

Les fossiles de la Voie lactée

Kathryn Johnston

Pour comprendre comment la Voie lactée s'est formée, les astronomes traquent les vestiges de petites galaxies déchirées et avalées par notre galaxie il y a fort longtemps.

LA VOIE LACTÉE, un ensemble de centaines de milliards d'étoiles, aurait absorbé de nombreuses galaxies naines au cours du temps.



■ L'AUTEURE



Kathryn JOHNSTON est professeure et dirige le département d'astronomie de l'Université Columbia, à New York (États-Unis).

L'ESSENTIEL

- La force gravitationnelle de la Voie lactée déchire lentement les galaxies naines en orbite autour d'elle.
- Ces galaxies naines forment de longues queues d'étoiles : les courants stellaires.
- Les astronomes utilisent ces « fossiles » de galaxies pour étudier le passé de la Voie lactée.
- L'analyse de ces courants étaye la théorie selon laquelle la Voie lactée a grossi peu à peu en avalant des galaxies plus petites.

Page précédente : Baktik Tairreshi/National Geographic

Les images des galaxies spirales, telle la Voie lactée, sont trompeuses. Elles donnent l'impression d'une structure régulière et tranquille à l'histoire peu mouvementée. En réalité, ces galaxies ont un appétit d'ogre. Elles ont grandi en phagocytant de petites galaxies voisines. Des astronomes ont récemment confirmé qu'au fil du temps, la Voie lactée a attiré et englobé de nombreuses autres galaxies plus petites dont elle s'est approprié les étoiles.

Nous connaissons au moins une trentaine de galaxies dites « naines » en orbite autour de la Voie lactée. Elles sont cent à un million de fois plus petites que la Voie lactée. Certaines n'ont été découvertes qu'au début de l'année 2015 et il en reste probablement des dizaines à découvrir. Les galaxies satellites actuelles ne représenteraient qu'une petite fraction de celles qui ont existé, les autres ayant été capturées et avalées par la Galaxie depuis bien longtemps. Cette ingestion a débuté quand la Voie lactée était plus jeune et plus petite. Elle se poursuit encore aujourd'hui : les galaxies satellites observables finiront par être avalées elles aussi.

Longtemps après la disparition des victimes de l'appétit gravitationnel de la Voie lactée, on en perçoit des traces sous la forme de traînées d'étoiles s'étirant sur le ciel, nommées courants stellaires. Depuis une quinzaine d'années, les chercheurs d'un domaine relativement nouveau, l'archéologie galactique, ont mis en évidence un grand nombre de tels courants, parfois à peine visibles. En étudiant ces « fossiles », témoins du passé de la Galaxie, les astronomes reconstituent les détails de l'histoire de la Voie lactée et recueillent des indices sur la manière dont les galaxies spirales se forment et évoluent.

Les astronomes-archéologues ont déjà confirmé l'un des processus de croissance de la Voie lactée et des galaxies jeunes en général. La découverte de multiples courants d'étoiles issus de satellites disparus depuis longtemps étaye la théorie largement admise selon laquelle notre galaxie était initialement petite et a grandi en ingérant de la masse par grosses bouchées : on parle de formation hiérarchique des structures. Bien que nombre de détails de ce scénario restent à clarifier, il révèle peu à peu la biographie de la Voie lactée.

La théorie de formation hiérarchique des galaxies stipule que le principal moteur

de la croissance des grandes galaxies ressemblant à la Voie lactée n'est pas la matière baryonique (les étoiles, le gaz et la poussière que nous pouvons observer, et qui sont constitués des mêmes particules que vous et moi). Au lieu de cela, la force motrice est liée aux vastes « halos » de matière noire invisible, des sortes de nuages sphériques. Grâce à des observations indirectes, les astrophysiciens estiment que les halos de matière noire sont beaucoup plus massifs et étendus que les galaxies de matière visible normale qu'ils peuvent renfermer. On pense qu'il se forme initialement de petits halos de matière noire qui s'agglomèrent progressivement en halos plus gros. Les galaxies qu'ils contiennent se rapprochent alors les unes des autres et les grosses galaxies avalent les petites.

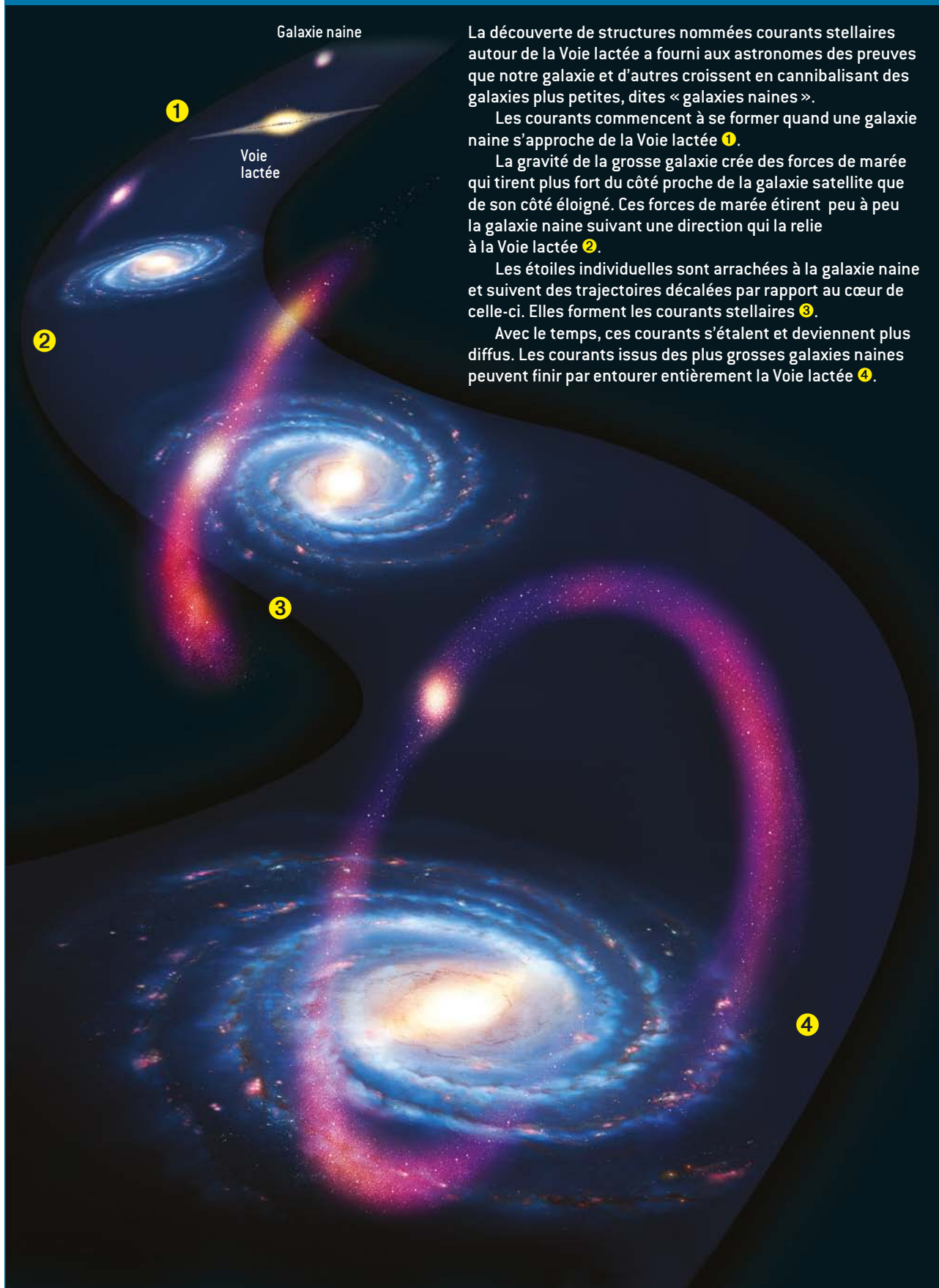
La nature de la matière noire reste à découvrir (nous ne la percevons qu'à travers son attraction gravitationnelle sur tout le reste). Néanmoins, la plupart des astronomes pensent que cette représentation est juste pour les galaxies spirales. De nombreuses observations sur les amas de galaxies et leur dynamique ne s'expliquent qu'avec la présence de matière noire.

Construire une galaxie avec la matière noire

Cependant, si la matière noire crée les conditions d'agglomération des galaxies, les détails de leur formation sont dictés par les forces en jeu dans la matière baryonique. En effet, le halo de matière noire attire vers son centre la matière baryonique sous forme de gaz, par l'intermédiaire de la force gravitationnelle. Le gaz devient de plus en plus dense et s'effondre dans certaines régions au point de former des étoiles. Quand ces étoiles arrivent en fin de vie, elles expulsent de la matière en restituant leurs atomes au gaz de la galaxie (et éventuellement au-delà) et déclenchent souvent la formation d'une nouvelle génération d'étoiles à partir de la poussière et du gaz restants. C'est vraisemblablement de cette façon que se forme et se renouvelle la population stellaire du cœur de la Voie lactée (le « bulbe ») et de ses bras spiraux (le « disque »).

La Voie lactée comporte aussi une immense sphère d'étoiles plus diffuses entourant le bulbe et le disque, nommé halo galactique (à ne pas confondre avec le halo

COMMENT UNE GALAXIE NAIN SE TRANSFORME EN COURANTS STELLAIRES



La découverte de structures nommées courants stellaires autour de la Voie lactée a fourni aux astronomes des preuves que notre galaxie et d'autres croissent en cannibalisant des galaxies plus petites, dites « galaxies naines ».

Les courants commencent à se former quand une galaxie naine s'approche de la Voie lactée **1**.

La gravité de la grosse galaxie crée des forces de marée qui tirent plus fort du côté proche de la galaxie satellite que de son côté éloigné. Ces forces de marée étirent peu à peu la galaxie naine suivant une direction qui la relie à la Voie lactée **2**.

Les étoiles individuelles sont arrachées à la galaxie naine et suivent des trajectoires décalées par rapport au cœur de celle-ci. Elles forment les courants stellaires **3**.

Avec le temps, ces courants s'étalent et deviennent plus diffus. Les courants issus des plus grosses galaxies naines peuvent finir par entourer entièrement la Voie lactée **4**.

de matière noire, beaucoup plus étendu). Une part de ces étoiles pourrait être issue de galaxies naines détruites depuis longtemps. On pense que la fraction d'étoiles initialement nées dans d'autres galaxies et finalement incorporées à la nôtre est faible, tout au plus un pour cent sur les centaines de milliards d'étoiles que compte la Voie lactée.

D'après la théorie de la formation hiérarchique des galaxies, les étoiles rejoignent le halo galactique dans une séquence d'événements que l'on peut résumer ainsi : tandis que la galaxie naine tourne autour de la Voie lactée, elle ressent l'attraction gravitationnelle de la grande galaxie, qui se renforce à mesure que la distance diminue (*voir la figure page 65*). La matière de la galaxie satellite – étoiles, gaz, poussière et matière noire – située du côté le plus proche de la Voie lactée est soumise à une attraction légèrement

supérieure à celle exercée sur la matière se trouvant du côté le plus éloigné. Ainsi, la galaxie naine est étirée le long de la direction qui la relie à la grande galaxie.

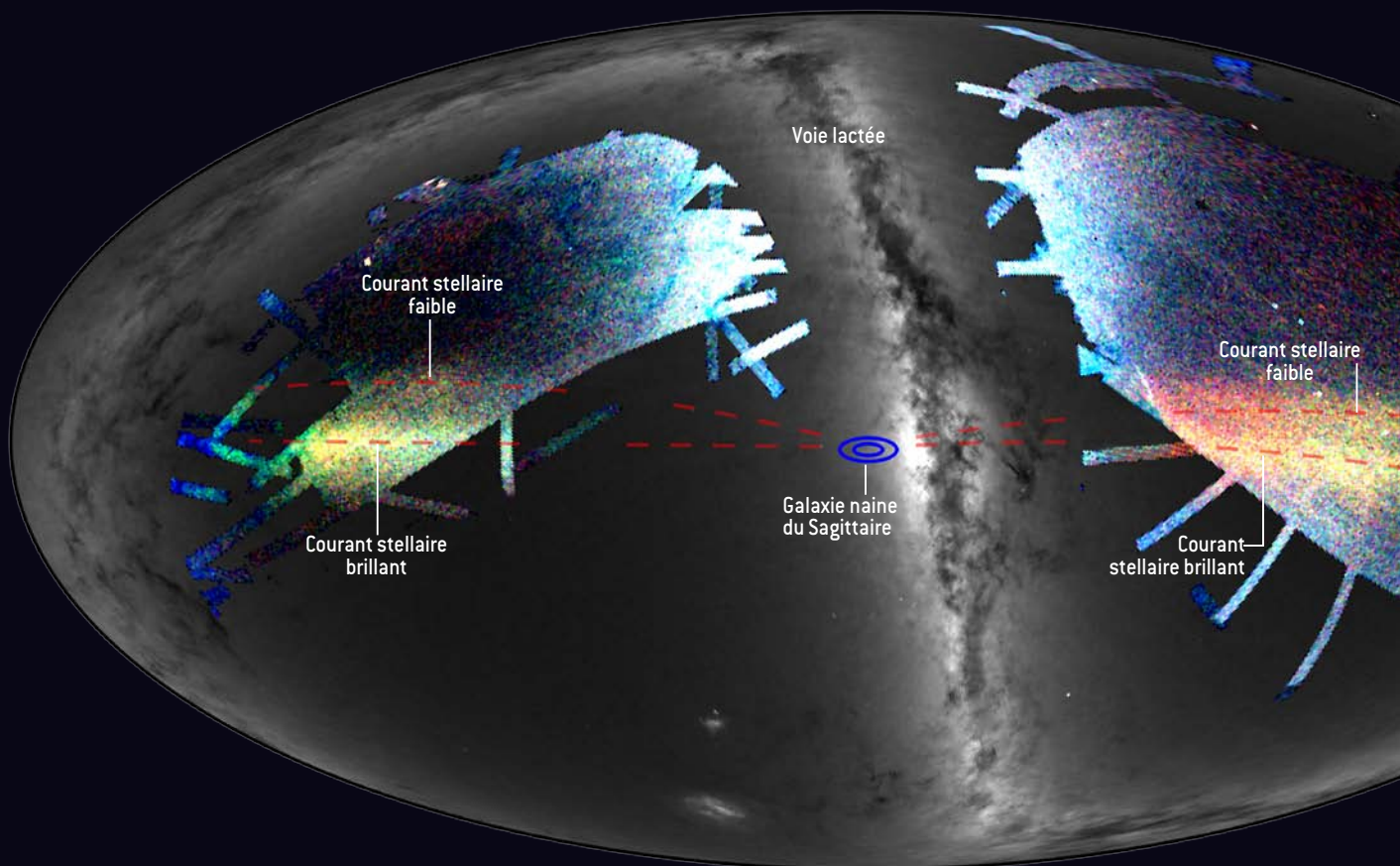
L'étirement résulte des forces dites de marée – similaires à celles qui font se soulever les océans sous l'influence de la Lune. Les forces de marée de la Voie lactée sur ses satellites sont assez puissantes pour extraire des étoiles de la galaxie naine. Une fois arrachées, les étoiles restent sous l'emprise de la Voie lactée et continuent sur une trajectoire légèrement décalée par rapport à l'orbite du cœur de la galaxie satellite. Au fil du temps, le léger décalage entraîne un étalement continu des débris, qui deviennent plus diffus et s'éloignent de la galaxie satellite pour former les courants stellaires.

Les astronomes ont longtemps cherché une confirmation de l'existence de ces courants stellaires. C'est désormais

chose faite. La découverte de nombreux courants d'étoiles a révélé que la Voie lactée a commencé à dévorer ses voisines il y a plusieurs milliards d'années, quand elle était encore jeune, et qu'elle continue d'absorber des galaxies naines à l'heure actuelle. Bien que les traces de tels courants d'étoiles issues de compagnons galactiques nains aient essentiellement été détectées autour de notre propre galaxie, ces courants existent probablement autour de toutes les galaxies spirales, même s'ils sont trop ténus pour être détectés à de telles distances.

La traque aux courants stellaires

Toutefois, de nombreux détails du modèle restaient mal définis, comme l'époque précise à laquelle la Voie lactée a absorbé la plupart de ses galaxies satellites, la



fréquence d'ingestion de galaxies naines et le temps nécessaire pour s'approprier leurs étoiles. Les archéologues galactiques ont donc cherché à localiser davantage de courants stellaires, afin de les étudier en détail, et à repérer des vestiges de courants disparus.

Ils ont exploité plusieurs approches pour trouver les courants d'étoiles de la Voie lactée. En premier lieu, ils ont cherché des ensembles d'étoiles situées à des distances comparables qui se regroupent en longs filaments. Pour cela, ils avaient besoin d'une bonne carte tridimensionnelle des étoiles de la Galaxie, qui indique la position d'autant d'étoiles que possible dans toutes les directions.

Les archéologues galactiques se sont ainsi penchés sur les données du projet SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*). Un télescope est dédié à ce relevé à l'observatoire d'Apache Point, au Nouveau-Mexique.

Les astronomes ont ainsi créé une base de données de plus de 80 millions d'étoiles de la Voie lactée réparties sur plus d'un quart du ciel, avec des renseignements sur leur position, leur couleur et d'autres caractéristiques. Le nombre important d'étoiles de ce catalogue constitue un excellent « site de fouille » pour chercher des fossiles, témoins du passé de la Voie lactée.

Les chercheurs y ont repéré des étoiles susceptibles d'être à la bonne distance pour se trouver dans le halo galactique. Ils ont identifié près d'un million d'étoiles qui seraient des intruses potentielles, ayant appartenu à une galaxie depuis longtemps défunte. Et, parmi ces étoiles, ils ont retrouvé des courants stellaires en ciblant des zones plus denses en étoiles et en forme de queue.

Les astronomes savaient à quoi ces queues ressembleraient, en partie grâce à des simulations que j'avais créées et publiées en 2005 avec le cosmologiste James Bullock de l'Université de Californie à Irvine. Nous avons utilisé notre compréhension de la formation hiérarchique des halos de matière noire, combinée à la physique des forces de marée, pour prédire la taille et l'étalement des courants stellaires créés lors de l'absorption de nombreuses galaxies naines par la Voie lactée en formation. Nous savions, par exemple, que la queue devait s'étaler en amont et en aval de la galaxie, contrairement à celle d'une comète dont les débris sont repoussés dans une seule direction par le vent solaire.

La première preuve convaincante d'un courant stellaire étendu a été obtenue en 2003, quand une équipe d'astronomes dirigée par Steve Majewski, de l'Université de Virginie, a découvert des queues géantes émanant du plus proche satellite connu de la Voie lactée, la galaxie naine du Sagittaire. L'analyse reposait sur les données d'un projet similaire au SDSS, mais dans l'infrarouge, le projet 2MASS (*Two Micron All Sky Survey*). Les courants se situent près de l'orbite du Sagittaire et contiennent presque autant d'étoiles qu'il n'en reste dans la galaxie du Sagittaire elle-même. Les queues sont si longues qu'elles encerclent presque la Voie lactée. Les astronomes avaient pris la Galaxie en flagrant délit.

Depuis cette découverte, les archéologues galactiques ont mis au jour une douzaine d'autres courants stellaires autour de la Voie lactée dans le catalogue SDSS. D'après la longueur des queues du Sagittaire, on estime que la galaxie naine perd ses étoiles depuis deux à trois milliards d'années. Les autres courants semblent également âgés de quelques milliards d'années. Ces

Le catalogue SDSS constitue un bon « site de fouille » pour chercher des témoins du passé de la Voie lactée

observations suggèrent que la Voie lactée digérait des galaxies plus souvent au début de son histoire, et que ce rythme a decru récemment à mesure que le nombre de galaxies naines disponibles diminuait.

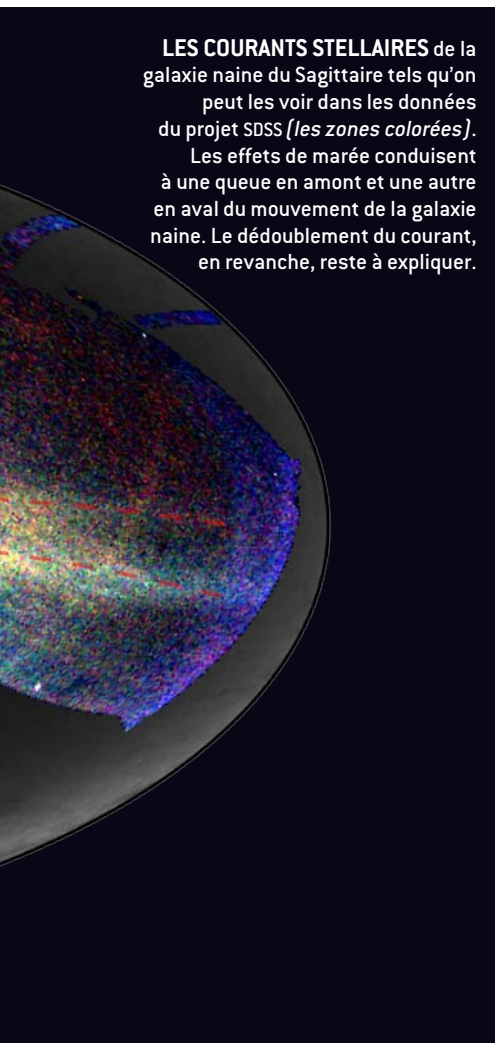
La découverte des courants stellaires est en accord avec les prédictions de la théorie de formation hiérarchique. Cependant, les courants stellaires connus ne représentent probablement qu'une fraction de ceux qui existent. De nombreux autres plus anciens, trop diffus et discrets pour être vus avec les moyens actuels, renferment sans doute des informations sur le passé de notre galaxie.

Nouveaux outils de fouille

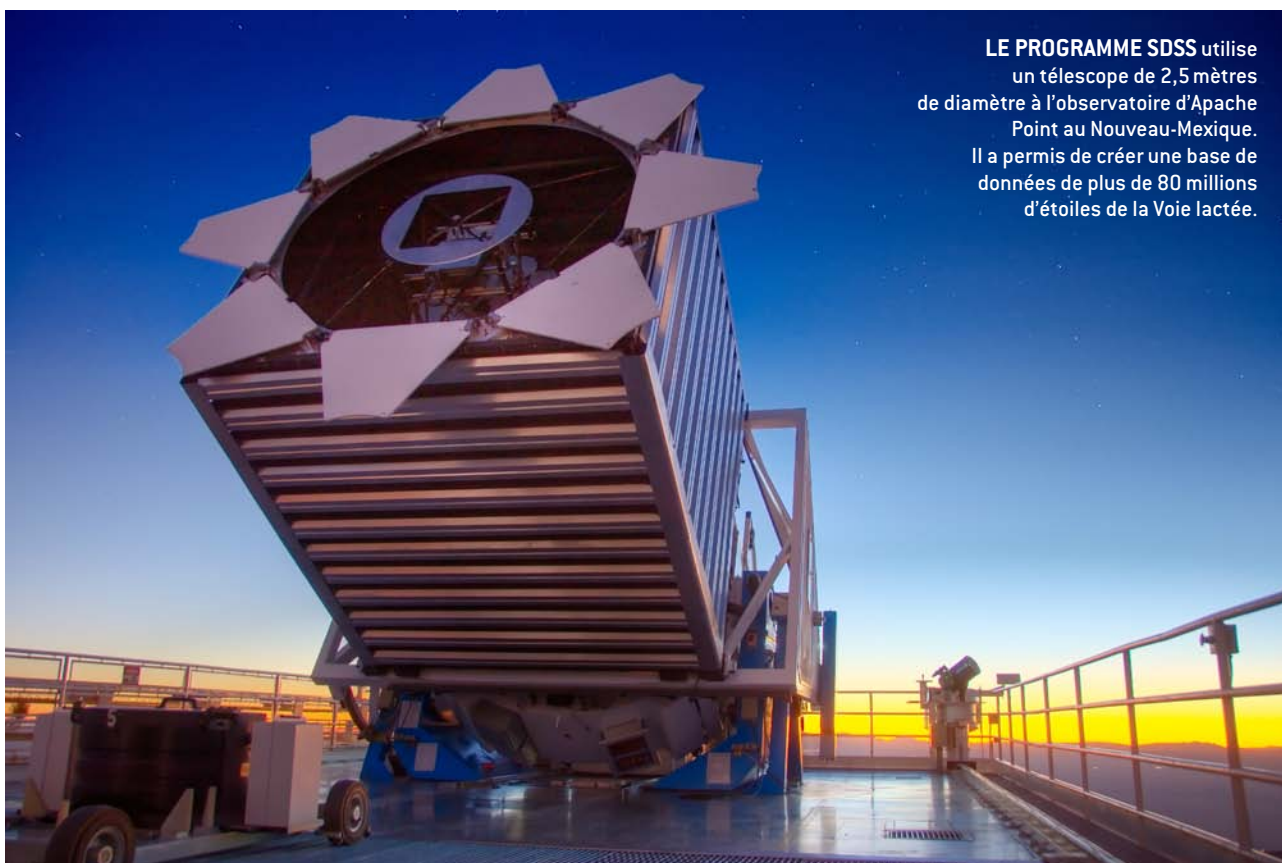
De fait, en se fondant uniquement sur la position des étoiles pour trouver les courants stellaires, on passe à côté de nombreuses queues anciennes. En effet, même si les différences de propriétés orbitales entre les étoiles sont initialement petites, les courants finissent par s'allonger, diffuser et s'estomper au point de perdre toute structure évidente au bout de quelques milliards d'années.

Les astronomes cherchent maintenant à exploiter d'autres propriétés stellaires pour trouver des courants plus diffus, ainsi que des vestiges de courants disloqués. Ces ensembles d'étoiles aideront à explorer l'époque la plus active de formation des galaxies, il y a plus de dix milliards d'années, c'est-à-dire dans les quelques milliards d'années qui ont suivi le Big Bang, quand la plupart des étoiles de l'Univers se sont formées. À cette époque, ce ne sont

LES COURANTS STELLAIRES de la galaxie naine du Sagittaire tels qu'on peut les voir dans les données du projet SDSS (*les zones colorées*). Les effets de marée conduisent à une queue en amont et une autre en aval du mouvement de la galaxie naine. Le dédoublement du courant, en revanche, reste à expliquer.



© S. Koposov et la collaboration SDSS-III



LE PROGRAMME SDSS utilise un télescope de 2,5 mètres de diamètre à l'observatoire d'Apache Point au Nouveau-Mexique. Il a permis de créer une base de données de plus de 80 millions d'étoiles de la Voie lactée.

© David Kirby

pas seulement quelques petites galaxies et amas stellaires, mais des centaines, qui sont happés pour former la Voie lactée.

L'une des manières de traquer les restes de galaxies défunctes consiste à rechercher des étoiles ayant des orbites similaires. Si la dispersion des étoiles d'un courant stellaire a commencé il y a longtemps, leur position actuelle ne permet plus de les reconnaître comme appartenant au même courant. En revanche, nous pouvons utiliser leur mouvement pour identifier les étoiles qui ont fait autrefois partie de la même galaxie satellite et pour apprendre comment elles ont rejoint la Voie lactée. En effet, leur mouvement devrait garder certaines similarités. C'est l'un des nombreux objectifs du satellite *Gaia* de l'Agence spatiale européenne, lancé en décembre 2013.

Gaia consacrera les quatre prochaines années à enregistrer des données pour les archéologues galactiques en mesurant la distance, la position et le mouvement de plus d'un milliard d'étoiles. Cette moisson de données permettra aux astronomes de calculer l'orbite complète de chaque étoile. Ainsi, nous pourrons sélectionner

des astres présentant des propriétés orbitales similaires et ayant probablement la même galaxie d'origine, et cela même si les positions dans le ciel n'indiquent plus leur parenté.

Comparer les compositions chimiques

La composition chimique des étoiles est encore une autre façon de traquer leur lieu de naissance et donc un autre moyen potentiel de découvrir les courants stellaires. La composition globale des étoiles évolue constamment en raison de la fusion nucléaire qui anime le cœur de l'astre, transformant les éléments légers en éléments plus lourds. Mais la fusion nucléaire ne se produit que dans les régions centrales les plus denses et chaudes de l'étoile. L'atmosphère de l'étoile, qui est la région accessible aux instruments des astronomes, serait quasi identique au gaz d'où elle a émergé.

Kenneth Freeman, de l'Université nationale australienne, à Canberra, et Joss Bland-Hawthorn, de l'Université de Sydney, utilisent cette information pour regrouper des étoiles présentant la même empreinte

■ BIBLIOGRAPHIE

N. Libeskind, **Les galaxies naines et la toile cosmique**, *Pour la Science*, n° 439, mai 2014.

J. S. Bullock et K. V. Johnston, **Tracing galaxy formation with stellar halos. 1. Methods**, *Astrophysical Journal*, vol. 635, pp. 931-949, 2005.

K. Freeman et J. Bland-Hawthorn, **The new galaxy : Signature of its formation**, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 40, pp. 487-537, 2002.

chimique et pour reconstituer l'amas de gaz qui les a vus naître, indépendamment de leur position actuelle dans le ciel.

Fondée sur la seule composition chimique, la méthode de Kenneth Freeman et Joss Bland-Hawthorn n'est pas suffisante pour identifier des étoiles associées à une galaxie naine, car ces galaxies contiennent probablement des étoiles nées dans divers amas de compositions chimiques distinctes. Néanmoins, en complétant cette approche avec les connaissances sur la formation des galaxies et des étoiles, on détermine certains aspects de l'accrétion des galaxies naines par la Voie lactée.

Tout d'abord, les étoiles se formant plus tardivement au sein d'une galaxie donnée contiennent généralement plus d'éléments lourds que celles qui se sont formées au début, parce que le matériau qui les constitue a déjà été enrichi avec les restes des générations précédentes d'étoiles. Ensuite, le processus d'enrichissement dépend d'écoulements de gaz qui sont gouvernés en partie par l'influence gravitationnelle du halo de matière noire de la galaxie.

Ces deux effets suggèrent que des galaxies de masses proches happées et détruites à peu près en même temps devraient fournir une collection d'étoiles dont la distribution de composition chimique est similaire, c'est-à-dire ayant le même éventail d'abondances pour de nombreux éléments. À l'inverse, des différences sur la masse des galaxies naines ou sur l'époque d'accrétion vont conduire à des variations de distribution chimique des étoiles entrant dans leur composition. Par conséquent, la distribution globale de composition chimique des étoiles autour de la Voie lactée nous permettrait de définir des classes de galaxies de même masse et avalées en même temps, puis d'estimer la part des étoiles de la galaxie provenant de chaque classe, même si on ne pourra pas isoler une galaxie individuelle.

Duane Lee a exploré cette voie quand il était étudiant dans mon équipe à l'Université Columbia. Ses travaux préliminaires suggèrent que les marqueurs chimiques seraient assez sensibles pour que l'on retrouve les contributions des galaxies naines, même les

plus petites, détruites très tôt dans l'histoire de la galaxie. En sachant à quelle époque est arrivée chaque classe d'étoiles, nous pouvons commencer à esquisser une séquence de cannibalisations et à retracer l'histoire de l'accrétion de la Voie lactée, en remontant aux périodes les plus anciennes. Plusieurs équipes d'astronomes mesurent actuellement les compositions chimiques de millions d'étoiles. Le premier groupe est celui du relevé GALAH (*GALactic Archeology with HERMES*) dirigé par Kenneth Freeman et Joss Bland-Hawthorn. Un autre est APOGEE (*APO Galactic Evolution Experiment*), démarré en 2011 dans le cadre du relevé SDSS. Le projet *Gaia*-ESO de l'Observatoire européen austral étudiera plus de 100 000 étoiles et utilisera les données du satellite *Gaia*.

Les archéologues galactiques commencent seulement à réaliser qu'étudier la Voie lactée revient en quelque sorte à étudier un millier de galaxies – tous ces objets plus petits qui se sont combinés pour former notre grande galaxie. Les fossiles de ces galaxies disparues ne nous renseignent pas seulement sur l'histoire de la Voie lactée, mais aussi sur celle de toutes les petites galaxies qu'elle a incorporées. Nous devrions bientôt être en mesure d'étudier comment les galaxies de différentes tailles se sont formées à différentes époques. Dans la prochaine décennie, ces analyses contribueront autant à notre compréhension de la Galaxie que la découverte de courants stellaires autour de la Voie lactée durant la décennie passée.

À terme, nous aimerions savoir comment se sont formées les toutes premières galaxies de l'Univers. Les premiers ancêtres de galaxies semblables à la nôtre sont trop petits et lointains pour être directement détectables, mais l'archéologie galactique pourrait révéler les vestiges de ces premiers germes : les étoiles très anciennes qui portent encore la marque de leur origine sont dispersées ici même, dans la Voie lactée. Ainsi, ce n'est pas en cherchant plus loin, mais en creusant dans notre propre jardin, que nous pourrions enfin accéder à l'Univers primordial et aux premières étapes de la formation des galaxies. ■

Le programme
Gaia
consacrera
les prochaines années
à mesurer les positions et
les mouvements de plus
d'un milliard d'étoiles

Le monde perdu de l'île Maurice

