une carte très précise de la Voie lactée.

Gaia embarque aussi un instrument spectrophotométrique qui analyse toutes les sources observées. Il est utilisé pour déterminer les paramètres physiques des astres (classification, luminosité, température, métallicité, etc.).

Ces observations nous renseignent-elles sur la structure globale de la Voie lactée ?

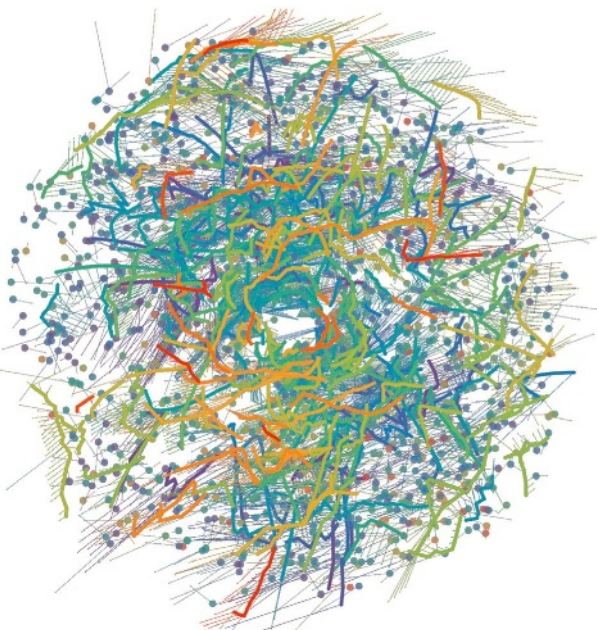
Elles fournissent des informations très riches sur la forme du plan galactique, le halo qui l'entoure, les bras spiraux en son sein, etc. Mais les mesures sont loin d'être simples. Les instruments de *Gaia* fonctionnent dans la gamme optique, une lumière qui est en grande partie absorbée par la poussière du milieu interstellaire. Ainsi, la portée de nos observations est en général limitée dans les régions très riches en poussière, comme dans le cas des bras spiraux de la Galaxie. Néanmoins, cette poussière n'est pas distribuée de façon homogène, alors dans certaines directions nous pouvons voir assez loin. On peut par exemple observer des étoiles céphéides (parmi les plus brillantes) de l'autre côté de la Voie lactée.

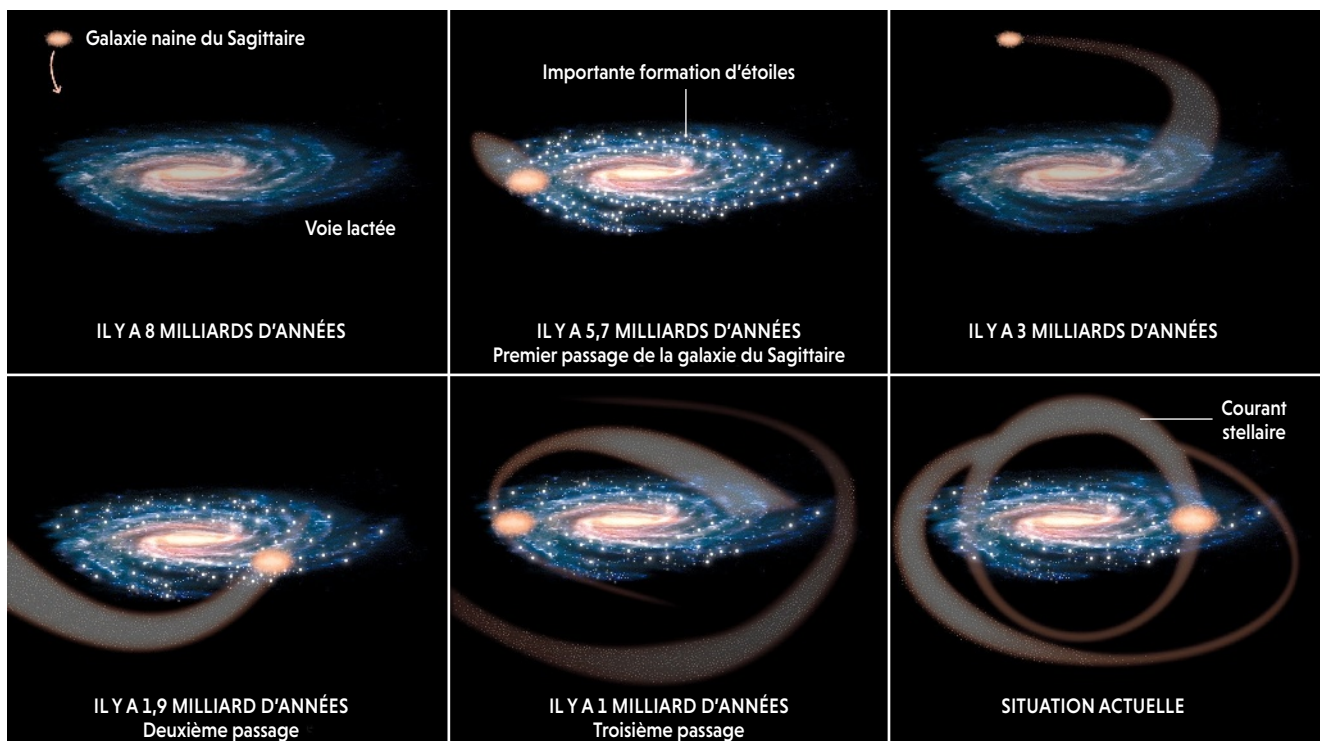
Nous profitons de ce phénomène d'extinction de la lumière pour établir des cartes de la distribution de la poussière. D'une certaine façon, cela permet de cartographier en négatif les bras spiraux ! Nous avons ainsi constaté que la poussière des bras n'est pas distribuée de façon continue ; elle est fragmentaire, avec des bulles où l'extinction de la lumière est faible. Nous obtenons donc une vision de bras plus morcelés que ne le suggèrent certains modèles à structures régulières.

La mission Gaia apporte-t-elle aussi des informations sur la barre centrale de la Voie lactée ?

Cette barre a été découverte dans les années 1960 grâce à l'étude de la cinématique des gaz dans la région centrale. D'autres approches ultérieures ont confirmé sa présence. Dans de nombreuses observations, on a même des indices d'une double barre : il y aurait une barre épaisse qui serait orientée à un angle de 10 à 20° par rapport à l'axe défini par le Soleil et le centre galactique ; une seconde barre, plus fine, serait à un angle plus important. Certains modèles reproduisent de telles configurations, mais c'est une ➤

Ce diagramme montre les amas d'étoiles (points) et les astres ayant un mouvement commun (lignes épaisses) dans un rayon de 3 000 années-lumière autour du Soleil. Chaque couleur correspond à une famille d'étoiles nées à la même époque. Les lignes fines indiquent les déplacements des astres dans les cinq millions d'années à venir, d'après les données de *Gaia*.





> région très poussiéreuse, où les données sont difficiles à obtenir avec précision.

Gaia permet d'observer uniquement les étoiles les plus brillantes à cette interface de la barre et des bras spiraux, mais elle peut contraindre indirectement les modèles qui décrivent la structure globale de la Galaxie. La barre centrale et les bras spiraux laissent leur signature dans la cinématique de l'ensemble du disque. Dès lors, en cartographiant avec précision les étoiles dans le voisinage du Soleil, *Gaia* fournit des données que les modèles doivent reproduire.

Et qu'en est-il du bras local ?

Le Soleil est situé dans une structure particulière, le bras local, dont la nature n'est pas encore certaine. Des astronomes font l'hypothèse qu'il s'agit d'un bras mineur, d'une ramification d'un bras spiral ou encore d'un tronçon d'un bras court. En reconstruisant précisément la structure tridimensionnelle du bras local, *Gaia* devrait permettre de répondre à cette question d'ici à quelques années.

Toujours dans le bras local, les données de *Gaia* ont permis de clarifier la nature de l'anneau de Gould. Les étoiles jeunes dans notre voisinage proche semblaient former une sorte d'anneau dont le Système solaire était proche du centre. En janvier 2020, João Alves, de l'université de Vienne et de l'institut Radcliffe, à l'université Harvard, aux États-Unis, et ses collègues ont montré à partir des distances de ces étoiles (calculées grâce à *Gaia*) qu'il s'agit en réalité d'un nuage de gaz dans le bras local contenant

La fusion de la Voie lactée et de la galaxie naine du Sagittaire est en cours et s'accompagne de plusieurs collisions violentes qui ont déclenché d'intenses formations d'étoiles. Les données de *Gaia* permettent de reconstituer cette histoire ancienne.

ces étoiles jeunes et dont la forme ondulée du nuage (on parle de « vague de Radcliffe ») donnerait l'impression, vue en coupe, de former un anneau. L'origine de cette structure reste inconnue, mais elle a probablement à voir avec le passé perturbé de la Voie lactée.

Justement, comment la mission *Gaia* permet-elle de reconstruire certains aspects de cette histoire ?

Les étoiles naissent par groupes, petits ou grands, dans des nuages de gaz et de poussière que l'on nomme des pouponnières. On parle de « flambées d'étoiles ». Dès lors, ces astres ont à peu près le même âge, la même composition chimique et le même mouvement dans la Voie lactée, au moins dans leur jeunesse. Ces étoiles se dispersent au cours du temps et il est alors plus difficile d'associer des astres à un groupe donné. Mais les astronomes ont développé diverses techniques pour extraire ces informations qui sont autant d'éléments pour reconstruire certains événements de l'histoire de la Voie lactée. On étudie les groupements spatiaux en trois dimensions pour trouver les étoiles qui sont nées ensemble et qui sont encore groupées sous forme d'amas. Pour trouver des groupes d'étoiles nées ensemble mais en train de se disloquer dans la galaxie, on regarde également leur vitesse qui reste commune pendant plus longtemps. Quant aux étoiles séparées depuis si longtemps qu'elles se fondent dans la cinématique galactique globale, on peut encore retrouver leur origine commune grâce à leur composition chimique. On parle d'archéologie galactique.

Que peut-on apprendre grâce à l'archéologie galactique ?

La composition chimique précise par exemple les conditions dans lesquelles les étoiles d'un même amas sont nées, si le processus a été rapide ou lent, ancien ou récent, etc. Par exemple, quand deux galaxies entrent en collision, cela perturbe le gaz interstellaire et crée des surdensités locales avec l'émergence de pouponnières d'étoiles. Lors d'un tel épisode, on assiste à une formation d'étoiles plus intense, à une perturbation de la cinématique des étoiles présentes initialement et à l'apparition d'une nouvelle population d'étoiles avec une cinématique et une composition chimique atypiques par rapport aux étoiles *in situ*.

En 2018, avec l'équipe d'Amina Helmi, de l'université de Groningue, aux Pays-Bas, nous avons identifié dans le catalogue de *Gaia* un groupe d'étoiles, assez proche du Soleil, dont la composition était différente et surtout qui tournait autour du centre galactique en sens inverse. Grâce à des simulations, nous avons conclu que ces étoiles étaient le résultat d'une collision de la Voie lactée avec une autre galaxie, que nous avons nommée Gaia-Enceladus. Un événement qui a eu lieu il y a 10 milliards d'années ! Ces simulations ont permis d'estimer que, à l'époque, la Voie lactée était seulement quatre fois plus massive que la galaxie qu'elle a engloutie. Cette collision a eu une influence majeure sur la structure de la Voie lactée. Aujourd'hui, elle n'aurait pas eu le même impact, car la différence de masse aurait été beaucoup plus grande.

Qu'en est-il de la galaxie naine du Sagittaire ?

Le catalogue de *Gaia* révèle que la Voie lactée a connu bien d'autres collisions. Une rencontre particulièrement intéressante est celle, toujours en cours, avec la galaxie naine du Sagittaire. Découverte en 1994 par Rodrigo Ibata, de l'observatoire de Strasbourg, cette galaxie naine se trouve actuellement proche du plan galactique à l'opposé du Soleil, ce qui rend son observation très difficile. À cause des forces de marée de la Voie lactée, la galaxie du Sagittaire se « déchire » et laisse sur son passage un « courant stellaire », un long ruban d'étoiles. L'étude de sa trajectoire montre que la galaxie aurait percuté le plan galactique trois fois.

En 2018, une équipe autour de Teresa Antoja, de l'Institut des sciences du cosmos, à Barcelone, a étudié le mouvement d'un million d'étoiles proches du Soleil dans le catalogue de *Gaia*, avec une attention particulière pour leur vitesse dans la direction perpendiculaire au plan galactique. La cinématique obtenue était très surprenante, pas du tout ce qui était attendu. Les simulations ont suggéré que leur mouvement est compatible avec le dernier passage de la galaxie du Sagittaire au-dessus du centre de la Voie lactée, il y a environ 500 millions d'années.



La mission Gaia fait de l'archéologie galactique

Ces passages déstabilisent-ils la Voie lactée ?

Depuis la fin des années 1950, les astronomes ont constaté que le disque galactique n'est pas plat mais a une forme de chips. L'origine de cette forme a fait l'objet de nombreuses hypothèses : influence du champ magnétique intergalactique, des galaxies voisines, etc. Avec les données de *Gaia*, Eloisa Poggio, de l'observatoire d'astrophysique de Turin, et ses collègues ont montré que cette déformation n'est pas statique : elle présente un mouvement de précession, qui réalise un tour en 700 millions d'années (la période de révolution du Soleil autour du centre galactique est d'environ 220 millions d'années). La vitesse de précession est malgré tout plus rapide qu'attendu dans les différents scénarios envisagés. Sa source est donc probablement un événement récent ou en cours, et assez important comme une collision avec une autre galaxie. Certains chercheurs pensent que la galaxie naine du Sagittaire est la source de cette perturbation, mais d'autres avancent qu'elle est trop petite pour avoir un impact aussi important.

Une conclusion de ces travaux est que la Voie lactée n'est pas un système à l'équilibre. Or les modèles sont souvent construits avec l'hypothèse que la Galaxie est à l'équilibre.

Ces perturbations peuvent-elles avoir eu une influence sur l'origine du Système solaire ?

Avec les données du catalogue de *Gaia* sur les étoiles dans le voisinage du Soleil, Tomas Ruiz-Lara, de l'institut d'astrophysique des Canaries, en Espagne, et ses collègues ont étudié la distribution statistique des âges des astres et ont constaté des flambées d'étoiles à 5,7 milliards, 1,9 milliard et 1 milliard d'années. Ils ont comparé ces observations avec des modèles des passages de la galaxie du Sagittaire. Ils observent une concordance : chaque passage correspond à une flambée. En particulier, le Soleil s'est formé à l'époque du premier passage il y a près de 5 milliards d'années. Les chercheurs se demandent donc si cette collision galactique n'est pas à l'origine du Système solaire. Une piste à confirmer, qui montre que la Voie lactée est loin de nous avoir révélé tous ses secrets. ■

Propos recueillis par Sean Bailly

BIBLIOGRAPHIE

T. Ruiz-Lara et al., **The recurrent impact of the Sagittarius dwarf on the star formation history of the Milky Way**, *Nature Astronomy*, en ligne, 25 mai 2020.

E. Poggio et al., **Evidence of a dynamically evolving Galactic warp**, *Nature Astronomy*, vol. 4, pp. 590-596, 2020.

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.

K. Johnston, **Les fossiles de la Voie lactée**, *Pour la Science*, n° 453, juillet 2015.

U N



N E M E U R T

J A M A I S .

EN TRIANT VOS JOURNAUX,
MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES,
PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES
PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE PLUS
DURABLE. PLUS D'INFORMATIONS SUR
LE RECYCLAGE SUR
TRIERCESTDONNER.FR

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits