



# L'astronomie dans le monde

## *Centaurus A*

*Basé sur un communiqué ICRAR*

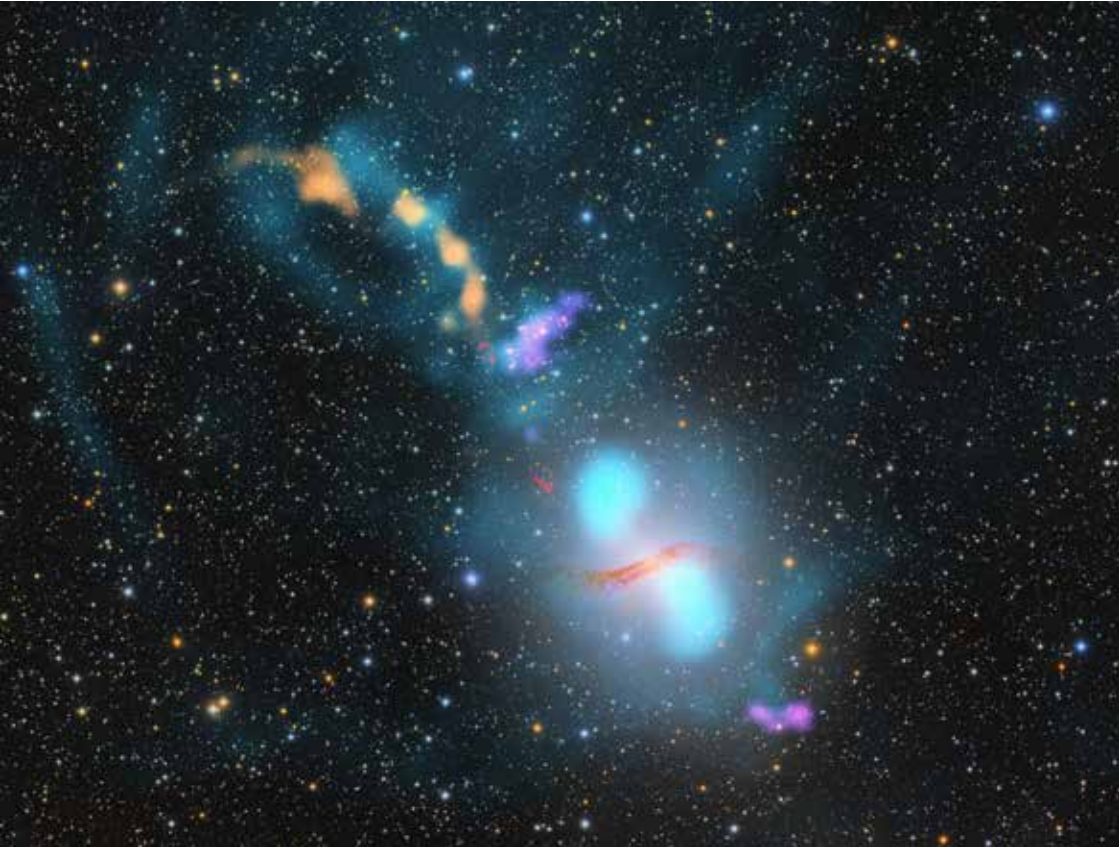
Le réseau radio MWA (Murchison Widefield Array), situé dans l'ouest de l'Australie, a produit l'image la plus complète de l'émission radio du trou noir supermassif actif le plus proche de la Terre, celui de Centaurus A, une galaxie distante de 12 millions d'années-lumière.

Lorsque le trou noir se gave du gaz tombant sur lui en chute libre, il éjecte de la matière à une vitesse proche de celle de la lumière, ce qui entraîne la formation de bulles radio durant des centaines de millions d'années. Vue de la Terre, l'éruption de

*Centaurus A (NGC 5128) est une galaxie elliptique géante active située à 12 millions d'années-lumière. En son cœur se trouve un trou noir d'une masse de 55 millions de soleils. Cette image montre la galaxie aux longueurs d'onde radio, révélant de vastes lobes de plasma qui s'étendent bien au-delà de la galaxie visible, qui n'occupe qu'une petite parcelle au centre de l'image. Les points à l'arrière-plan ne sont pas des étoiles, mais des radiogalaxies semblables à Centaurus A, à des distances bien plus grandes. (Ben McKinley, ICRAR/Curtin et Connor Matherne, Louisiana State University)*



*L'élément 107, ou « l'aberration » comme on l'appelle, est l'un des 256 du MWA, à 1,5 km du cœur du réseau. Le MWA est un instrument précurseur du SKA. (Pete Wheeler, ICRAR)*



Centaurus A s'étend maintenant sur huit degrés dans le ciel, soit 16 fois la Lune. L'image révèle de nouveaux détails spectaculaires de l'émission radio de la galaxie.

Ces ondes radio proviennent de la matière aspirée par le trou noir supermassif. Elle forme un disque autour du trou noir et de puissants jets se forment de part et d'autre du disque, éjectant la majeure partie de la matière dans l'espace, jusqu'à un million d'années-lumière et plus.

Les observations radio ont été combinées avec des données optiques et X,

*Cette image composite montre la galaxie NGC 5128 et l'espace intergalactique environnant à plusieurs longueurs d'onde différentes. Le plasma radio est représenté en bleu et semble interagir avec le gaz chaud émetteur de rayons X (orange) et l'hydrogène neutre froid (violet). Des nuages émettant en H-alpha (rouge) sont également représentés au-dessus de la partie optique principale de la galaxie qui se trouve entre les deux lobes radio les plus brillants. L'arrière-plan est une image dans le visible, montrant des étoiles de la Voie lactée qui se trouvent au premier plan. [Connor Matherne, Louisiana State University (Optique/H-alpha), Kraft et al. (X-ray), Struve et al. (HI), Ben McKinley, ICRAR/Curtin (Radio)]*



afin de mieux comprendre la physique des trous noirs supermassifs. L'étude corrobore une nouvelle théorie connue sous le nom d'accrétion chaotique froide (CCA). Dans ce modèle, des nuages de gaz froid se condensent dans le halo galactique et tombent en pluie sur les régions centrales, alimentant le trou noir supermassif. Activé par cette pluie, le trou noir réagit vigoureusement en renvoyant de l'énergie par des jets radio qui gonflent les lobes spectaculaires que l'on peut voir sur l'image MWA.

La galaxie est la plus brillante au centre, où elle est très active et où il y a beaucoup d'énergie. Plus loin, les particules chargées ont été ré-accéléérées et interagissent avec de forts champs magnétiques.

De telles recherches sont possibles grâce au champ extrêmement large du télescope, à sa superbe localisation loin des pollutions radio et à son excellente sensibilité.

Le MWA est un précurseur du Square Kilometre Array (SKA), une initiative mondiale visant à construire les plus grands radiotélescopes en Australie occidentale et en Afrique du Sud.

*Image composite du télescope SKA-Low en Australie occidentale. L'image mêle une photo réelle (à gauche) de la station prototype SKA-Low AAVS2.0 qui se trouve déjà sur le site, et une vue d'artiste des futures stations SKA-Low telles qu'elles seront une fois construites. Ces antennes dipôles, qui se compteront par centaines de milliers, sonderont le ciel radioélectrique à des fréquences aussi basses que 50 MHz. (ICRAR, SKAO)*

## Détails de la Voie lactée

Basé sur des communiqués Hubble et Université de Barcelone, et ApJ Letters

Quelle serait la forme de la Galaxie si on pouvait la voir de l'extérieur, et plus particulièrement comment apparaîtraient ses bras spiraux ? En l'absence d'une vue à vol d'oiseau, il faut appliquer d'autres méthodes pour mesurer la forme de la Galaxie.

On sait depuis longtemps que la Voie lactée est une galaxie spirale, en forme de galette avec un bulbe central et un disque d'étoiles fin et plat. Pendant des décennies, les astronomes se sont efforcés de cartographier le disque de la Voie lactée et les bras spiraux qui lui sont associés. Mais comme l'arbre qui cache la forêt, notre environnement galactique fait qu'il est difficile d'avoir une vue d'ensemble. Des études en ondes radio et en infrarouge permettent d'aborder le problème.

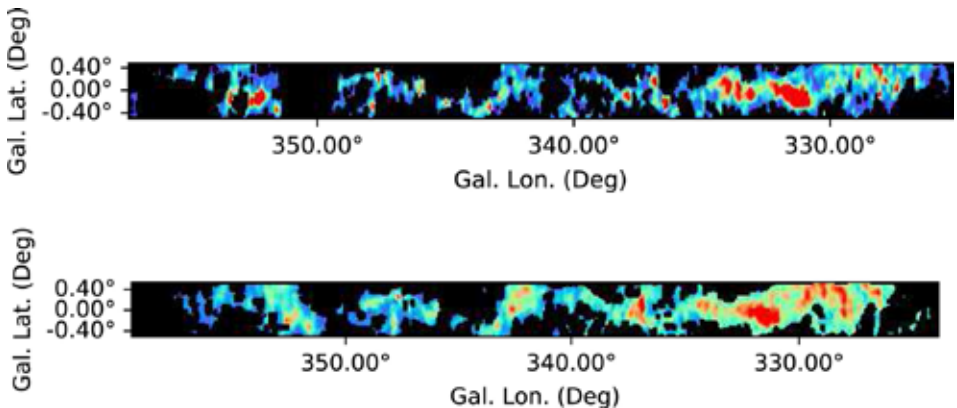
*En haut, on voit les ondulations de la vague de Gangotri dans une carte de l'« isotopologue »  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$  du monoxyde de carbone réalisée avec le télescope APEX et se limitant aux vitesses radiales de  $-95$  à  $-75$  km/s. En bas c'est  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$  qui est présenté avec les données correspondantes provenant du radiotélescope australien Mopra. (V.S. Veena et al., ApJ Letters, 2021)*



*Les bras spiraux de la Voie lactée présentés dans cette vue d'artiste sont sans doute reliés par des ponts diffus de matière. (JPL-Caltech/NASA)*

L'une d'elles, basée sur des observations en ondes millimétriques réalisées avec le télescope APEX à San Pedro de Atacama, au Chili, a montré que les régions centrales de la Voie lactée sont plus complexes qu'on ne le pensait.

On a découvert un long et fin filament de gaz froid et dense qui s'étend depuis le centre galactique et relie deux des bras spiraux. C'est la première fois qu'une telle structure, qui ressemble à une barbe se détachant de la plume centrale, est repérée dans la Voie lactée.



Tous les autres filaments de gaz connus dans la Voie lactée s'alignent sur les bras spiraux.

L'équipe qui a découvert cette barbe l'a baptisée « vague de Gangotri », du nom du glacier qui est à l'origine du plus long fleuve de l'Inde, le Gange. En hindi et dans d'autres langues indiennes, la Voie lactée est appelée Akasha Ganga, « le Gange dans le ciel ».

La vague de Gangotri a été découverte en recherchant des nuages de gaz froid de monoxyde de carbone, denses et faciles à tracer. La structure s'étend sur 6 000 à 13 000 années-lumière, depuis le bras Norma de la Voie lactée jusqu'à un bras mineur proche du centre galactique, le « bras de 3 kiloparsecs ».

La vague de Gangotri présente une autre caractéristique inhabituelle qui justifie son nom : une ondulation. Le filament semble osciller de haut en bas comme une onde sinusoidale. Les astronomes s'interrogent sur l'origine du phénomène.

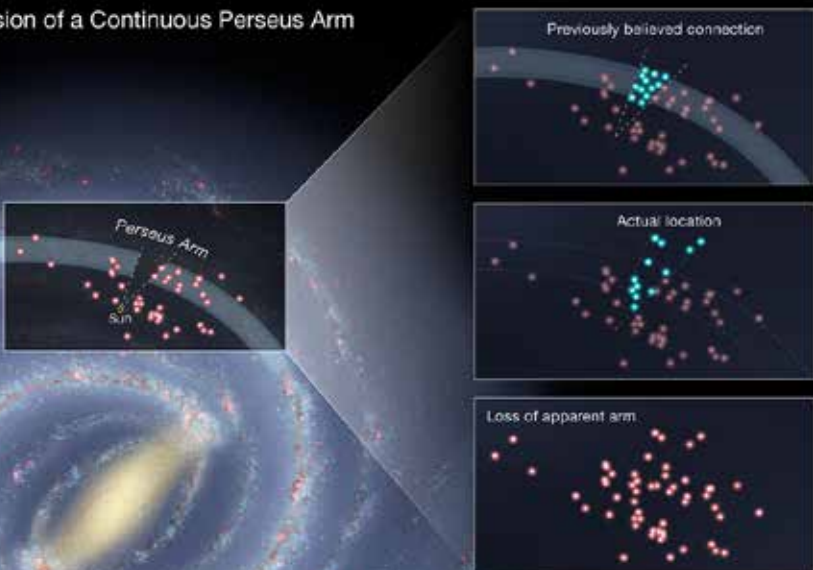
D'autres galaxies montrent de nombreuses plumes ou barbes de gaz. Peut-être en est-il de même pour la Voie lactée, mais il est très difficile de cartographier complètement la structure de notre galaxie de l'intérieur. Les astronomes espèrent trouver petit à petit d'autres éléments de la structure de notre galaxie et en préciser la cartographie.

*Le bras spiral le plus proche de nous, juste au-delà du Soleil, est celui dit de Persée. Les astronomes ont créé cette carte en mesurant l'emplacement de sources radio naturelles, les masers (points roses), et de nuages de poussière (points bleus). En haut à droite, une région ombragée montre la forme présumée du bras de Persée, délimitée par*

*poussière. De nouvelles mesures (au milieu à droite) montrent que certains de ces nuages de poussière sont beaucoup plus proches ou plus éloignés du Soleil qu'on ne le pensait. En conséquence, le bras de Persée pourrait être beaucoup plus irrégulier et moins bien défini (en bas à droite).*

*[J. Peek (STScI), R.L. Hurt (Caltech, IPAC), L. Hustak (STScI)]*

### The Illusion of a Continuous Perseus Arm



Une autre équipe a construit un modèle du bras spiral le plus proche de nous, le bras de Persée. Des travaux précédents lui attribuaient une forme étroite et nette. Cependant, de nouvelles recherches montrent qu'au moins une partie du bras de Persée pourrait manquer de structure bien définie – le résultat d'interactions complexes pressenties il y a déjà un demi-siècle.

Lorsque l'on cartographie notre galaxie, le plus grand défi est de trouver la distance des étoiles, des amas ou des nuages de gaz. La méthode de référence consiste à utiliser les mesures de parallaxe de sources radio naturelles, des masers, dont certaines se trouvent dans des régions de formation d'étoiles de grande masse. Cependant, cette technique laisse inévitablement des lacunes.

Pour combler ces lacunes, les astronomes passent de l'examen des régions de formation d'étoiles à celui des nuages de gaz, et plus précisément à celui des mouvements de ces nuages de gaz. Dans une situation idéale, la vitesse radiale d'un nuage est directement liée à sa distance en raison de la rotation globale de la Voie lactée. Par conséquent, en mesurant les vitesses des nuages, nous pouvons déterminer les distances et donc la structure sous-jacente de la Galaxie.

Mais qu'en est-il dans une situation réelle, non idéale ? Alors que le mouvement d'un nuage de gaz peut être dominé par sa rotation autour du centre galactique, il s'y superpose des mouvements supplémentaires, plus aléatoires qui peuvent fausser nos cartes.

Pour répondre à cette question, les astronomes ont observé non pas le gaz, mais la poussière. En général, dans notre galaxie, le gaz et la poussière sont étroitement associés, donc si l'on parvient à cartographier l'un, on cartographie aussi l'autre. Des cartes 3D de la poussière peuvent être créées en examinant les couleurs de grandes collections d'étoiles réparties dans le ciel. Plus il y a de poussière entre l'étoile et nous, plus l'étoile apparaîtra rouge par rapport à sa couleur naturelle.

Les chercheurs ont examiné la région du bras de Persée, qui se trouve au-delà de notre Soleil dans le disque de la Voie lactée. Ils ont

comparé les distances mesurées par le rougissement de la poussière à celles déterminées par la relation de vitesse. Ils ont constaté que de nombreux nuages ne se situent pas, en fait, à la distance du bras de Persée, mais s'étendent plutôt sur quelque 10 000 années-lumière.

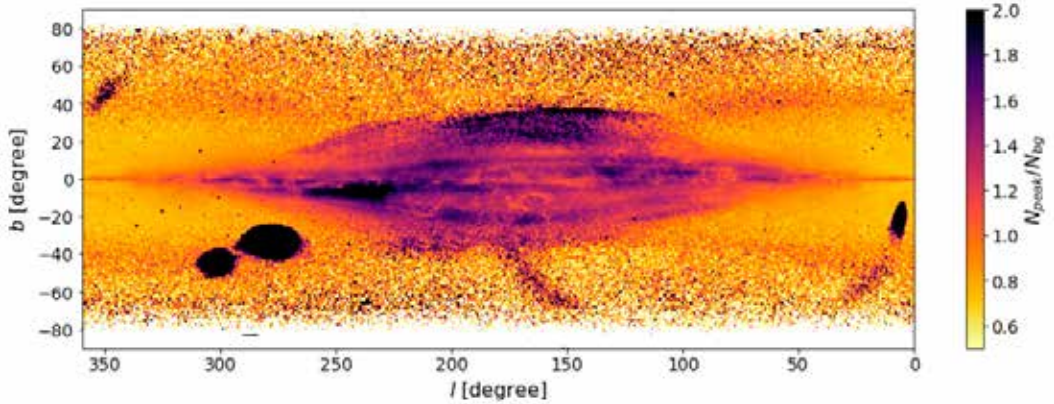
Les bras spiraux ne sont pas longs et minces, du moins dans cette section de la Galaxie. Il y a des morceaux qui ne ressemblent à rien, un peu comme dans la galaxie voisine Messier 83, avec des segments de bras courts et hachés.

Si ces dernières recherches se sont concentrées sur la Voie lactée externe, les astronomes prévoient d'étendre ces travaux à la Voie lactée interne, là où se trouvent les bras spiraux qui forment le plus activement des étoiles.

Ils prévoient de créer des cartes en 3D de la poussière en utilisant les relevés infrarouges à grande échelle existants pour mesurer le rougissement de quelque 1 à 2 milliards d'étoiles. En reliant ces nouvelles cartes de poussière aux études existantes sur la vitesse du gaz, ils pourront affiner la carte de la Voie lactée interne, comme ils l'ont déjà fait pour la Galaxie externe.

Les précédents efforts de cartographie 3D de la poussière se sont largement appuyés sur des données à des longueurs d'onde visibles par l'œil humain. Personne n'a encore utilisé les données dans l'infrarouge profond pour créer une carte 3D de la poussière. Cela pourrait permettre de découvrir que cette région, comme le bras de Persée, est bien chaotique.

Le télescope spatial Nancy Grace Roman et l'observatoire Vera Rubin, qui verront le jour prochainement, pourraient fournir des informations encore plus détaillées. Le télescope Roman pourra cartographier l'ensemble du plan galactique en quelques centaines d'heures. De plus, ses mesures infrarouges permettraient de traverser la poussière et de voir distinctement de l'autre côté de la Galaxie pour la première fois. Rubin, quant à lui, sera capable de faire des observations profondes d'objets peu lumineux à diverses longueurs d'onde optiques. En combinant la vision infrarouge du ciel de Roman avec les données



***La nouvelle carte a révélé une nouvelle sous-structure du disque externe de la Voie lactée grâce aux données de la mission spatiale Gaia. (C. Laporte et al., MNRAS, 2021)***

optiques profondes et multi-longueurs d'onde de Rubin, nous pourrions enfin cartographier notre forêt cosmique.

D'autres chercheurs ont établi une nouvelle carte du disque externe de la Voie lactée en utilisant les données de la mission spatiale Gaia. Cette région de la Voie lactée est généralement peu explorée en raison de la poussière qui recouvre la majeure partie du plan médian galactique. Si la poussière affecte la luminosité des étoiles, elle n'a aucun effet sur leur mouvement. Par conséquent, on peut utiliser le mouvement des étoiles pour réaliser une tomographie des régions les plus éloignées de la Galaxie. L'équipe a analysé les données acquises par Gaia, pour identifier les structures cohérentes.

La carte révèle l'existence de nombreuses structures filamenteuses, jusqu'alors inconnues, en rotation cohérente au bord du disque. Elle donne également une vue globale plus précise des structures précédemment connues. Les simulations numériques prédisent la formation de telles structures filamenteuses dans le disque externe à partir des interactions

avec les galaxies satellites mais le nombre de sous-structures révélées par cette carte a étonné les scientifiques et reste un mystère.

Notre galaxie est entourée de cinquante galaxies satellites et a englouti de nombreuses galaxies dans son passé. Actuellement, on pense que la Voie lactée a été perturbée par la galaxie naine du Sagittaire, un fait qui a confirmé les premiers modèles théoriques. Cependant, dans son passé plus lointain, elle a interagi avec un autre intrus, la « Saucisse Gaia », dont les débris sont maintenant dispersés dans le halo de la Voie lactée. Les chercheurs ont formulé l'hypothèse selon laquelle ces structures filamenteuses sont des restes de bras créés par les effets de marée du disque de la Voie lactée, et qui ont été excités à différentes époques par diverses galaxies satellites.

Une étude précédente avait montré que l'une des structures filiformes du disque externe, appelée le courant anticentre, comportait des étoiles majoritairement plus âgées que huit milliards d'années, ce qui la rend potentiellement trop vieille pour avoir été causée par la naine Sagittaire seule, mais plus probablement par la Saucisse. Une autre possibilité serait que toutes ces structures ne soient pas de véritables sous-structures du disque, mais plutôt les crêtes d'ondes de densité verticales du disque vues en projection, formant une illusion optique selon laquelle le disque est fortement sous-structuré.



## ***Structure du Système solaire***

*Basé sur un communiqué MPG*

Les astronomes ont réussi à établir un lien entre les propriétés des planètes internes du Système solaire et les structures annulaires du disque protoplanétaire. Les anneaux sont associés à des propriétés physiques fondamentales telles que la transition d'une région extérieure où la glace peut se former à une région où l'eau ne peut exister que sous forme de vapeur d'eau. Les astronomes ont eu recours à une série de simulations pour explorer les différentes possibilités d'évolution des planètes internes. Les régions internes de notre Système solaire sont une conséquence rare, mais possible, de cette évolution.

L'image générale de la formation des planètes autour des étoiles n'a pas changé depuis des décennies. Cependant, de nombreux détails restent inexpliqués et font l'objet d'une partie importante des recherches actuelles – recherches qui portent leurs fruits puisque

les astronomes ont récemment annoncé avoir trouvé une explication aux propriétés des planètes internes du Système solaire, telles que nous les observons actuellement.

Le scénario évoqué est en gros le suivant : autour d'une étoile jeune, un disque protoplanétaire de gaz et de poussières se forme et, à l'intérieur de ce disque, grandissent des petits corps de plus en plus grands, qui finissent par atteindre des diamètres de plusieurs milliers de kilomètres, c'est-à-dire par devenir des planètes.

Les méthodes d'observation modernes ont permis d'affiner ce scénario. Le changement le plus frappant a été déclenché par les premières données d'ALMA qui montraient le disque protoplanétaire autour de l'étoile jeune HL Tauri avec des détails sans précédent, et les caractéristiques les plus étonnantes se résument à une structure imbriquée d'anneaux et de lacunes.

Les simulations numériques ont fait apparaître que ces anneaux sont généralement

***Le disque entourant l'étoile jeune HL Tauri montre un rayon de plus de 100 unités astronomiques dans cette image prise avec ALMA en 2014. Les recherches décrites ici montrent le rôle clé que des structures annulaires comme celle-ci ont probablement joué dans la genèse du Système solaire. (ALMA, ESO/NAOJ/NRAO)***



liés à des variations de pression que l'on peut associer à des changements dans la composition du disque, principalement dans la taille des grains de poussière.

En particulier, il existe des bosses de pression associées à des transitions particulièrement importantes dans le disque, qui peuvent être reliées directement à la physique fondamentale. Très près de l'étoile, à des températures supérieures à 1 400 Kelvin, les composés de silicate sont à l'état gazeux. Cela signifie que des planètes ne peuvent pas se former. En dessous de cette température, les composés silicatés repassent à l'état solide. Cette bosse de pression définit une frontière interne globale pour la formation de planètes.

Plus loin, à 170 Kelvin, il existe une transition entre la vapeur d'eau d'une part et la glace d'eau d'autre part, connue sous le nom de « ligne des neiges ». Cette température est nettement plus basse que celle de 0 degré Celsius où l'eau gèle sur Terre en raison de la pression beaucoup plus faible. À des températures encore plus basses, 30 Kelvin, se trouve la limite de neige du monoxyde de carbone.

Des simulations avaient déjà montré comment de telles bosses de pression facilitent la formation de planétésimaux – les objets d'un diamètre compris entre 10 et 100 kilomètres, qui sont censés être les blocs de construction des planètes. Après tout, le processus de formation commence par des objets beaucoup plus petits, à savoir des grains de poussière. Ces grains de poussière ont tendance à s'accumuler dans une région de basse pression, les grains d'une certaine taille dérivant vers l'étoile jusqu'à ce qu'ils soient arrêtés par une pression plus élevée.

Au fur et à mesure que la concentration en grains augmente au niveau de la bosse de pression, et en particulier que le rapport entre la matière solide (qui a tendance à s'agréger) et le gaz (qui a tendance à écarter les grains) augmente, il devient plus facile pour ces grains de former des galets, et pour ces galets de s'agréger en objets plus grands.

Il restait cependant à établir le rôle de ces sous-structures dans la forme globale des systèmes planétaires, comme le Système solaire,

avec sa distribution caractéristique de planètes internes rocheuses et terrestres et de planètes externes gazeuses.

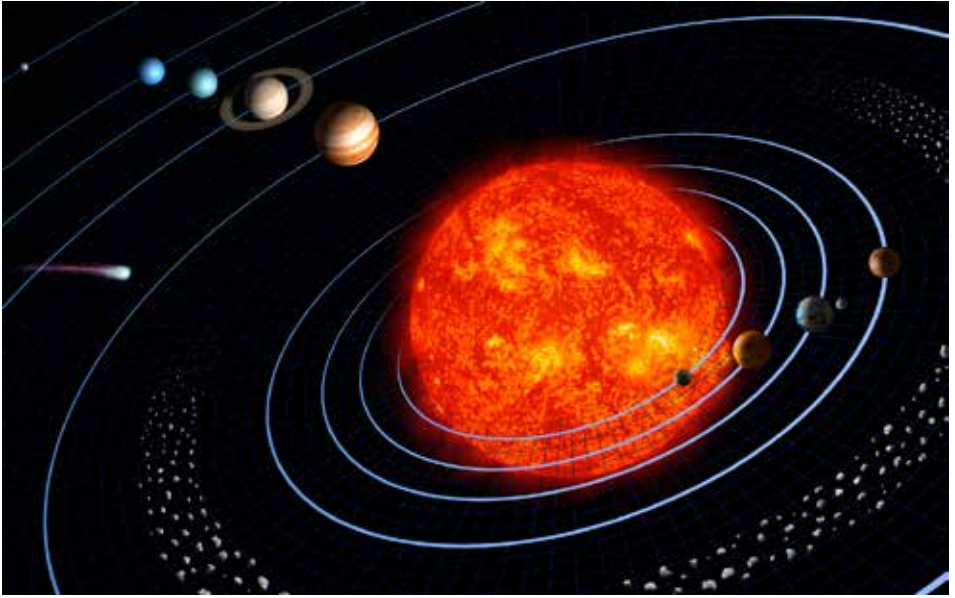
Les astronomes ont construit un modèle de disque gazeux, avec trois bosses de pression à la frontière entre les silicates et les gaz et les lignes de neige de l'eau et du CO. Ils ont ensuite simulé la façon dont les grains de poussière croissent et se fragmentent dans le disque de gaz, la formation des planétésimaux, la croissance des planétésimaux en embryons planétaires (de 100 km de diamètre à 2 000 km) près de l'emplacement de la Terre, la croissance des embryons planétaires en planètes pour les planètes terrestres, et l'accumulation des planétésimaux dans une ceinture d'astéroïdes nouvellement formée.

Dans le Système solaire, la ceinture d'astéroïdes située entre les orbites de Mars et de Jupiter abrite des centaines de petits corps, que l'on pense être des restes ou des fragments de collision de planétésimaux qui n'ont jamais grandi pour former des embryons planétaires, et encore moins des planètes.

Une question intéressante pour les simulations est la suivante : si la configuration initiale était juste un peu différente, le résultat final serait-il toujours similaire ? Il est important de comprendre ce type de variations pour savoir quels ingrédients sont déterminants pour le résultat de la simulation. C'est pourquoi les chercheurs ont analysé un certain nombre de scénarios différents avec des propriétés variables pour la composition et le profil de température du disque. Dans certaines des simulations, ils n'ont utilisé que les bosses de pression des silicates et de la glace d'eau, dans d'autres, les trois.

Les résultats suggèrent un lien direct entre l'apparence du Système solaire et la structure annulaire de son disque protoplanétaire. Les modèles étaient capables de rendre compte du développement d'un système planétaire comme le nôtre – jusqu'aux masses et compositions chimiques légèrement différentes de Vénus, de la Terre et de Mars.

Comme prévu, dans ces modèles, les planétésimaux se sont formés naturellement près des bosses de pression, comme un embou-



teillage cosmique pour les cailloux dérivant vers l'intérieur, qui seraient ensuite arrêtés par la pression plus élevée à la limite interne de la bosse de pression.

Pour les parties internes des systèmes simulés, les chercheurs ont identifié les bonnes conditions pour la formation de quelque chose ressemblant au Système solaire : si la région située juste à l'extérieur de la bosse de pression (silicate) la plus interne contient environ 2,5 masses terrestres de planétésimaux, ceux-ci se développent pour former des corps de la taille de Mars, ce qui correspond aux planètes internes du Système solaire.

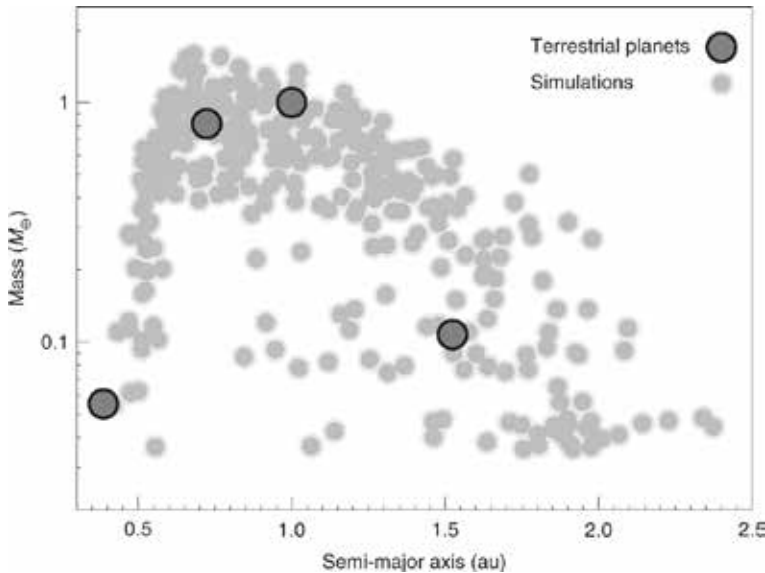
Un disque plus massif, ou encore une plus grande efficacité dans la formation de planétésimaux, conduirait plutôt à la formation de super-Terres, c'est-à-dire de planètes rocheuses considérablement plus massives. Ces super-Terres seraient en orbite serrée autour de l'étoile hôte, juste à la limite de la bosse de pression la plus interne. L'existence de cette limite peut également expliquer pourquoi il n'y a pas de planète plus proche du Soleil que Mercure – la matière nécessaire se serait tout simplement évaporée si près de l'étoile.

### *Représentation schématique du Système solaire.*

*(H. Smith, L. Generosa; NASA/JPL)*

Les simulations vont même jusqu'à expliquer les compositions chimiques légèrement différentes de Mars d'une part, de la Terre et de Vénus d'autre part : dans les modèles, la Terre et Vénus recueillent en effet la plupart des matériaux qui formeront leur masse dans des régions plus proches du Soleil que l'orbite actuelle de la Terre. Les analogues de Mars dans les simulations, en revanche, ont été construits principalement à partir de matériaux provenant de régions un peu plus éloignées du Soleil.

Au-delà de l'orbite de Mars, les simulations ont donné une région qui, au départ, était peu peuplée voire, dans certains cas, complètement vide de planétésimaux – le précurseur de l'actuelle ceinture d'astéroïdes. Cependant, certains planétésimaux provenant des zones situées à l'intérieur ou directement au-delà de la ceinture d'astéroïdes se sont égarés plus tard dans la région de la ceinture d'astéroïdes et y sont restés piégés.



*Masse des planètes en fonction de la distance au Soleil pour les modèles (disques gris), et les planètes telluriques du Système solaire (disques sombres). Jupiter et Saturne ont été supposées complètement formées et dans des orbites résonnantes, circulaires. (A. Izidoro et al., 2021)*

Lorsque ces planétésimaux entraînent en collision, les débris résultants formaient ce que nous observons aujourd'hui, les astéroïdes. Les simulations permettent même d'expliquer les différentes populations d'astéroïdes : les astéroïdes de type S, des corps composés principalement de silice, seraient les restes d'objets errants provenant de la région autour de Mars, tandis que les astéroïdes de type C, qui contiennent principalement du carbone, seraient les restes d'objets errants provenant de la région située directement en dehors de la ceinture d'astéroïdes.

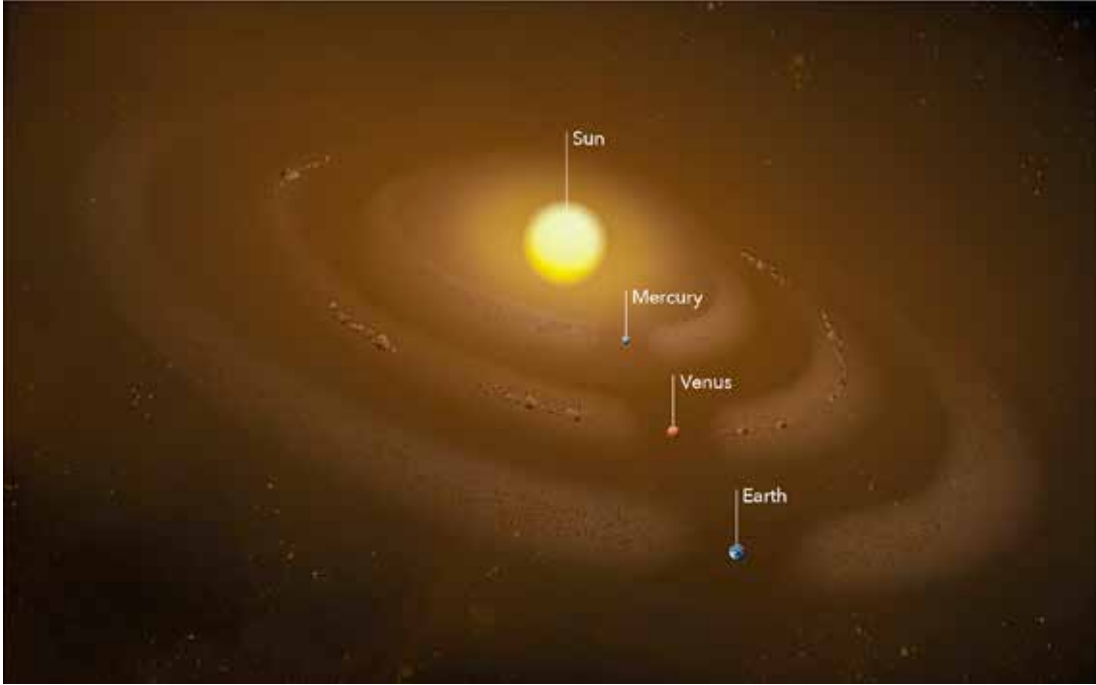
Dans cette région extérieure, juste à l'extérieur de la bosse de pression qui marque la limite intérieure de la présence de glace d'eau, les simulations montrent le début de la formation des planètes géantes – les planétésimaux proches de cette limite ont généralement une masse totale comprise entre 40 et 100 fois celle de la Terre, ce qui correspond aux estimations de la masse totale des noyaux des planètes géantes Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.

Dans cette situation, les planétésimaux les plus massifs accumuleraient rapidement

plus de masse. Les simulations actuelles n'ont pas suivi l'évolution ultérieure (déjà bien étudiée) de ces planètes géantes, qui implique un groupe initialement assez serré, à partir duquel Uranus et Neptune ont ensuite migré vers leurs positions actuelles.

Enfin, les simulations peuvent expliquer la dernière catégorie d'objets et leurs propriétés : les objets de la ceinture de Kuiper, qui se sont formés en dehors de la bosse de pression la plus externe, qui marque la limite interne de l'existence de la glace de monoxyde de carbone. Elles peuvent aussi expliquer les légères différences de composition entre les objets connus de la ceinture de Kuiper : là encore, il s'agit d'une différence entre les planétésimaux qui se sont formés à l'origine en dehors de la bosse de pression de la ligne de neige du CO et qui y sont restés, et les planétésimaux qui se sont égarés dans la ceinture de Kuiper depuis la région intérieure adjacente des planètes géantes.

Dans l'ensemble, la dispersion des simulations a conduit à deux résultats fondamentaux. Soit une bosse de pression à la ligne de neige eau-glace s'est formée très tôt.



*Illustration du Système solaire interne. Les anneaux qui existent maintenant ne sont pas les vestiges du disque protoplanétaire mais résultent d'interactions des planètes avec la poussière provenant de collisions d'astéroïdes, ou libérée par des comètes. (NASA's Goddard Space Flight Center/ M.P. Hrybyk-Keith)*

Dans ce cas, les régions interne et externe du système planétaire se sont séparées assez tôt, au cours des cent mille premières années. Cela a conduit à la formation de planètes terrestres de faible masse dans les parties internes du système, comme cela s'est produit dans le Système solaire. En revanche, si la bosse de pression eau-glace se forme plus tard ou n'est pas aussi prononcée, une plus grande masse peut dériver vers la région interne, ce qui conduit à la formation de super-Terres ou de mini-Neptunes dans les systèmes planétaires internes. Les observations des systèmes exoplanétaires découverts jusqu'à présent montrent que ce cas est de loin le plus fréquent – et que le Système solaire est un résultat relativement rare de la formation de planètes.

Dans cette recherche, les astronomes se sont concentrés sur le Système solaire interne et les planètes terrestres. Ils veulent maintenant effectuer des simulations incluant les détails

des régions extérieures, avec Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. L'objectif final est de parvenir à une explication complète des propriétés de notre système planétaire et des autres.

Pour le Système solaire interne, au moins, nous savons maintenant que les propriétés clés de la Terre et de sa plus proche voisine peuvent être attribuées à une physique plutôt élémentaire : la frontière entre glace et vapeur d'eau et la bosse de pression associée dans le disque protoplanétaire.

## C19, un courant d'étoiles très peu métalliques

Basé sur des communiqué CNRS NSF

Le Soleil est composé à 98,5% de deux éléments atomiques légers, l'hydrogène et l'hélium, et à 1,5 % d'éléments plus lourds tels que le carbone, l'oxygène, le fer... Cette part d'atomes lourds appelée « métallicité » de l'étoile varie d'une étoile à l'autre. Il s'avère que notre galaxie abrite un groupe d'étoiles – un courant – à la métallicité extrêmement faible.

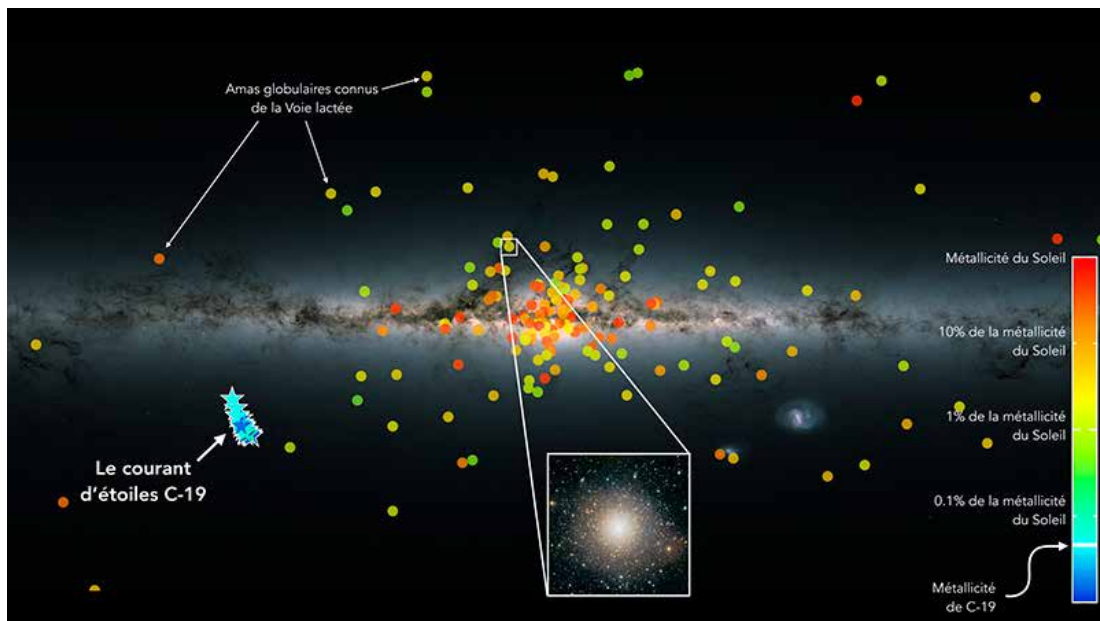
Appelé C-19, le courant stellaire se trouve actuellement au sud de la Voie lactée, et son orbite s'étend entre 20 000 et 90 000 années-lumière du centre galactique. Le groupe s'étire sur une longueur impressionnante du ciel – environ 30 fois la largeur de la Pleine Lune.

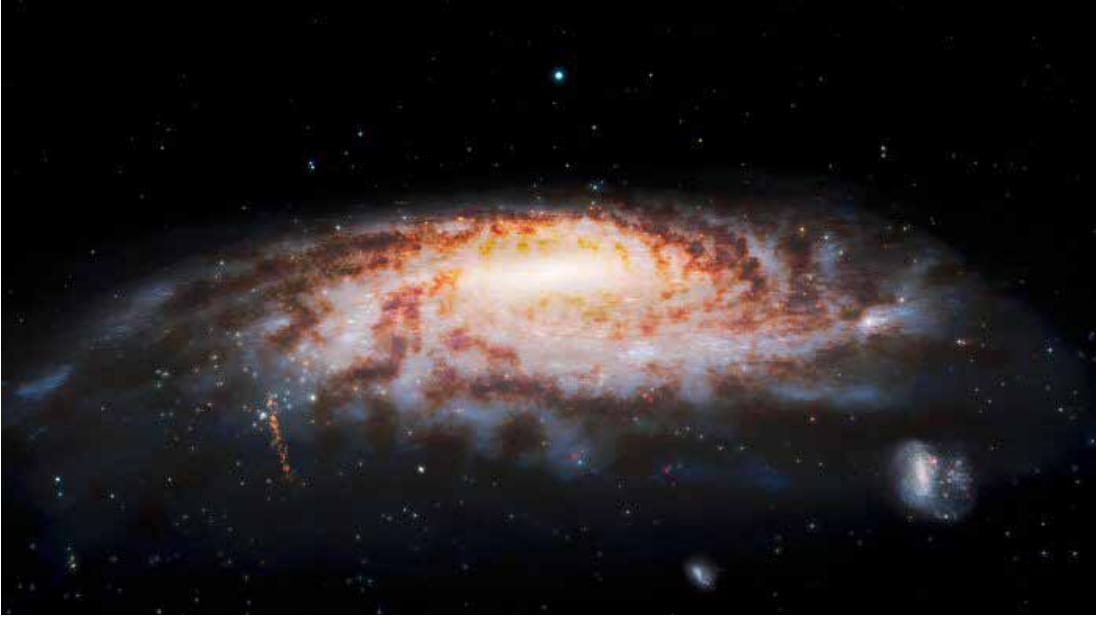
Les astronomes avaient repéré C-19 dans les données de la mission Gaia en utilisant un algorithme conçu spécifiquement pour détecter les courants stellaires. Les étoiles de C-19 ont également été identifiées par l'étude Pristine

– une recherche des étoiles les moins métalliques dans et autour de la Voie lactée à l'aide du télescope Canada-France-Hawaii à Hawaii – et elles avaient été jugées suffisamment intéressantes pour mériter des observations de suivi. Pour identifier l'origine des étoiles de C-19, les astronomes ont tiré parti de spectres détaillés obtenus avec l'instrument GRACES du télescope Gemini North à Hawaii. L'équipe a également recueilli des données à l'aide d'un spectrographe monté sur le Gran Telescopio Canarias à La Palma, dans les îles Canaries.

*Distribution des amas globulaires de la Voie lactée superposée à une image de notre galaxie construite à partir des données de la sonde Gaia. La couleur des points représente la métallicité, c'est-à-dire la quantité d'éléments lourds par rapport au Soleil. Les étoiles de C-19 sont indiquées par les symboles bleu clair.*

*En insert, l'amas Messier 10.*  
(N. Martin/observatoire astronomique de Strasbourg/CNRS ; Canada-France-Hawaii Telescope / Caelum ; ESA/Gaia/DPAC)





GRACES a fourni des indices critiques montrant que C-19 résulte de la destruction d'un amas globulaire et non, ce qui est plus souvent le cas, d'une galaxie naine. On savait déjà qu'il s'agissait d'un courant très pauvre en métaux, mais l'identifier comme un amas globulaire nécessitait des métallicités précises et des abondances chimiques détaillées uniquement disponibles avec des spectres à haute résolution.

On pensait que les amas globulaires avaient une métallicité d'au moins 0,2 %, mais C-19 présente une métallicité bien faible, inférieure à 0,05 %, ce qui n'a jamais été observé pour un système stellaire dans la Voie lactée ou l'univers proche.

En plus de remettre en cause les connaissances et les modèles actuels qui n'envisagent pas que des structures composées uniquement de telles étoiles puissent exister, cette découverte ouvre une fenêtre unique sur les premiers âges de la formation des étoiles et sur la mise en place des structures stellaires à cette époque très reculée. Les éléments lourds étant produits

*Le courant C-19 est représenté par l'alignement vertical d'étoiles en bas à gauche dans cette illustration. Les observations effectuées à l'aide du télescope Gemini Nord révèlent que les étoiles de ce courant faisaient autrefois partie d'un amas globulaire d'étoiles qui a été déchiré par les interactions gravitationnelles avec notre galaxie. Le Grand Nuage de Magellan et le Petit Nuage de Magellan (satellites de la Voie lactée) apparaissent en bas à droite.*  
(Gemini Observatory / NOIRLab / NSF / AURA / J. da Silva / Spaceengine / M. Zamani)

par les générations successives d'étoiles massives, la très faible métallicité des étoiles de C-19 indique qu'elles se sont formées au tout début de l'Univers. L'existence même de ce courant prouve que les amas globulaires et les premiers éléments constitutifs de la Voie lactée ont dû se former dans des environnements pauvres en métaux, avant que des générations successives d'étoiles n'apportent à l'Univers des éléments plus lourds.

## ***Objet poussiéreux autour de TIC 400799224***

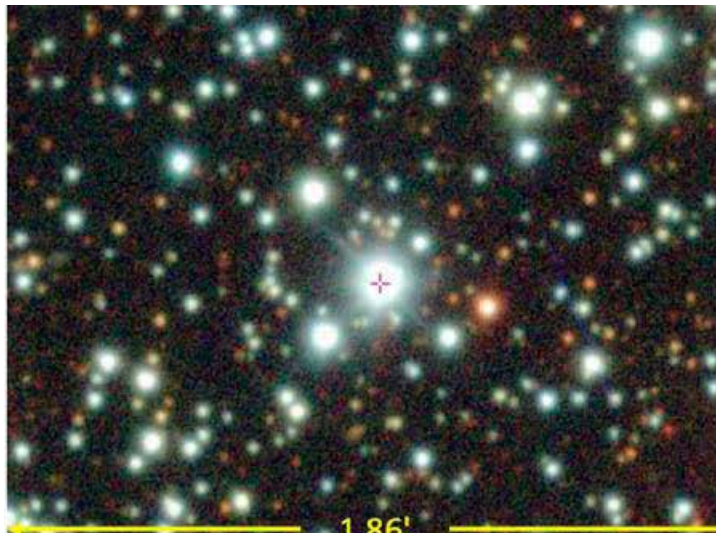
*Basé sur un communiqué CfA*

L'observatoire spatial TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), lancé en 2018, recherche les planètes autour des étoiles les plus proches du Soleil. TESS a jusqu'à présent découvert 172 exoplanètes confirmées et compilé une liste de 4 703 exoplanètes candidates. Sa caméra sensible prend des images qui couvrent un énorme champ de vision, plus de deux fois la superficie de la constellation d'Orion. Le catalogue TIC (TESS Input Catalog) contient plus d'un milliard d'objets. Le suivi de ces objets a révélé des pulsations stellaires, des supernovæ, des planètes en désintégration, des effets de lentilles gravitationnelles dans des binaires, des étoiles triples en éclipse, l'occultation par des disques de poussière, et bien d'autres choses encore.

Parmi ces objets, TIC 400799224 a été repéré en raison de sa chute rapide de luminosité, de près de 25 % en seulement quelques heures, suivie de plusieurs variations de luminosité brutales qui pourraient chacune être interprétées comme une éclipse.

Les astronomes ont pu compléter leur étude de TIC 400799224 à l'aide de données de télescopes qui, pour certains, cartographient le ciel depuis plus longtemps que TESS. Ils ont découvert que l'objet est probablement une binaire, et que l'une des étoiles varie avec une période de 19,77 jours, probablement à cause d'un corps en orbite qui émet périodiquement des nuages de poussière qui occultent l'étoile. Mais alors que la périodicité est stricte, les occultations de l'étoile par les nuages de poussière sont erratiques dans leurs formes, leurs profondeurs et leurs durées, et ne sont détectables (du moins depuis le sol) qu'un tiers du temps ou moins. La nature du corps en orbite lui-même est déroutante car la quantité de poussière émise est importante ; la désintégration d'un objet comme l'astéroïde Cérès ne demanderait que huit mille ans. Pourtant, de façon remarquable, au cours des six années pendant lesquelles cet objet a été observé, la périodicité n'a pas varié et l'objet émettant la poussière est apparemment resté intact. L'équipe prévoit de continuer à surveiller l'objet et d'intégrer des observations historiques du ciel pour tenter de déterminer ses variations sur plusieurs décennies.

***Image dans le visible et l'infrarouge proche de la source TIC 400799224 du TESS Input Catalog. Les mystérieuses variations périodiques de la lumière de l'étoile sont probablement causées par des nuages de poussière provenant de la désintégration d'une planète.  
(Powell et al., 2021)***





## TOI-2257 b, exoplanète excentrique

Basé sur un communiqué Université de Berne

Une équipe de recherche internationale avec participation liégeoise a découvert une exoplanète de type sous-Neptune en orbite autour d'une étoile naine rouge, TOI-2257. La découverte a été faite grâce aux observations réalisées par l'observatoire SAINT-EX (Search And characterIsatioN of Transiting EXoplanets) au Mexique.

Les naines rouges sont de petites étoiles beaucoup plus froides que le Soleil. Autour de telles étoiles, la présence d'eau liquide est possible sur des planètes beaucoup plus proches de l'étoile que dans le Système solaire. La distance entre une exoplanète et son étoile est un facteur crucial pour sa détection : plus la planète est proche de l'étoile, plus la probabilité qu'elle puisse être détectée est élevée, que ce soit par l'observation de transits ou la mesure de variations de vitesse radiale.

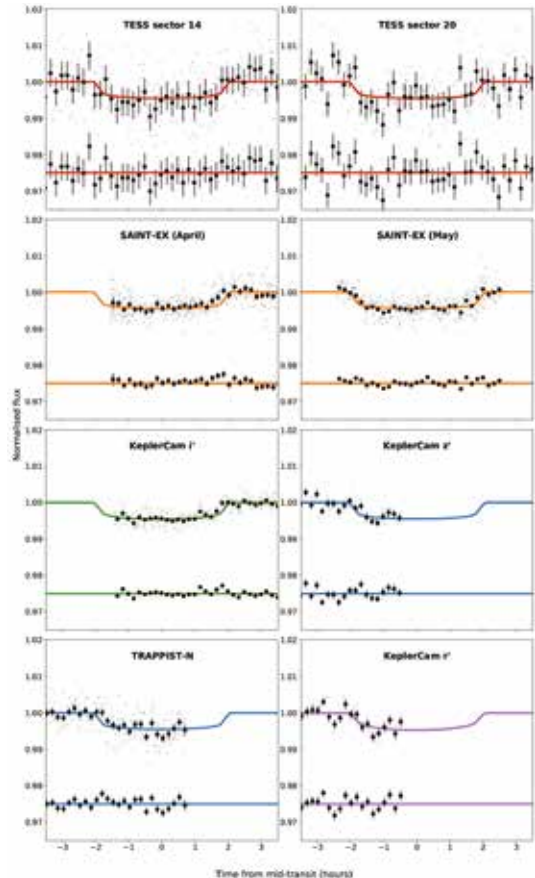
La planète TOI-2257 b a été initialement identifiée par les données du télescope spatial TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite). La petite étoile a été observée pendant quatre mois au total, mais les écarts entre les observations ne permettaient pas de préciser si la baisse de luminosité pouvait être expliquée par le transit d'une planète dont l'orbite est de 176, 88, 59, 44 ou 35 jours.

L'observation de l'étoile avec le télescope global de l'observatoire de Las Cumbres a ensuite permis d'écarter la possibilité qu'une planète ayant une période orbitale de 59 jours soit à l'origine de la baisse de luminosité.

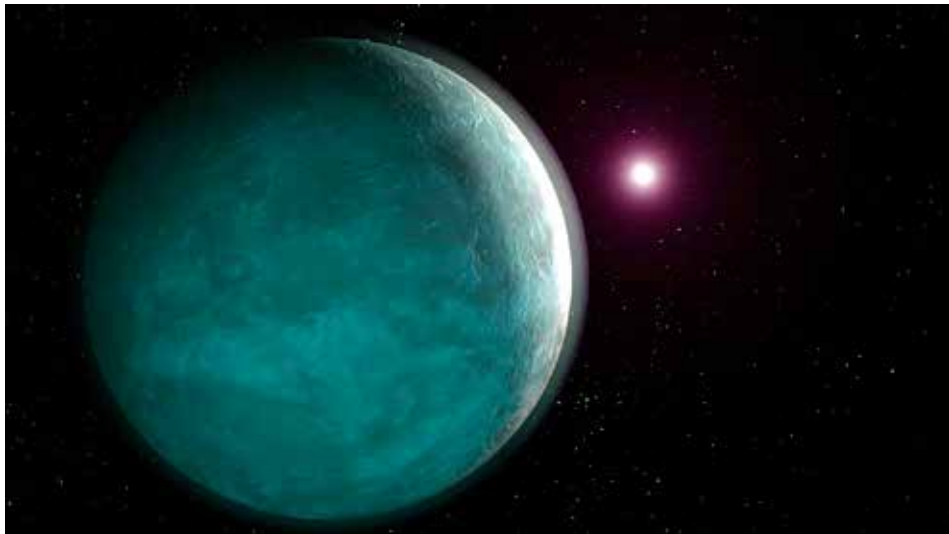
L'observation d'un transit partiel de TOI-2257 b au moyen du télescope SAINT-EX a permis de confirmer la période orbitale exacte de l'exoplanète : 35 jours. 35 jours plus tard, SAINT-EX a pu observer un transit complet, ce qui a donné plus d'informations sur les pro-

priétés du système. TOI-2257 b tourne autour de l'étoile à une distance où la présence d'eau liquide est possible sur la planète, et donc où des conditions favorables à l'émergence de la vie pourraient exister. Les planètes situées dans cette « zone habitable » près d'une naine rouge sont les plus faciles à étudier car elles ont des périodes orbitales courtes et peuvent donc être observées souvent. Le rayon de TOI-2257 b (2,2 fois plus grand que celui de la Terre) suggère que la planète est gazeuse, avec une pression atmosphérique élevée peu propice à la vie.

TOI-2257 b n'a pas une orbite circulaire, il s'agit même de la planète la plus excentrique



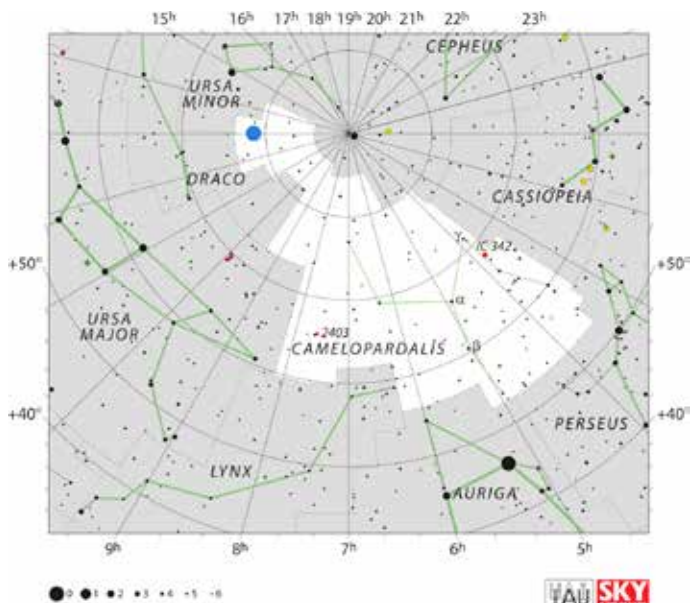
*Transit de TOI-2257 b observé au moyen de divers instruments, dont le télescope liégeois TRAPPIST-Nord. (N. Schanche et al., 2022)*



▲ *Vue d'artiste de TOI-2257 b, une sous-Neptune tournant autour d'une naine M en 35,2 jours. Sa masse vaut 5,45 fois celle de la Terre. Le demi grand-axe de l'orbite est de 0,145 unités astronomiques et son excentricité de 0,5.* (NASA)

▼ *Le point bleu situe l'étoile dans les constellations polaires.* (IAU and Sky & Telescope magazine; Roger Sinnott & Rick Fienberg)

jamais découverte orbitant autour d'une étoile froide. En termes d'habitabilité potentielle, c'est une mauvaise nouvelle. Si la température moyenne de la planète est confortable, elle varie de  $-80^{\circ}\text{C}$  à environ  $100^{\circ}\text{C}$  selon la position sur l'orbite. Une explication possible de cette orbite surprenante est que, plus loin dans le système, une planète géante perturberait TOI 2257 b. D'autres observations de vitesse radiale de l'étoile permettront de confirmer l'excentricité et de rechercher d'éventuelles planètes supplémentaires qui n'ont pas pu être observées en transit.



## ***Le monstre caché de Mrk 462***

*Basé sur un communiqué NASA/Chandra*

La découverte d'un trou noir supermassif dans une galaxie relativement petite pourrait aider les astronomes à percer le mystère entourant la façon dont les très grands trous noirs se développent.

L'observatoire spatial X Chandra a permis d'identifier un trou noir d'une masse équivalant à environ 200 000 fois celle du Soleil caché dans le gaz et la poussière de la galaxie Mrk 462 – une naine ne contenant que quelques centaines de millions d'étoiles. C'est l'une des rares galaxies naines où l'on a pu observer un trou noir supermassif fortement obscurci par la poussière. En même temps le trou noir de Mrk 462 est l'un des plus petits trous noirs supermassifs connus – un monstre notoirement difficile à trouver.

Dans les grandes galaxies, les astronomes identifient souvent les trous noirs en recherchant les mouvements rapides des étoiles centrales. Les galaxies naines sont trop faibles pour que la plupart des instruments actuels puissent les détecter. Une autre technique consiste à rechercher les signatures des trous noirs en expansion, comme le gaz chauffé à des millions de degrés et émettant des rayons X lorsqu'il tombe vers un trou noir.

Les chercheurs ont utilisé Chandra pour examiner huit galaxies naines soupçonnées de contenir des trous noirs, à partir de données optiques recueillies par le Sloan Digital Sky Survey. Sur ces huit galaxies, seule Mrk 462 présentait la signature en rayons X d'un trou noir en croissance.

L'intensité inhabituellement élevée des rayons X de haute énergie par rapport à ceux de basse énergie, ainsi que les comparaisons avec les données obtenues à d'autres longueurs d'onde, indiquent que le trou noir de Mrk 462 est fortement obscurci par des nuages de gaz et de poussières.

La découverte de cet exemple pourrait signifier qu'il existe beaucoup plus de galaxies naines avec des trous noirs similaires.

Cela pourrait aider à répondre à une question majeure en astrophysique : comment les trous noirs ont-ils pu devenir si gros si tôt dans la vie de l'Univers ?

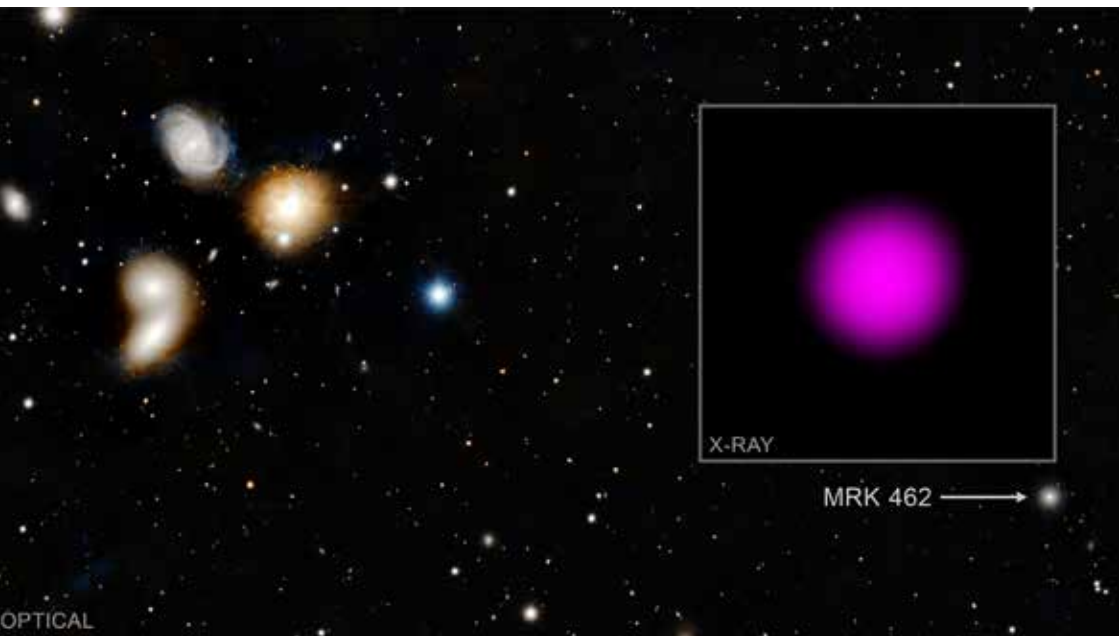
Des recherches antérieures avaient montré que les trous noirs pouvaient atteindre un milliard de masses solaires alors que l'Univers avait moins d'un milliard d'années, soit une petite fraction de son âge actuel. Il est possible que ces énormes objets aient été créés lorsque des étoiles massives se sont effondrées pour former des trous noirs qui ne pesaient qu'environ 100 fois autant que le Soleil. Les travaux théoriques peinent toutefois à expliquer comment ils ont pu prendre du poids assez rapidement pour atteindre les tailles observées dans l'Univers primitif.

Une autre explication est que l'Univers primitif était ensémené de trous noirs contenant des dizaines de milliers de masses solaires lorsqu'ils ont été créés – peut-être à la suite de l'effondrement de gigantesques nuages de gaz et de poussière.

Si beaucoup de galaxies naines contiennent un trou noir supermassif, il se pourrait que les petits trous noirs issus de la première génération d'étoiles se sont développés étonnamment vite pour former les objets de milliards de masses solaires de l'Univers primitif. Au contraire, si peu de naines contiennent un trou noir, il serait plus vraisemblable que ces trous noirs aient commencé leur vie avec des masses de dizaines de milliers de Soleils.

Ces considérations s'expliquent par le fait que les conditions nécessaires à l'effondrement d'un nuage géant en un trou noir de taille moyenne devraient être rares. On ne s'attend donc pas à ce qu'une grande fraction des galaxies naines contiennent des trous noirs supermassifs. Les trous noirs de masse stellaire, en revanche, devraient se trouver dans toutes les galaxies.

Il est bien sûr délicat de tirer des conclusions à partir d'un seul exemple, et ce résultat devrait encourager des recherches beaucoup plus approfondies de trous noirs se cachant dans des galaxies naines.



*Les rayons X émis par la galaxie naine Mrk 462 (en médaillon) et détectés par l'observatoire spatial Chandra, révèlent la présence d'un trou noir supermassif en expansion. La masse contenue dans ce trou noir – environ 200 000 fois celle du Soleil – fournit des informations aux astronomes sur la façon dont certains des plus anciens trous noirs de l'Univers ont pu se former et croître il y a des milliards d'années. L'image de fond, prise dans le domaine optique, est due au télescope Pan-STARRS à Hawaii. On y voit, à gauche, plusieurs galaxies qui font partie du groupe HCG068.*

*La galaxie qui émet de grandes quantités de rayons X est la galaxie beaucoup plus petite située en bas à droite de l'image (marquée par la flèche). Mrk 462 ne contient que quelques centaines de millions d'étoiles, cent fois moins d'étoiles qu'une galaxie comme la Voie lactée. Les trous noirs sont notoirement difficiles à trouver dans les galaxies naines parce que généralement trop petites et trop faibles pour que les télescopes optiques puissent suivre les mouvements rapides des étoiles en leur centre. (NASA/CXC/Dartmouth Coll./J. Parker & R. Hickox; Pan-STARRS)*

## ***Courants stellaires et matière noire***

*Basé sur un communiqué UChicago*

La récente cartographie de douze courants stellaires en orbite dans le halo galactique représente un pas de plus vers la compréhension de la matière noire. Ces courants nous renseignent également sur la formation et l'histoire de la Voie lactée. En particulier, leur analyse révèle comment notre galaxie s'est développée progressivement pendant des milliards d'années en cannibalisant des systèmes stellaires plus petits. Ces courants sont perturbés par l'attraction gravitationnelle de la Voie lactée et finissent par faire partie de celle-ci. Au fur et à mesure que notre galaxie vieillit, elle grossit.

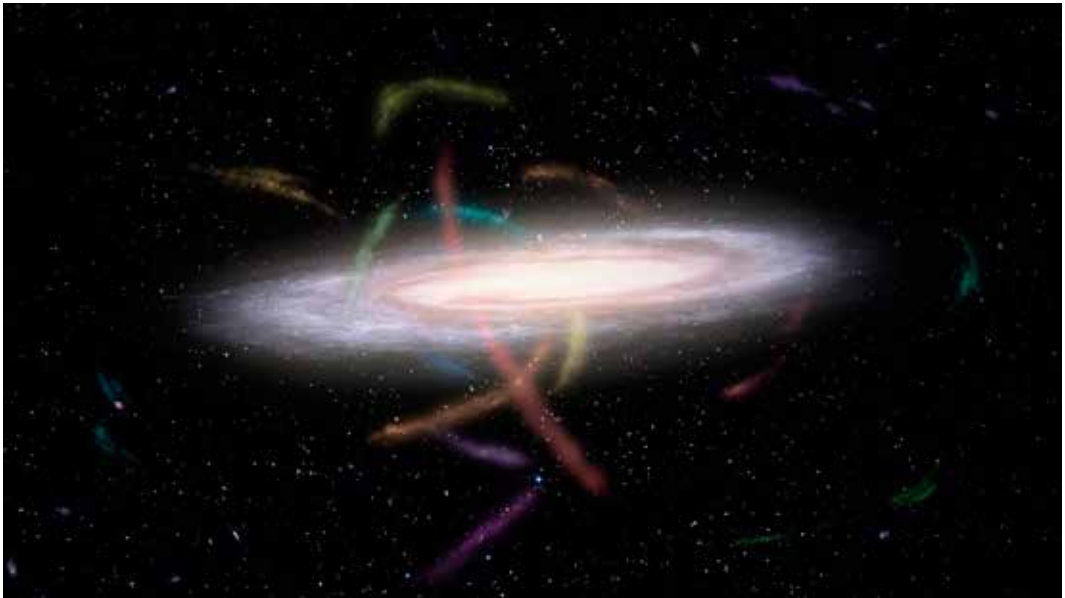
Les astronomes ont conçu un programme spécifique, le Southern Stellar Stream Spectroscopic Survey (S5), pour mesurer les propriétés de nombreux courants stellaires. Ils ont mesuré la vitesse des étoiles à l'aide de l'Anglo-Australian Telescope, un télescope optique de 4 mètres situé en Australie. En plus de

mesurer leur vitesse, les astronomes peuvent utiliser ces observations pour déterminer la composition chimique des étoiles, ce qui nous indique où elles sont nées. Les observations de la mission spatiale européenne Gaia ont également été un ingrédient crucial du succès de S5. Gaia a fourni des mesures extrêmement précises des positions et des mouvements des étoiles, ce qui est essentiel pour identifier les membres des courants stellaires.

Les courants stellaires peuvent provenir soit de galaxies perturbées, soit d'amas d'étoiles. Les étoiles arrachées à un amas ont toutes la même composition chimique car elles sont nées en même temps, alors que les étoiles arrachées à une galaxie ont des compositions différentes. Ces deux composantes devraient fournir des indications complémentaires sur la nature de la matière noire.

***Représentation artistique de la Voie lactée entourée de dizaines de courants stellaires. Ces courants sont les vestiges de galaxies satellites et d'amas globulaires détruits par la gravité de notre galaxie.***

***(James Josephides et Collaboration S5)***



## Réionisation

Basé sur un communiqué University of Iowa

Environ 400 000 ans après la naissance de l'Univers a commencé une période appelée l'époque de réionisation. Au cours de cette période, l'Univers, très chaud, a commencé à se refroidir et la matière s'est agglomérée, formant les premières étoiles et galaxies. Au fur et à mesure que ces étoiles et galaxies émergeaient, leur énergie chauffait le milieu environnant, réionisant une partie de l'hydrogène restant dans l'Univers.

La réionisation de l'Univers est bien connue, mais il est difficile de déterminer comment elle s'est produite. Pour en savoir plus, les astronomes ont cherché des indices au-delà de la Voie lactée. Dans une nouvelle étude, ils ont identifié une source possible parmi des galaxies dites « à continuum de Lyman ».

Les astronomes ont identifié un trou noir, un million de fois plus brillant que le Soleil, qui pourrait être très semblable aux sources qui ont provoqué la réionisation de l'Univers. Des observations réalisées en février 2021 avec l'observatoire X Chandra indiquent que les rayonnements émis par le trou noir sont suffisamment puissants pour se frayer des chemins au travers de nuages de la galaxie hôte.

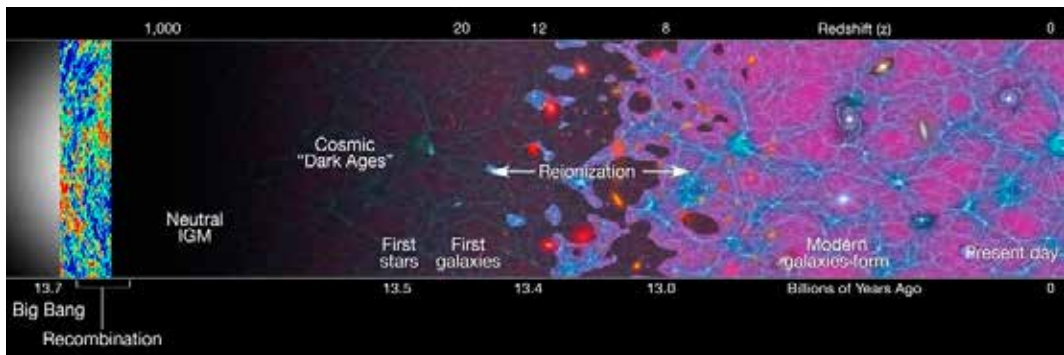
Le rayonnement ultraviolet de tels trous noirs a pu réioniser le milieu intergalactique au début de l'Univers.

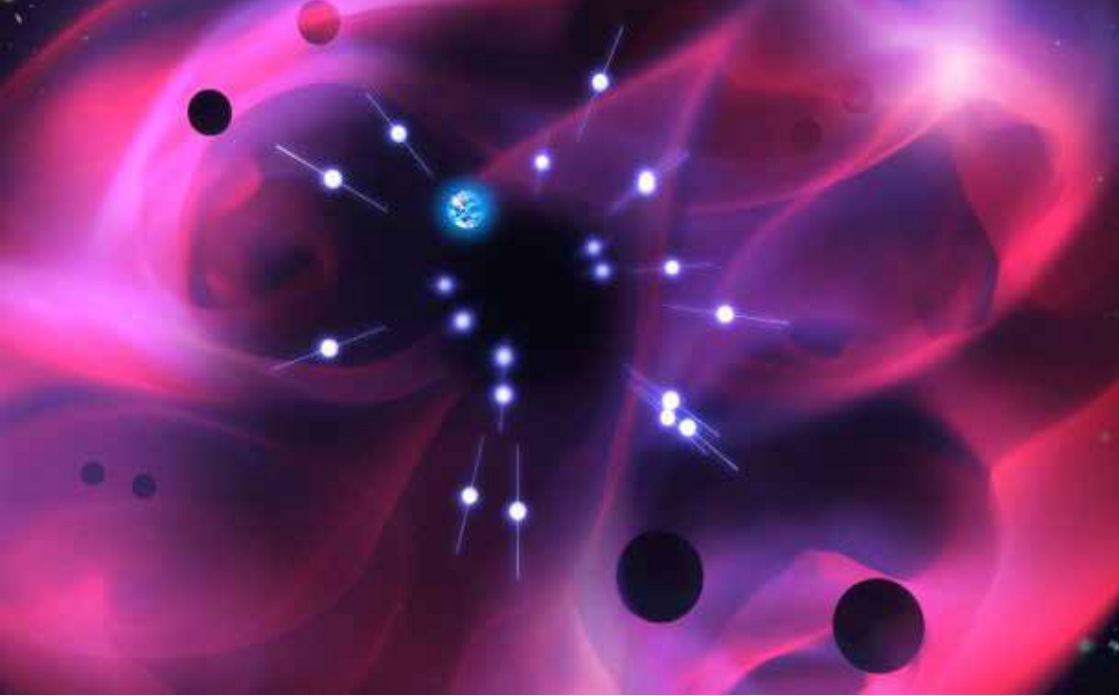
Nous n'avons pas encore pu voir les sources qui ont réellement alimenté la réionisation de l'Univers car elles sont trop éloignées. C'est là l'un des objectifs du télescope spatial James Webb.

**Les grandes étapes de l'évolution du cosmos.**

**Les atomes d'hydrogène de l'Univers se sont formés lors de la phase de recombinaison, qui s'est produite environ 380 000 ans après le Big Bang. Le refroidissement de l'Univers avait alors permis aux électrons et aux protons de s'assembler plus vite qu'ils ne se dissociaient. L'Univers était opaque avant la recombinaison, en raison de la diffusion des photons par les électrons libres. Il est devenu de plus en plus transparent à mesure que se formaient des atomes d'hydrogène. L'Univers rempli d'hydrogène neutre est transparent dans la majeure partie du spectre électromagnétique, mais on parle de l'âge des ténèbres car la seule source de rayonnement était le fond cosmique qui se décalait progressivement vers les grandes longueurs d'onde.**

**Un deuxième changement de phase s'est produit avec la formation d'étoiles suffisamment énergiques pour ioniser l'hydrogène neutre. L'Univers a subi cette réionisation entre 150 millions et un milliard d'années après le Big Bang. L'expansion de l'Univers avait fortement réduit la densité de sorte que la diffusion des photons par les électrons était bien moindre qu'avant la recombinaison. L'Univers d'hydrogène ionisé de faible densité était devenu transparent, ce qui nous permet de le parcourir avec nos télescopes. (Robertson et al. 2010)**





## ***Le fond cosmique d'ondes gravitationnelles***

*Basé sur un communiqué University of Birmingham*

Depuis plusieurs décennies, les scientifiques cherchent des preuves de l'existence d'un fond d'ondes gravitationnelles de très basse fréquence.

Ces ondulations à l'échelle d'une année-lumière, conséquence de la théorie de la relativité générale d'Einstein, imprègnent tout l'espace-temps et pourraient provenir de la fusion des trous noirs les plus massifs de l'Univers ou d'événements survenus peu après la formation de l'Univers, le Big Bang.

La collaboration IPTA (International Pulsar Timing Array) a récemment publié les résultats de sa recherche d'ondes gravitationnelles. Les données proviennent de l'EPTA (European Pulsar Timing Array), du NANOGrav (North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves) et du PPTA (Parkes Pulsar Timing Array). Elles portent sur la synchronisation très précise de 65 pulsars milliseconde – des vestiges stellaires qui tournent des centaines de fois par seconde, balayant d'étroits faisceaux d'ondes

*Vue d'artiste d'un réseau de pulsars autour de la Terre baignant dans un fond d'ondes gravitationnelles.  
(C. Knox)*

radio qui nous apparaissent comme des impulsions en raison de la rotation.

L'analyse des données combinées révèle des preuves solides d'un signal à ultra-basse fréquence détecté pour de nombreux pulsars. Les caractéristiques de ce signal commun sont en accord avec celles attendues d'un fond d'ondes gravitationnelles.

Le fond d'ondes gravitationnelles est formé par de nombreux signaux différents qui se chevauchent et qui sont émis par la population cosmique de trous noirs binaires supermassifs (c'est-à-dire deux trous noirs supermassifs en orbite l'un autour de l'autre et qui doivent finir par fusionner).

Ce résultat renforce l'émergence progressive de signaux similaires qui ont été trouvés dans les ensembles de données individuels des collaborations sur la synchronisation des pulsars au cours des dernières années.

La détection d'ondes gravitationnelles provenant d'une population de trous noirs binaires massifs ou d'une autre source cosmique devrait donner des informations essentielles

sur la formation et la croissance des galaxies ou sur les processus cosmologiques en cours dans l'Univers naissant. Un effort international majeur de l'ampleur d'IPTA est nécessaire pour atteindre cet objectif, et les prochaines années pourraient nous apporter un âge d'or pour ces explorations de l'Univers.

Les scientifiques se gardent cependant d'une interprétation trop rapide et cherchent à savoir ce que ce signal pourrait être d'autre. Par exemple, il pourrait simplement résulter du bruit présent dans les données des pulsars individuels qui auraient été modélisés de manière incorrecte dans les analyses.

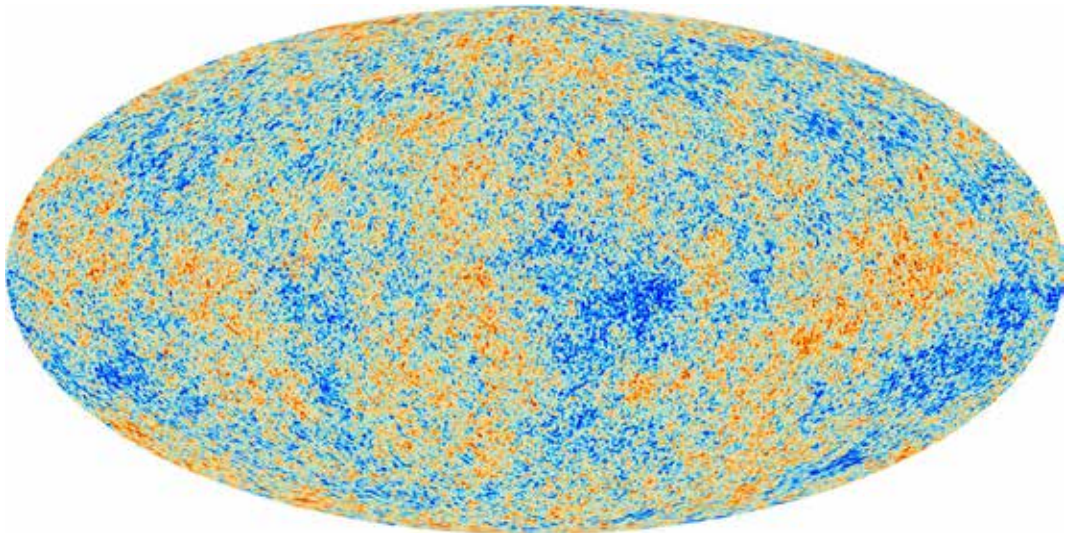
Pour s'assurer que le fond d'ondes gravitationnelles est à l'origine de ce signal à très basse fréquence, l'IPTA doit également détecter les corrélations spatiales entre les pulsars. Cela signifie que chaque paire de pulsars doit répondre d'une manière très particulière aux ondes gravitationnelles, en fonction de leur séparation sur le ciel.

Ces corrélations de signature entre les paires de pulsars constituent la « preuve irréfutable » de la détection d'un fond d'ondes gravitationnelles. Sans elles, il est difficile

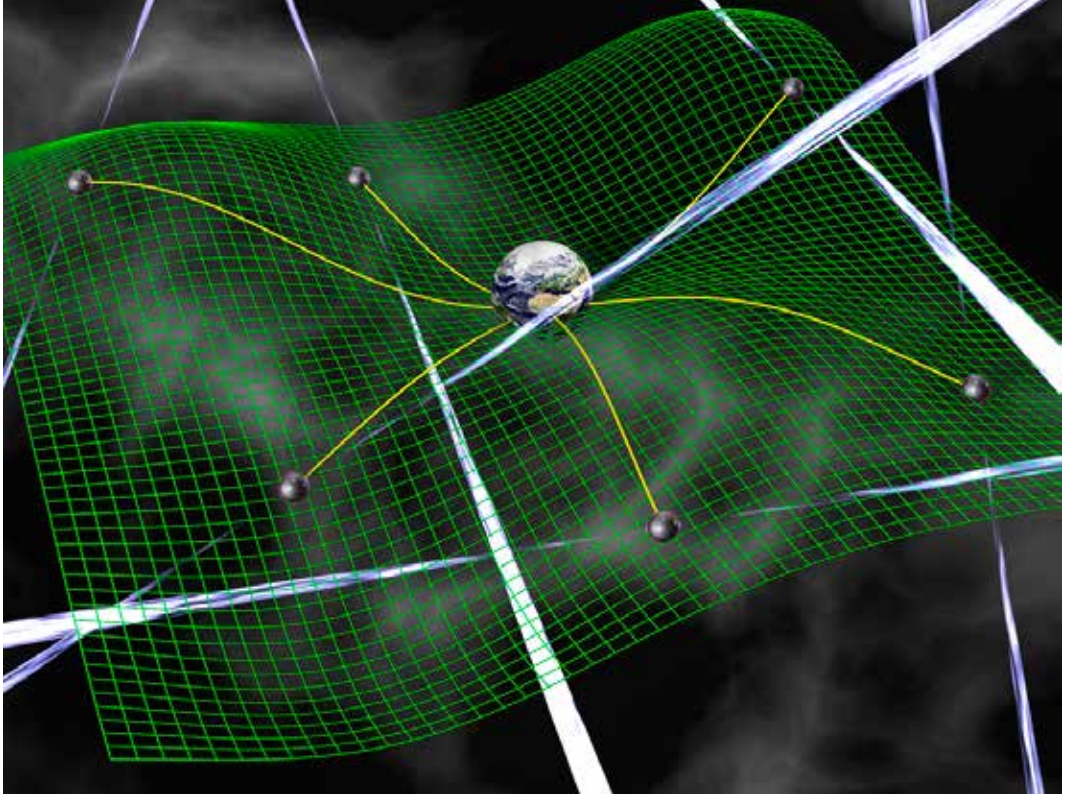
de prouver qu'un autre processus n'est pas responsable du signal. Il est significatif que la première indication d'un fond d'ondes gravitationnelles soit un signal commun comme celui observé dans l'IPTA. La question de savoir si ce signal ultra-basse fréquence est corrélé entre les pulsars conformément aux prédictions théoriques sera résolue par la poursuite de la collecte de données, l'élargissement des réseaux de pulsars surveillés et la poursuite des recherches dans les ensembles de données plus longs et plus importants qui en résultent.

Des signaux cohérents comme celui récupéré avec l'analyse IPTA ont également été publiés dans des ensembles de données individuels plus récents que ceux utilisés dans l'IPTA, provenant de chacune des trois collaborations fondatrices. L'analyse IPTA démontre la puissance de la combinaison internationale, qui fournit des preuves

*Une des sources du fond d'ondes gravitationnelles pourrait être d'origine cosmologique, un peu comme le fond cosmique de micro-ondes vu ici par le satellite Planck. (ESA)*







***Les ondes gravitationnelles déforment l'espace-temps et affectent les signaux radio provenant des pulsars.  
(David Champion)***

solides de l'existence d'un fond d'ondes gravitationnelles par rapport aux preuves marginales ou absentes des ensembles de données constitutifs. En outre, de nouvelles données provenant du télescope MeerKAT et de l'InPTA (Indian Pulsar Timing Array), le tout dernier membre de l'IPTA, viendront étoffer les futurs ensembles de données.

Le premier indice d'un fond d'ondes gravitationnelles serait un signal comme celui observé dans l'IPTA. Ensuite, avec davantage de données, le signal deviendra plus significatif et présentera des corrélations spatiales, ce qui démontrera qu'il s'agit bien d'un fond d'ondes gravitationnelles.

Compte tenu des derniers résultats publiés par les différents groupes, qui sont maintenant tous en mesure de récupérer clairement le signal commun, l'IPTA est optimiste quant à ce qui pourra être réalisé une fois ces données combinées dans la prochaine mouture des données de l'IPTA. Les travaux sont déjà en cours sur cette nouvelle version de données, qui comprendra au minimum des ensembles de données actualisées provenant des quatre PTA constitutives de l'IPTA. L'analyse de l'ensemble de données DR3 devrait se terminer dans les prochaines années.

## ***XO-3b, une Jupiter chaude inhabituelle***

*Basé sur un communiqué McGill University*

Des vents qui atteignent la vitesse du son, ce n'est là qu'un aspect de l'atmosphère de l'exoplanète XO-3b, qui fait partie de la catégorie des Jupiters chaudes. L'orbite excentrique de la planète entraîne également des variations saisonnières des centaines de fois plus fortes que celles que nous connaissons sur Terre. Des travaux récents donnent un nouvel aperçu de ce à quoi ressemblent les saisons sur une planète comme celle-là, située en dehors du Système solaire. Les chercheurs suggèrent également que l'orbite excentrique, des températures de surface extrêmement élevées (2000 degrés C – assez chaudes pour vaporiser la roche) et un gonflement anormal trahissent l'histoire de la planète XO-3b. Ces découvertes pourraient faire progresser notre compréhension de la formation et de l'évolution des exoplanètes et fournir un contexte pour les planètes du Système solaire.

Les Jupiters chaudes sont des mondes massifs et gazeux, qui orbitent plus près de leur étoile mère que Mercure ne l'est du Soleil. Elles semblent être communes dans toute la Galaxie. Bien qu'il s'agisse du type d'exoplanète le plus étudié, de grandes questions subsistent quant à leur mode de formation. Pourrait-il y avoir des sous-classes de Jupiters chaudes avec des histoires de formation différentes ? Par exemple, ces planètes prennent-elles forme loin de leur étoile – à une distance

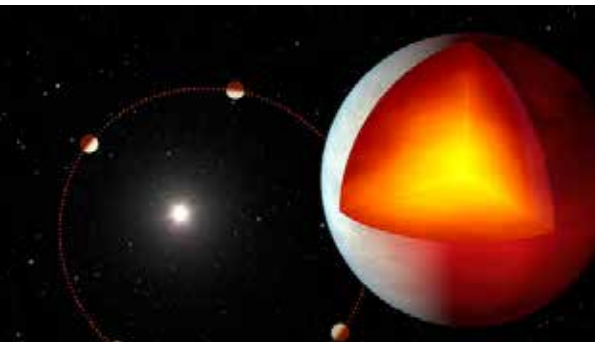
où il fait suffisamment froid pour que des molécules comme l'eau deviennent solides – ou plus près ? Le premier scénario correspond mieux aux théories sur la naissance des planètes dans notre propre système, mais le phénomène qui pousserait ce type de planètes à migrer si près de leur étoile mère reste mystérieux.

Pour tester ces idées, les chercheurs ont utilisé les données du télescope spatial Spitzer, aujourd'hui à la retraite, pour examiner l'atmosphère de XO-3b. Ils ont observé des saisons contrastées et mesuré la vitesse des vents en réalisant un suivi des phases de la planète alors qu'elle accomplissait une révolution complète autour de son étoile hôte.

Cette planète constitue un cas extrêmement intéressant pour l'étude de la dynamique atmosphérique et de l'évolution interne, car elle se situe dans une gamme intermédiaire de masse planétaire où des processus normalement négligés pour les Jupiters chaudes moins massives peuvent entrer en jeu. XO-3b a une orbite elliptique bien allongée plutôt que l'orbite circulaire de presque toutes les autres Jupiters chaudes connues. Cela suggère qu'elle a récemment migré vers son étoile ; si c'est le cas, elle finira par se stabiliser sur une orbite plus circulaire.

L'orbite excentrique de la planète entraîne des variations saisonnières des centaines de fois plus fortes que celles que nous connaissons sur Terre. La planète entière reçoit trois fois plus d'énergie lorsqu'elle est proche de son étoile pendant une sorte de bref été que lorsqu'elle est loin de l'étoile.

Les chercheurs ont réestimé la masse et le rayon de la planète grâce aux observations de Gaia, qui a précisé la distance du système. Il s'avère que la

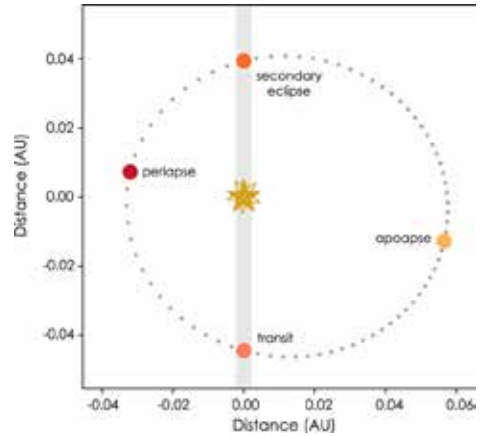


***L'étude de XO-3b, une Jupiter chaude sur une orbite excentrique, devrait faire progresser la compréhension de la formation et de l'évolution des exoplanètes et fournir un contexte pour les planètes de notre propre système. (NASA/JPL-Caltech/R. Hurt/IPAC)***

planète est plus grosse que ne le prévoit la théorie, ce qui indique que son intérieur pourrait être particulièrement énergétique. Les observations de Spitzer indiquent également que la planète produit une grande partie de sa propre chaleur, car l'émission thermique excessive de XO-3b n'est pas saisonnière – elle est observée tout au long de l'orbite. Il est possible que l'excès de chaleur provienne de l'intérieur de la planète, par un processus de chauffage par effet de marée. L'influence gravitationnelle exercée par l'étoile sur la planète oscille au fur et à mesure que celle-ci s'éloigne puis se rapproche de l'étoile. Les changements de pression intérieure qui en résultent produisent de la chaleur.

Cette Jupiter chaude inhabituelle fournit l'occasion de tester les idées sur les processus de formation qui peuvent produire certaines caractéristiques chez ces exoplanètes. Par exemple, l'échauffement dû aux marées dans d'autres Jupiters chaudes pourrait également être un signe de migration récente.

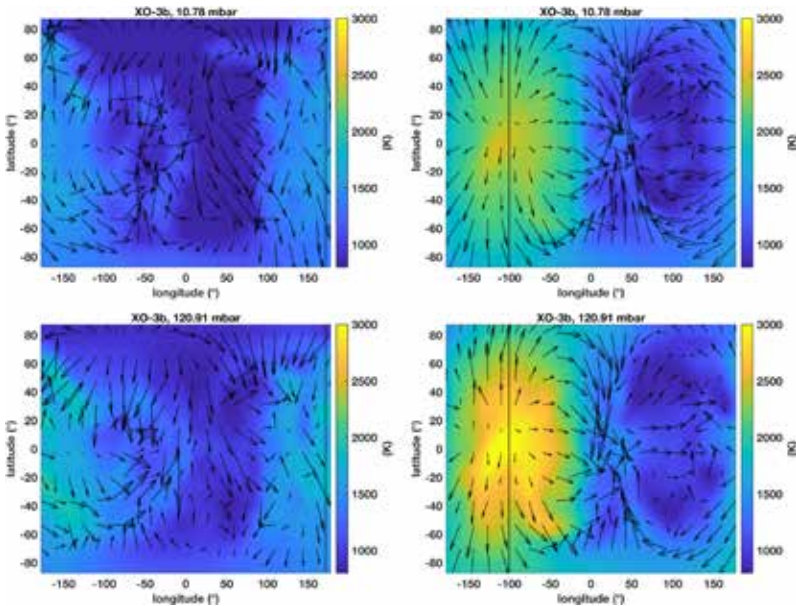
XO-3b ne permettra pas à elle seule de percer le mystère, mais elle constitue un test important pour les idées émergentes sur ces géantes brûlantes.



### Orbite de XO-3b.

Les points représentent la position de la planète d'heure en heure. La bande grise verticale est la ligne de visée depuis la Terre.

(Wong et al 2014, Dang et al. 2022)



Température (échelle de couleur) et vents (flèches) aux niveaux de 10 et 120 mbar selon un modèle correspondant à l'apoapse (gauche) et au périapse (droite). Au périapse, le modèle présente un fort contraste de température entre le côté jour et le côté nuit de la planète. À l'apoapse, le gradient de température est atténué et les flux zonaux et méridiens du vent sont supprimés. (Dang et al. 2022)

## ***La météorite martienne ALH 84001***

*Basé sur un communiqué  
Carnegie Institution for Science*

La météorite Allan Hills (ALH) 84001, a été découverte dans l'Antarctique en 1984 et est l'une des plus anciennes connues qui sont arrivées sur la Terre après avoir été éjectées de Mars. L'analyse de l'origine des minéraux qu'elle contient peut aider à révéler à la fois les processus géochimiques survenus au début de l'histoire de la Terre et le potentiel d'habitabilité de Mars. Une nouvelle étude indique que les molécules organiques de la météorite ont été synthétisées lors d'interactions entre l'eau et les roches qui se sont produites sur la Planète rouge il y a environ 4 milliards d'années.

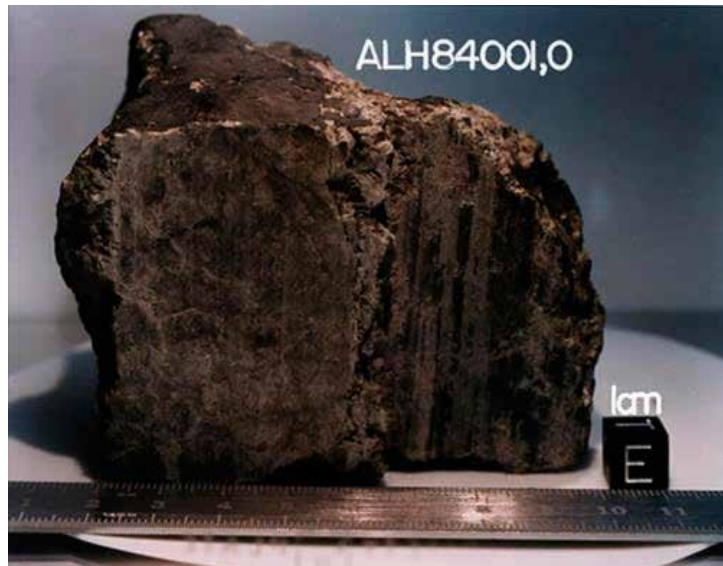
Les molécules organiques contiennent du carbone et de l'hydrogène, et parfois de l'oxygène, de l'azote, du soufre et d'autres éléments. Les composés organiques sont généralement associés à la vie, bien qu'ils puissent également être créés par des processus non biologiques, ce que l'on appelle la chimie organique abiotique.

Pendant des années, les scientifiques ont débattu de l'histoire de l'origine du carbone organique trouvé dans la météorite Allan Hills 84001, avec des possibilités incluant divers processus abiotiques liés à l'activité volcanique, des événements d'impact sur Mars, ou l'exposition hydrologique, ainsi que potentiellement les restes d'anciennes formes de vie sur Mars ou la contamination de son atterrissage en catastrophe sur Terre.

***La météorite Allan Hills  
84001.  
(NASA/JSC/Stanford  
University)***

Les chercheurs ont utilisé diverses techniques sophistiquées de préparation et d'analyse d'échantillons, notamment l'imagerie nanométrique, l'analyse isotopique et la spectroscopie, pour révéler l'origine des molécules organiques dans la météorite Allan Hills 84001. Ils ont trouvé des preuves d'interactions eau-roche similaires à celles qui se produisent sur Terre. Les échantillons indiquent que les roches martiennes ont subi deux processus géochimiques importants. Le premier, appelé serpentinisation, se produit lorsque des roches ignées riches en fer ou en magnésium interagissent chimiquement avec de l'eau en circulation, modifiant leur minéralogie et produisant de l'hydrogène dans le processus. L'autre, appelée carbonatation, implique une interaction entre les roches et l'eau légèrement acide contenant du dioxyde de carbone dissous et aboutit à la formation de minéraux carbonatés.

On ne sait pas si ces processus ont été induits de manière simultanée ou séquentielle, mais les preuves indiquent que les interactions entre l'eau et les roches ne se sont pas produites sur une période prolongée. Ce qui est évident, cependant, c'est que les réactions ont





produit de la matière organique à partir de la réduction du dioxyde de carbone.

Ces caractéristiques minéralogiques sont rares dans les météorites martiennes et, bien que la carbonatation et la serpentinisation aient été mises en évidence par les sondes en orbite martienne et que la carbonatation ait été trouvée dans d'autres météorites martiennes moins anciennes, c'est la première fois que ces processus se produisent dans des échantillons de l'ancienne Mars. Des molécules organiques ont été détectées dans d'autres météorites martiennes et par le rover Curiosity, ce qui indique que la synthèse abiotique de molécules organiques a fait partie de la géochimie martienne pendant une grande partie de l'histoire de la planète.

Ces types de réactions géologiques non biologiques sont responsables d'un pool de composés organiques carbonés à partir desquels la vie aurait pu évoluer et représentent un signal de fond qui doit être pris en compte lors de la recherche de preuves de vie ancienne

***Image à haute résolution prise au microscope électronique à balayage et montrant une forme tubulaire inhabituelle, dont la taille est inférieure à 1/100 de la largeur d'un cheveu, trouvée dans la météorite ALH84001. Cette structure évoque des grains de magnétite alignés à la façon de magnétosomes de bactéries. L'interprétation biologique a pu être écartée. (NASA)***

sur Mars. De plus, si ces réactions se sont produites sur la Mars primitive, elles ont dû se produire sur l'ancienne Terre, et pourraient éventuellement expliquer les résultats observés sur Encelade, une lune de Saturne. Tout ce qui est nécessaire pour ce type de synthèse organique est qu'une saumure contenant du dioxyde de carbone dissous percole à travers des roches ignées. La recherche de la vie sur Mars n'est pas seulement une tentative de réponse à la question « sommes-nous seuls ? ». Elle est également liée aux environnements de la Terre primitive et répond à la question « d'où venons-nous ? ».