

# Astronomie dans le monde

## ***Molécules et poussières d'étoiles***

*Basé sur un communiqué CNRS/INSU*

On a pu recréer en laboratoire les conditions proches de celles mises en jeu dans la formation des poussières d'étoiles carbonées dans l'environnement des géantes rouges. Les expériences menées montrent la présence de « nanograins » de carbone amorphe et de composés moléculaires très pauvres en aromatiques. La question de la formation des molécules polycycliques aromatiques hydrogénées, une composante importante dans l'évolution physique et chimique des régions de formation stellaire et planétaire, reste donc ouverte.

Le cycle de vie des étoiles joue un rôle important dans la complexification de la matière. En fin de vie, les étoiles de masses faibles et moyennes, comme le Soleil, deviennent des géantes rouges, éjectant de grandes quantités de matière chaude et dense. Les nouvelles molécules et les nanograins formés par cette matière diluée dans le milieu interstellaire constituent les poussières d'étoiles. Ces dernières sont les briques de formation de nouvelles étoiles et de systèmes planétaires, ainsi qu'une source d'ingrédients pour l'émergence de la vie.

La nature des nanograins formés reste néanmoins mal connue. Cette connaissance est nécessaire pour évaluer leur rôle dans les processus physico-chimiques impliquant les rayonnements énergétiques et l'interaction

***La machine Stardust simule les conditions physico-chimiques dans les géantes rouges, afin de reconstituer en laboratoire des analogues des poussières d'étoiles qui se forment dans l'environnement de ce type d'étoiles. La machine Stardust est installée à l'Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM, CSIC, Madrid). (INSU/CNRS)***

avec le gaz qui amènent à la formation de molécules complexes à leur surface.

La formation des poussières dans les enveloppes d'étoiles riches en carbone (par rapport à l'oxygène) a été modélisée en s'inspirant de la chimie dans les flammes d'hydrocarbures. Celle-ci aboutit à la formation de molécules de type polycycliques aromatiques hydrogénées (PAH) comme le pyrène et de particules de type suie, toutes deux bien connues sur Terre comme polluants. Or, les PAH sont justement une composante importante des milieux astrophysiques renfermant plus de 10% du carbone de la Galaxie. Se poser la question de leur formation est donc essentiel. Malheureusement, les poussières carbonées sont difficiles à observer dans les enveloppes d'étoiles, par manque de signatures spectrales spécifiques.

Afin de mieux comprendre la nature des poussières d'étoiles, l'équipe du projet Nanocosmos a construit un dispositif complexe d'astrophysique de laboratoire, la

machine Stardust, qui permet de simuler de manière plus précise, en comparaison aux expériences réalisées à ce jour, les conditions physiques et chimiques dans ces étoiles. En particulier il s'agit de reconstituer la formation des poussières étapes par étapes : depuis les atomes de la photosphère vers des petites molécules (les germes) qui vont déclencher la formation des poussières. Des échantillons d'analogues de poussières d'étoiles ont été produits en utilisant un mélange d'atomes de carbone et d'hydrogène moléculaire dans des proportions comparables à celles des enveloppes des géantes rouges et avec une température d'environ 1000 K. Ils ont été caractérisés avec différentes techniques d'analyse comme la microscopie électronique et la spectrométrie de masse.

Ces analyses ont révélé la formation de nanograins de carbone amorphe et de molécules comprenant jusqu'à 19 atomes de carbone et incluant des espèces aliphatiques mais pas ou très peu d'espèces aromatiques, comme le suggèrent les modèles précédemment établis. Les grains de carbone amorphe apparaissent donc comme de bons candidats pour ces poussières d'étoiles. Par contre la chimie en phase gazeuse mise en jeu n'aboutit pas à la formation de PAH pour lesquels d'autres scénarios doivent donc être explorés. Une possibilité pourrait être l'évolution de matière aliphatique présente à la surface de ces poussières sous l'effet du rayonnement ultraviolet qui est émis lorsque l'étoile va se contracter et former une nébuleuse planétaire.

*Analyse des analogues de poussières d'étoiles carbonées produits par la machine Stardust : (a) image par microscopie à force atomique des nanograins de carbone amorphe ; (b) image plus détaillée par microscopie électronique en transmission à balayage à basse température (4K) : leur surface est couverte de petites molécules contenant 2-3 atomes de carbone ; (c) composition moléculaire des plus grandes espèces déterminée par le dispositif AROMA (désorption-ionisation laser et spectrométrie de masse). (INSU/CNRS)*

## **Rayons gamma énergétiques**

Deux explosions lointaines découvertes avec les télescopes spatiaux Fermi et Swift Observatory ont produit les photons les plus durs jamais enregistrés dans un sursaut gamma (GRB, gamma-ray burst). Les détections record ont été effectuées depuis le sol et donnent de nouvelles idées sur les mécanismes qui les engendrent.

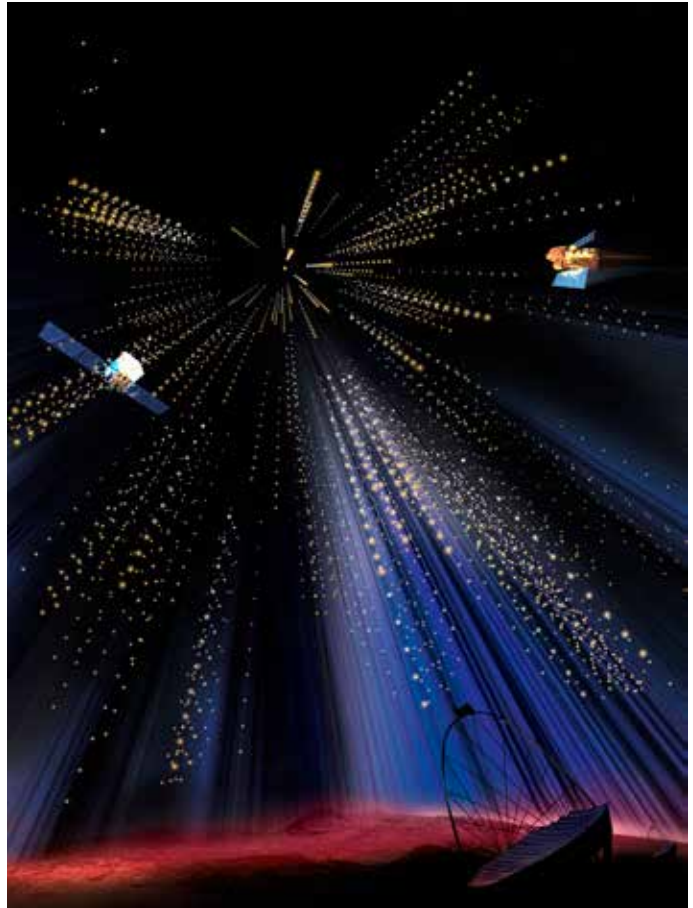
Le phénomène GRB a été découvert il y a 46 ans. Ces explosions se produisent n'importe où dans le ciel et l'on en observe une par jour en moyenne.

Le type le plus courant de GRB a lieu lorsqu'une étoile beaucoup plus massive que le Soleil épuise son combustible. Son cœur s'effondre en un trou noir tandis que des jets de particules sont éjectés

à des vitesses relativistes. Les jets percent la surface de l'étoile et continuent dans l'espace en produisant un sursaut de rayons gamma durant à peu près une minute.

Sur leur lancée, les jets interagissent avec le milieu environnant et émettent des rayonnements dans tout le spectre électromagnétique, du domaine radio aux rayons gamma. Cette luminosité résiduelle (afterglow) peut être observée pendant des mois et même parfois des années après l'explosion dans les plus longues ondes.

*Le 14 janvier 2019, l'observatoire MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov) aux îles Canaries capturerait les photons les plus durs jamais enregistrés dans un sursaut gamma. MAGIC a commencé les observations du sursaut déjà faiblissant 50 secondes après sa détection grâce aux positions fournies par les satellites Fermi et Swift (à gauche et à droite, respectivement sur cette illustration). Ces rayons gamma étaient dix fois plus énergétiques que tous ceux observés auparavant. (NASA/Fermi and Aurore Simonnet, Sonoma State University)*



**Vue d'artiste d'un sursaut gamma GRB. (ESA/Hubble, M. Kornmesser)**

C'est dans les basses énergies que l'on a jusqu'ici appris le plus de choses sur les GRBs. Les nouvelles observations à très haute énergie éclairent le phénomène d'un jour nouveau.

Les astronomes travaillant avec le télescope spatial Hubble ont étudié le sursaut gamma GRB 190114C.

En janvier 2019, un sursaut extrêmement brillant, et de longue durée, avait été détecté par une série de télescopes spatiaux, dont Swift et Fermi, ainsi que par le groupe de télescopes terrestres MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov). Désigné comme GRB 190114C, ce sursaut a donné l'occasion d'observer des photons d'une énergie inédite, 1 téra-électron-volt (TeV), soit mille milliards de fois celle d'un photon visible. Les scientifiques tentaient d'observer de telles énergies depuis longtemps, il s'agissait

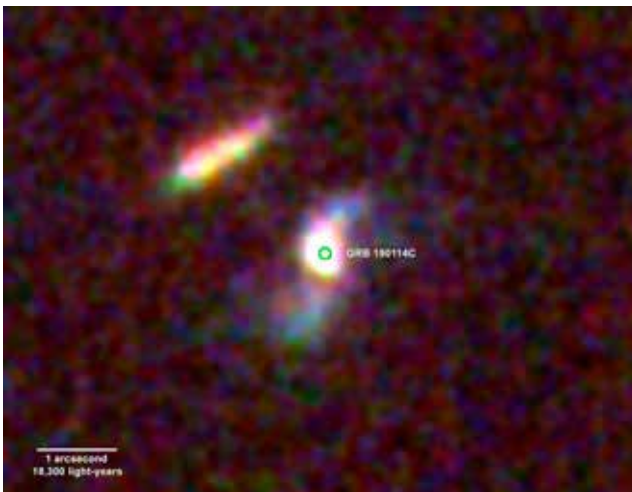


donc d'une étape importante dans l'astrophysique des hautes énergies.

Des observations antérieures avaient révélé que pour atteindre ces énergies, la matière doit être expulsée d'une étoile qui s'effondre à une vitesse égale à 99,999% de celle de la lumière. Elle traverse le gaz entourant l'étoile en provoquant un choc qui émet alors le sursaut de rayons gamma.

Plusieurs observatoires sur Terre et dans l'espace ont entrepris d'étudier GRB 190114C. Les observations de Hubble suggèrent que ce GRB particulier a eu lieu dans un environnement très dense, en plein cœur d'une galaxie brillante située à pas moins de 5 milliards d'années-lumière. C'est très inhabituel et cela suggère une relation de cause à effet en ce qui concerne la brillance de l'événement.

Une autre étude combinant le télescope Hubble, le VLT de l'ESO et ALMA, a visé l'hôte du GRB, un



**Le GRB 190114C vu par le télescope spatial Hubble. (NASA, ESA, A. de Ugarte Postigo, A. J. Levant)**

système de deux galaxies en interaction très rapprochée. Le GRB a eu lieu dans le noyau d'une galaxie massive et donc, effectivement, dans un environnement plus dense que celui rencontré habituellement pour les GRB, des circonstances qui ont pu être cruciales pour générer les photons de très haute énergie.

En 2018 les télescopes spatiaux Fermi and Swift découvrirent un autre sursaut, GRB 180720B, et donnèrent l'alerte à la communauté astronomique. Dix heures plus tard un autre télescope gamma terrestre, HESS (High Energy Stereoscopic System), pointait sa parabole de 28 mètres vers l'objet.

L'analyse des données montra des photons d'énergie allant jusqu'à 440 giga-électron-volt (GeV). La luminosité s'affaiblit progressivement en deux heures, une durée remarquable et inédite.

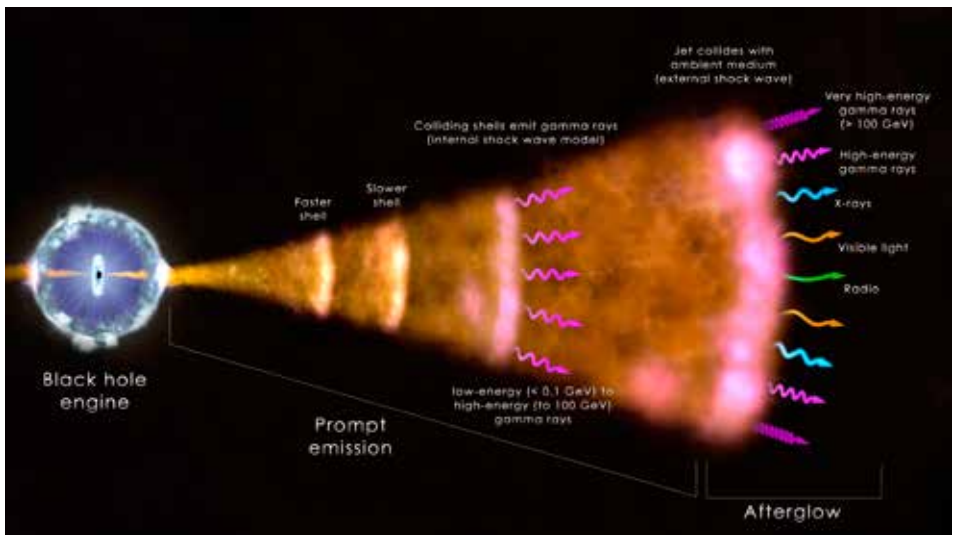
On pense que la majorité de l'afterglow des GRB naît au sein des champs magnétiques à l'avant des jets de matière. Des électrons tournoyant en spirale autour des lignes de champ émettent des rayons gamma par l'effet dit synchrotron. Le rayonnement de très haute énergie semble être une autre composante provenant d'un mécanisme différent. Le candidat le plus probable serait la diffusion Compton

inverse. Des électrons de très haute énergie heurtent des photons gamma en leur communiquant une partie de leur énergie.

Les domaines d'énergie explorés par Fermi et Swift ne permettent pas de distinguer une composante autre que synchrotron. De nouvelles observations avec ces grands télescopes terrestres et leurs successeurs seront donc nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

*Illustration d'un sursaut gamma. Le cœur d'une étoile massive s'effondre et forme un trou noir. Un jet de particules est émis qui traverse l'étoile pendant son écroulement et s'échappe dans l'espace à une vitesse proche de celle de la lumière. Une émission de photons, pendant environ une minute, aurait lieu lors de l'interaction du jet avec le gaz près du trou noir ainsi que lors des collisions entre les enveloppes successives de gaz en expansion. L'émission de photons d'afterglow a lieu à l'avant du jet lorsqu'il balaie le milieu environnant en créant une onde de choc. Cet afterglow peut se prolonger pendant des mois ou des années dans le spectre radio et visible, et de nombreuses heures aux plus hautes énergies gamma.*

*(NASA's Goddard Space Flight Center)*



## ***Une planète pour une naine blanche***

*Basé sur un communiqué ESO*

Après les planètes tournant autour de pulsars<sup>1</sup>, puis les planètes tournant autour d'étoiles normales<sup>2</sup> et celles accompagnant des étoiles manquées, des naines brunes, les astronomes ont détecté la présence d'une planète géante à proximité d'une étoile morte, une naine blanche. L'orbite de la planète est si serrée que son atmosphère s'échappe progressivement. Ce système évoque le lointain destin funeste du Système solaire.

Cette découverte fut complètement fortuite. L'équipe a scruté l'environnement de

---

1 En 1992 les deux premières planètes situées en dehors du Système solaire avaient été découvertes autour du pulsar milliseconde PSR B1257+12 par Dale Frail et Aleksander Wolszczan.

2 En 1995, Michel Mayor et son équipe découvrent la première planète autour d'une étoile normale, 51 Pegasi.

7 000 naines blanches observées dans le cadre du Sloan Digital Sky Survey, et isolé l'une d'elles, en apparence différente des autres. L'analyse des faibles variations de lumière a permis à l'équipe de mettre en évidence les traces d'éléments chimiques en quantités inhabituelles pour une naine blanche vestige d'un système planétaire.

Afin de mieux cerner les propriétés de cette étoile atypique baptisée WDJ0914+1914,

***Sur cette vue d'artiste figurent la naine blanche WDJ0914+1914 et sa planète de type Neptune. Parce que cette géante glacée orbite à proximité directe de la naine blanche chaude, l'intense rayonnement ultraviolet en provenance de l'étoile expulse l'atmosphère planétaire. La majorité du gaz éjecté s'échappe, le reste se concentre en un disque tourbillonnant autour de la naine blanche. (ESO/M. Kornmesser)***



les astronomes l'ont analysée au moyen de l'instrument X-shooter installé sur le Very Large Telescope de l'ESO dans le désert chilien de l'Atacama. Ces observations de suivi ont confirmé la présence d'hydrogène, d'oxygène et de soufre dans l'environnement de la naine blanche. L'étude détaillée du spectre acquis par X-shooter a permis de localiser ces éléments, non pas dans l'atmosphère stellaire, mais au sein d'un disque de gaz tourbillonnant autour de la naine blanche.

Quelques semaines de réflexion furent nécessaires pour aboutir à la seule conclusion plausible : la création de ce disque doit résulter de l'évaporation d'une planète géante. Les quantités d'hydrogène, d'oxygène et de soufre détectées sont semblables à celles caractérisant les couches atmosphériques profondes des planètes glacées et géantes comme Neptune et Uranus. Dans l'éventualité où une telle planète orbiterait à proximité directe d'une naine blanche chaude, l'intense rayonnement ultraviolet en provenance de l'étoile expulserait ses enveloppes externes, et une partie du gaz éjecté se concentrerait en un disque entourant la naine blanche. WDJ0914+1914 s'évaporerait au long de son orbite autour de la naine blanche.

En combinant les données d'observations aux modèles théoriques, les astronomes furent en mesure de dresser le portrait le plus fidèle possible de ce système unique. La naine blanche est caractérisée par de faibles dimensions et une température de surface élevée, de l'ordre de 28 000 K, ce qui représente cinq fois la température du Soleil. Par opposition, la planète apparaît glacée et géante – au moins deux fois plus étendue que l'étoile. Parce qu'elle est en orbite autour de la naine blanche chaude à faible distance, effectuant une révolution complète en 10 jours seulement, le rayonnement puissant de l'étoile expulse progressivement l'atmosphère planétaire. La majorité du gaz s'échappe, le reste se retrouve piégé au sein d'un disque retombant vers l'étoile à raison de 3000 tonnes par seconde. C'est précisément la présence de ce disque qui révèle cette planète de type Neptune.

Cette découverte permet d'affiner notre connaissance de la destinée finale des systèmes planétaires. Les étoiles semblables au Soleil consomment l'hydrogène composant leur noyau durant la majeure partie de leur existence. Lorsque ce carburant vient à manquer, elles se transforment en géantes rouges : leur volume augmentant considérablement, elles engloutissent les planètes les plus proches. Dans le cas du Système solaire, Mercure, Vénus et la Terre se feront absorber par le Soleil devenu géante rouge d'ici 5 milliards d'années. Puis les étoiles de type solaire perdent leurs enveloppes externes. Subsiste alors leur seul noyau consommé, une naine blanche. Ces vestiges stellaires peuvent être environnés de planètes. Nombre de ces systèmes stellaires sont supposés exister dans notre galaxie. Toutefois, les scientifiques n'avaient pas encore découvert les preuves de la survie d'une planète géante en périphérie d'une naine blanche. La détection d'une exoplanète en orbite autour de WDJ0914+1914, à quelque 1500 années-lumière dans la constellation du Cancer, pourrait bien constituer la première d'une longue série de découvertes de ce type de système.

Aux dires des chercheurs, la planète découverte au moyen de l'instrument X-shooter orbite autour de la naine blanche à seulement 10 millions de kilomètres, ce qui représente quinze rayons solaires, et correspond aux enveloppes internes profondes de la géante rouge. L'actuelle position occupée par cette planète suggère que cette dernière migra en direction de l'étoile après que celle-ci se fut transformée en naine blanche. Cette nouvelle orbite pourrait résulter d'interactions gravitationnelles avec d'autres planètes du même système, ce qui laisse entrevoir la possibilité que d'autres planètes aient survécu aux phases évolutives de leur étoile hôte.

Récemment encore, une minorité d'astronomes se préoccupaient du sort des planètes situées autour d'étoiles en fin de vie. Cette découverte d'une planète orbitant à grande proximité d'un noyau stellaire éteint renforce l'idée que l'Univers défie constamment les conceptions établies.

## Bennu

*Basé sur un communiqué JPL*

Dès son arrivée près de Bennu, la sonde OSIRIS-REx de la NASA offrait une découverte inattendue : l'astéroïde était actif et éjectait des particules dans l'espace. Un premier événement d'éjection a été observé sur des images prises par les caméras de navigation le 6 janvier, une semaine après que l'engin spatial fut entré dans sa première orbite autour de Bennu. À première vue, les particules semblaient être des étoiles d'arrière-plan. Un examen attentif a révélé que l'astéroïde éjectait bien de la matière autour de lui. Après avoir conclu que ces particules ne compromettaient pas la sécurité de l'engin spatial, les chercheurs ont entrepris des observations spécifiques afin de documenter pleinement cette curieuse activité.

Trois éruptions majeures de particules ont eu lieu les 6 et 19 janvier et le 11 février. Elles provenaient de différents endroits de la surface de Bennu. Le premier événement a pris naissance dans l'hémisphère sud, et les deuxième et troisième se sont produits près de l'équateur. Les trois ont eu lieu en fin d'après-midi pour Bennu.

L'équipe a découvert qu'après leur éjection de la surface de l'astéroïde, les particules, soit ont brièvement orbité autour de Bennu et sont retombées à sa surface, soit se sont échappées dans l'espace. Les particules observées avaient des vitesses pouvant atteindre 3 mètres par seconde, et mesuraient entre 2 et 10 centimètres. Environ 200 de ces particules ont été observées lors de l'événement le plus important, celui du 6 janvier.

Les chercheurs ont envisagé toute une variété de mécanismes possibles qui auraient pu causer les éjections et ont retenu trois candidats : les impacts de météoroïdes, la fracturation par contrainte thermique et la libération de vapeur d'eau.

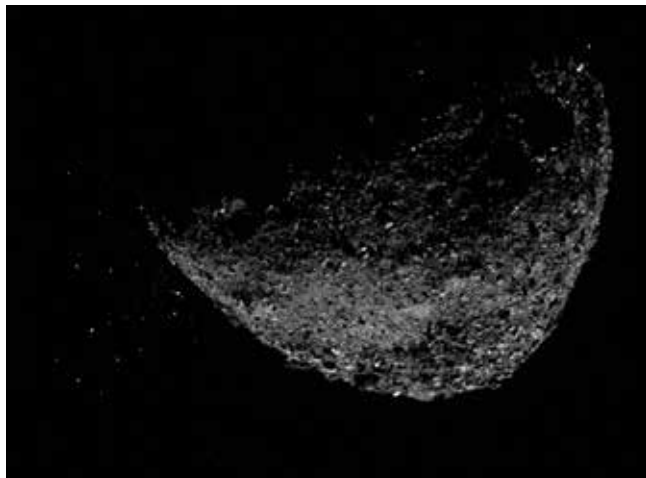
Les impacts de météoroïdes sont fréquents au niveau de Bennu,

et il est possible que ces petits fragments de roches spatiales frappent l'astéroïde hors du champ de vision d'OSIRIS-REx.

La rupture thermique est une autre explication raisonnable. Les températures de surface de Bennu varient considérablement au cours de sa période de rotation de 4,3 heures. Bien qu'il fasse extrêmement froid la nuit, la surface de l'astéroïde se réchauffe considérablement au milieu de l'après-midi, c'est-à-dire au moment des trois événements majeurs. En raison de ce changement de température, les roches peuvent commencer à se fissurer et à se décomposer, et éventuellement des particules peuvent être éjectées de la surface. Ce cycle est connu sous le nom de fracturation sous contrainte thermique.

La libération d'eau peut également expliquer l'activité de l'astéroïde. Lorsque les

***Cette vue de l'astéroïde Bennu éjectant des particules de sa surface le 6 janvier 2019 a été créée en combinant deux images prises par l'imageur NavCam 1 à bord de la sonde OSIRIS-REx de la NASA : une courte image d'exposition, qui montre clairement l'astéroïde, et une image à longue exposition (cinq secondes) qui montre les particules. (NASA/Goddard/University of Arizona/Lockheed Martin)***



argiles de Benu sont chauffées, l'eau se libère et la pression augmente dans les fissures et les pores des roches jusqu'à déranger la surface du satellite et provoquer l'éjection de particules.

Mais la nature ne permet pas toujours des explications simples. Il se peut que plus d'un de ces mécanismes soient en jeu. Par exemple, la fracturation thermique pourrait morceler le matériau de surface, facilitant ainsi les éjections de cailloux lors d'impacts météoritiques.

Si la fracture thermique, les impacts ou les deux sont effectivement les causes de ces éjections, alors le même phénomène peut se produire sur tous les petits astéroïdes, car ils sont soumis aux mêmes mécanismes. Si par contre la libération d'eau est la cause de ces phénomènes d'éjection, alors ce phénomène serait spécifique aux astéroïdes qui contiennent des minéraux hydratés, comme Benu.

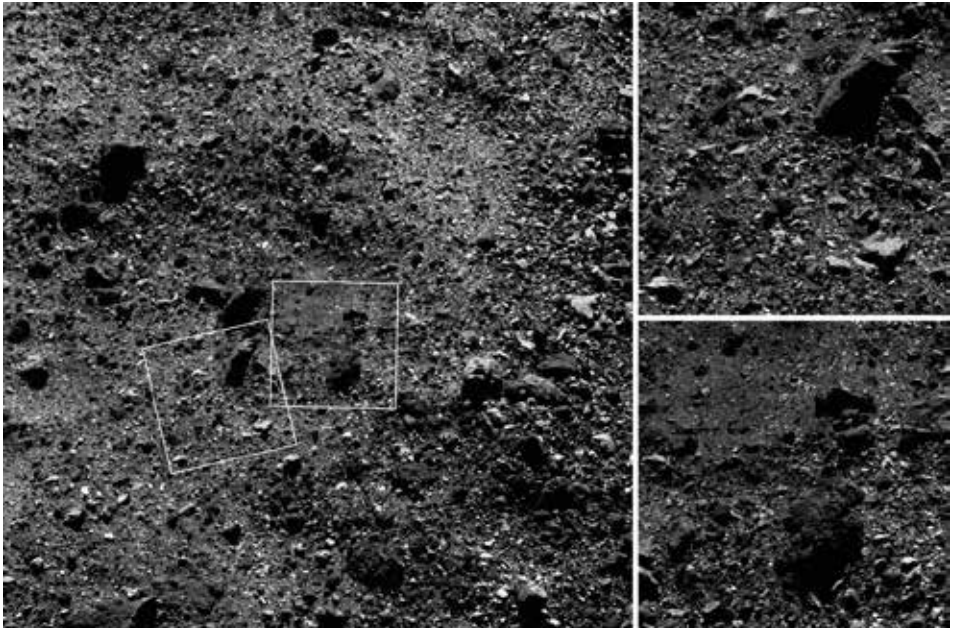
L'activité de Benu devrait être mieux comprise lorsque l'échantillon prélevé in situ<sup>1</sup> sera renvoyé sur Terre pour étude. Bon nombre

des particules éjectées sont suffisamment petites pour être recueillies par le mécanisme d'échantillonnage de l'engin spatial, ce qui signifie que l'échantillon renvoyé peut contenir du matériel qui a été éjecté puis est retombé sur la surface de Benu. Déterminer que l'une ou l'autre particule de l'échantillon a été éjectée avant de retomber sur Benu pourrait être un exploit scientifique similaire à celui de trouver une aiguille dans une botte de foin.

De toute façon le matériel ramené de Benu sur Terre nous permettra presque certainement de mieux comprendre les astéroïdes et la façon dont ils sont à la fois différents et similaires.

*La surface rocailleuse de Benu, observée par Osiris-Rex le 25 février 2019 d'une distance de 1,8 kilomètre. L'image de gauche a été prise par la caméra MapCam. Les deux vues rapprochées à droite ont été capturées par la caméra PolyCam et montrent en haut un rocher d'une dimension de 15 mètres et en bas une zone plus lisse recouverte de régolithe.*  
(NASA/Goddard/University of Arizona)

<sup>1</sup> Le prélèvement des échantillons est prévu pour l'été 2020, et l'échantillon sera livré sur Terre en septembre 2023.



## **Glace martienne**

La présence de glace d'eau près de la surface est un facteur essentiel pour les projets d'exploration humaine de la planète Mars. Avec peu d'espace à bord d'un vaisseau spatial, toute mission habitée devra récolter ce qui est déjà disponible pour l'eau potable et la fabrication de carburant.

La NASA appelle ce concept « utilisation des ressources in situ » et c'est un facteur important dans le choix des sites d'atterrissage martiens. Les satellites en orbite autour de Mars, en particulier le MRO (Mars Reconnaissance Orbiter) et le Mars Odyssey Orbiter, sont essentiels pour déterminer les meilleurs endroits pour construire la première station de recherche martienne.

Pas besoin de gros moyens pour extraire cette glace, une simple pelle suffira.

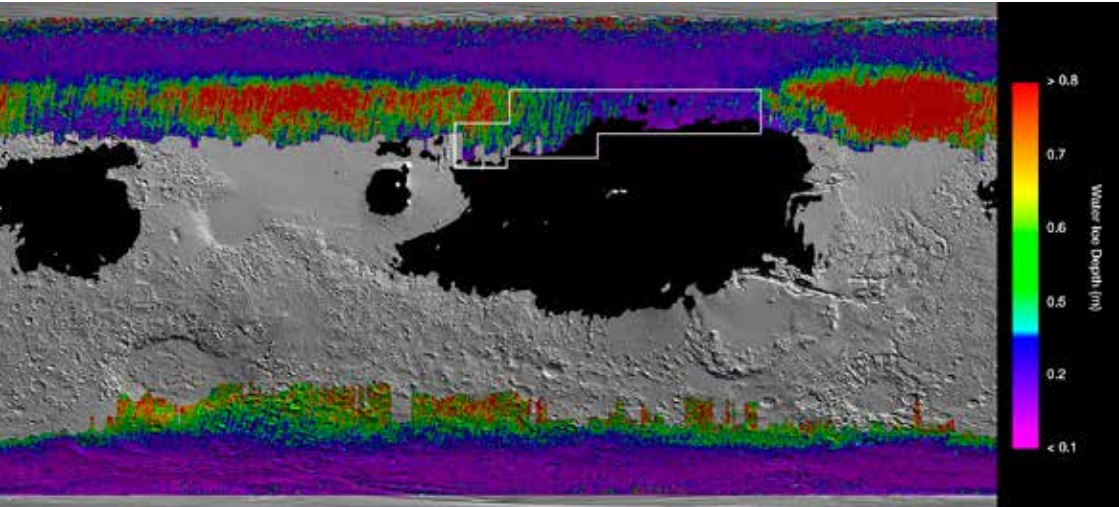
L'eau liquide ne subsiste pas sous la faible pression atmosphérique martienne. La glace se sublime rapidement lorsqu'elle est

exposée à l'atmosphère, sans passer par le stade liquide.

La glace d'eau martienne est enfermée sous terre dans les latitudes moyennes de la planète. Ces régions près des pôles ont été étudiées par l'atterrisseur Phœnix de la NASA, qui a gratté la glace, et par MRO, qui a pris de nombreuses images depuis l'espace d'impacts de météorites. La glace facilement exploitable a été trouvée grâce à son émission thermique avec le MRO et la caméra THEMIS (Thermal Emission Imaging System) de Mars Odyssey. Pourquoi utiliser des instruments sensibles à la chaleur lors de la recherche de glace ? La glace d'eau enfouie modifie la température de la surface martienne. On peut ainsi croiser

***La zone encadrée de Mars contient de la glace d'eau près de la surface qui serait facilement extraite par des astronautes. (NASA/JPL-Caltech)***





les températures suggérant la présence de glace avec d'autres données, comme les réservoirs de glace détectés par radar ou observés après l'impact de météores. Les données du spectromètre gamma de Mars Odyssey, qui est fait sur mesure pour cartographier les dépôts de glace d'eau, ont également été utiles.

Comme on pouvait s'y attendre, toutes ces données suggèrent la présence d'une grande quantité de glace d'eau aux pôles et aux latitudes moyennes. Mais la carte révèle des gisements particulièrement peu profonds que les futurs planificateurs de mission voudront peut-être étudier plus en détail.

Bien qu'il y ait beaucoup d'endroits sur Mars que les scientifiques aimeraient visiter, peu d'entre eux feraient des sites d'atterrissage pratiques pour les astronautes. La plupart des scientifiques se sont concentrés sur les latitudes moyennes du nord et du sud, qui sont plus ensoleillées et plus chaudes que les pôles. Mais il y a une forte préférence pour l'atterrissage dans l'hémisphère nord, qui est plus bas en altitude et bénéficie donc d'une plus forte pression atmosphérique, ce qui facilite l'atterrissage d'un engin spatial.

Arcadia Planitia est la cible la plus tentante de l'hémisphère nord. La carte montre beaucoup de bleu et de violet dans cette région, représentant la glace d'eau la plus proche de la surface.

***Carte de la glace d'eau souterraine sur Mars. Les couleurs froides représentent une profondeur de moins de 30 centimètres sous la surface. Les couleurs chaudes correspondent à plus de 60 centimètres de profondeur. Les zones noires sur la carte représentent les zones où un engin spatial s'enfoncerait dans la poussière fine en atterrissant. La zone encadrée est la région idéale pour que des astronautes puissent facilement profiter de la glace d'eau souterraine. Cette carte a été établie en combinant les données de plusieurs satellites, dont MRO (Mars Reconnaissance Orbiter), Mars Odyssey et MGS (Mars Global Surveyor). (NASA/JPL-Caltech)***

## Halos de carbone

D'immenses nuages de carbone ont été découverts qui s'étendent sur plus de 30 000 années-lumière autour de jeunes galaxies. C'est la confirmation que le carbone produit par les étoiles au début de l'Univers s'est répandu au-delà des galaxies. Les théories actuelles ne prédisent pas de tels cocons de carbone autour des galaxies en croissance, ce qui soulève des questions sur notre compréhension actuelle de l'évolution cosmique.

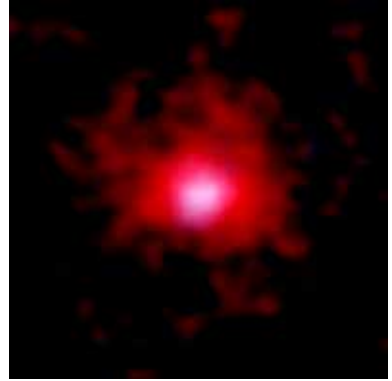
La combinaison des données d'archive du réseau ALMA relatives au carbone des galaxies du début de l'Univers, a permis d'atteindre une sensibilité sans précédent. Obtenir un ensemble de données de même qualité avec une seule observation prendrait 20 fois plus de temps que les observations typiques d'ALMA, ce qui est inimaginable.

Les éléments lourds comme le carbone et l'oxygène n'existaient pas au moment du Big Bang. Ils ont été formés plus tard par la fusion nucléaire dans les étoiles. Cependant, on ne sait pas encore comment ces éléments se sont propagés dans l'Univers. Les astronomes ont trouvé des éléments lourds à l'intérieur de bébés galaxies, mais pas au-delà de ces galaxies, en raison de la sensibilité limitée de leurs télescopes. Il apparaît maintenant que les nuages de carbone gazeux s'étendent sur des régions cinq fois plus grandes que les populations stellaires des galaxies.

Les éléments lourds sont expulsés par les supernovæ. Les jets énergétiques et le rayonnement des trous noirs supermassifs des galaxies pourraient aussi aider à les diffuser hors des galaxies. Les modèles théoriques sont cependant encore incapables d'expliquer d'aussi grands nuages de carbone autour des galaxies jeunes, ce qui implique probablement que de nouveaux processus doivent être intégrés aux simulations cosmologiques.

Le carbone n'est pas le seul élément à être dispersé autour des galaxies. D'autres atomes lourds comme l'oxygène et l'azote devraient également être présents mais leur détection est plus difficile.

Les astronomes utilisent maintenant ALMA et d'autres télescopes à travers le monde pour explorer plus à fond les halos galactiques et en mesurer les implications.



*Image composite d'une galaxie jeune entourée d'un cocon de carbone. La couleur rouge montre la distribution du gaz carbonique obtenue en combinant les données ALMA de 18 galaxies. La distribution stellaire photographiée par le HST est représentée en bleu. (ALMA/ESO/NAOJ/NRAO, NASA/ESA/HST, Fujimoto et al.)*

*Impression d'artiste d'une galaxie jeune entourée d'un immense halo de carbone. (NAOJ)*



## **Halos autour de quasars**

*Basé sur un communiqué ESO*

Grâce au Very Large Telescope de l'ESO, les astronomes ont observé des réservoirs de gaz froid entourant des galaxies parmi les plus anciennes de l'Univers. Ces halos constituent le repas de prédilection des trous noirs supermassifs situés au centre de ces galaxies, qui nous apparaissent aujourd'hui telles qu'elles étaient il y a 12,5 milliards d'années. Une telle abondance de nourriture pourrait expliquer la croissance si rapide de ces monstres cosmiques durant la période de l'Univers baptisée « Aube Cosmique ».

Ce résultat apporte une pièce essentielle au puzzle de la formation des structures cosmiques datée de plus 12 milliards d'années que les astronomes tentent de reconstituer.

Les astronomes se sont interrogés sur la croissance si rapide des trous noirs supermassifs au tout début de l'Univers. Les premiers trous noirs, dont la formation résulte probablement de l'effondrement gravitationnel des premières étoiles, ont connu un épisode

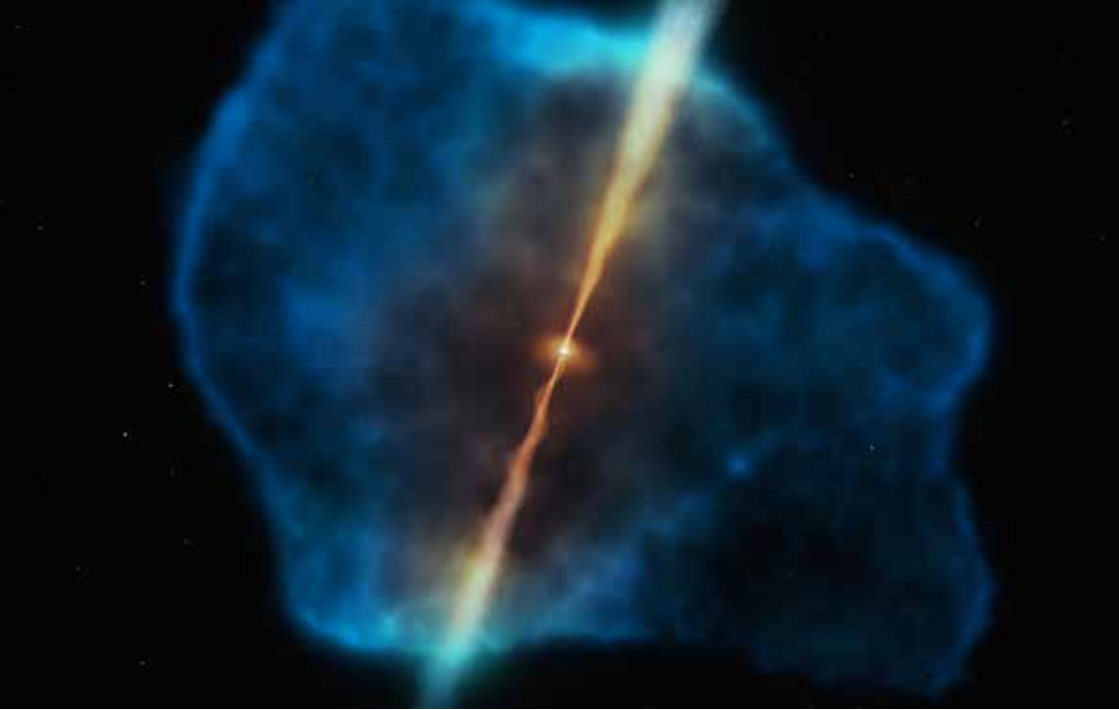
de croissance particulièrement rapide. Jusqu'à présent toutefois, les astronomes n'étaient pas parvenu à localiser la source principale de nourriture des trous noirs – le gaz et la poussière – qui pouvait expliquer leur croissance rapide.

Des observations antérieures effectuées au moyen d'ALMA, le Vaste Réseau (Sub-) Millimétrique de l'Atacama, avaient mis au jour l'existence, dans ces premières galaxies, de vastes réservoirs de poussière et de gaz ayant favorisé la formation rapide des étoiles. Ces observations d'ALMA laissaient entrevoir le peu de matière encore disponible pour assurer la croissance d'un trou noir.

Afin de résoudre ce mystère, les astronomes ont utilisé l'instrument MUSE du VLT pour observer des quasars – des objets extrêmement brillants alimentés par des trous noirs supermassifs situés au cœur de galaxies massives. L'étude a porté sur 31 quasars qui nous apparaissent tels qu'ils étaient il y a plus de 12,5 milliards d'années, époque à laquelle l'Univers était encore un nourrisson, âgé de quelque 870 millions d'années seulement.

*Composite d'images obtenues montrant un halo de gaz (en bleu, observé par MUSE) enrobant une galaxie (données ALMA, en orange) dont le centre est occupé par un quasar. Le halo alimente le trou noir supermassif situé au centre du quasar. Ces objets se situent à un redshift de 6,2, ce qui signifie que nous les observons tels qu'ils étaient il y a 12,5 milliards d'années. Les quasars sont brillants, au contraire des halos beaucoup plus difficiles à observer. (ESO/Farina et al. ; ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Decarli et al.)*





Il s'agit de l'un des échantillons les plus étendus de quasars datant des tout débuts de l'Univers à faire l'objet d'une telle étude.

Les astronomes ont découvert la présence, autour de 12 de ces quasars, d'énormes réservoirs de gaz : des halos d'hydrogène dense et froid s'étendant à 100 000 années-lumière des trous noirs centraux et de masses équivalant à plusieurs milliards de masses solaires. L'équipe a également mis en évidence l'existence d'un lien étroit entre ces halos de gaz et les galaxies. Ces gigantesques réservoirs de gaz sont à même de soutenir la croissance des trous noirs supermassifs ainsi que l'intense formation stellaire.

Ce travail de recherche a été permis par l'extrême sensibilité de MUSE, l'Explorateur Spectroscopique Multi-Unités installé sur le VLT de l'ESO.

*Vue d'artiste d'un halo de gaz entourant un quasar au tout début de l'Univers. Le quasar, en orange, émet deux puissants jets et abrite un trou noir supermassif en son centre, entouré d'un disque de gaz poussiéreux. Le halo d'hydrogène est représenté en bleu.  
(ESO/M. Kornmesser)*

À l'avenir, l'Extremely Large Telescope (ELT) de l'ESO révélera aux scientifiques d'autres détails concernant les galaxies et les trous noirs supermassifs peuplant l'Univers deux milliards d'années seulement après le Big Bang. La puissance délivrée par l'ELT nous permettra de sonder plus en profondeur l'Univers jeune à la recherche d'un plus grand nombre de nébuleuses de gaz de ce type.



## ***Centre galactique***

*Basé sur un communiqué ESO*

Le Very Large Telescope (VLT) de l'ESO a observé les régions centrales de la Voie lactée avec une résolution spectaculaire et mis au jour de nouveaux éléments relatifs à la naissance des étoiles au sein de notre galaxie. Ces nouvelles observations ont permis aux astronomes de mettre en évidence un événement dramatique du passé de la Voie lactée : un sursaut de formation d'étoiles dont l'intensité s'est traduite par l'explosion de plusieurs centaines de milliers d'étoiles en supernovæ.

Ce sondage inédit d'une vaste portion du centre galactique donne un aperçu détaillé du processus de formation d'étoiles dans cette région de la Voie lactée et, contrairement à l'hypothèse formulée jusqu'à présent, permet de constater la discontinuité temporelle de la formation d'étoiles.

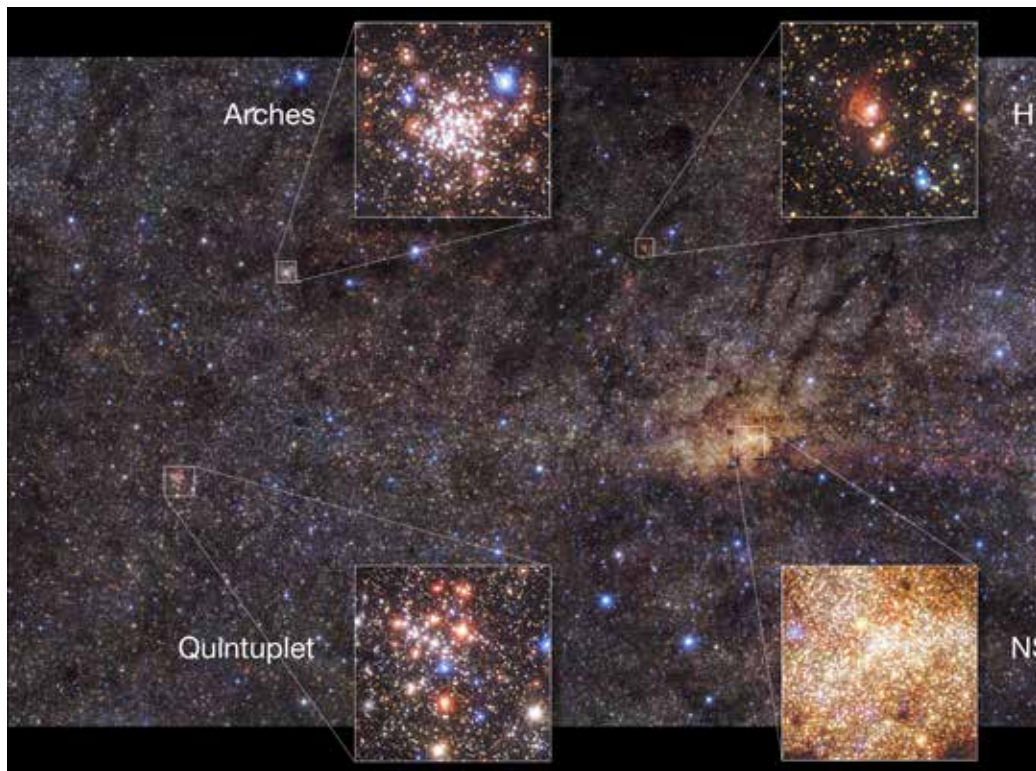
80% des étoiles peuplant les régions centrales de la Voie lactée se sont formées durant la première phase de l'existence de notre galaxie, soit entre 13,5 et 8 milliards d'années avant notre époque. Cette première période de formation stellaire a été suivie d'une phase d'une durée de quelque six



milliards d'années durant laquelle très peu d'étoiles sont nées. Cette phase s'acheva, voici un milliard d'années, par un intense sursaut de formation d'étoiles. Ce sursaut dura moins de 100 millions d'années et donna lieu à la formation d'étoiles au sein des régions centrales de la galaxie dont la masse combinée excédait probablement plusieurs dizaines de millions de masses solaires.

Les conditions régnant dans les régions centrales durant ce sursaut d'activité furent certainement semblables à celles caractérisant les galaxies à sursauts d'étoiles, qui donnent naissance aux étoiles à un rythme supérieur à

*Les régions centrales de la Voie lactée vues par HAK-I avec une résolution angulaire de 0,2 seconde d'arc. Cette image résulte de la combinaison d'observations effectuées dans trois domaines de longueur d'onde distincts : J (centré sur 1250 nanomètres, en bleu), K (centré sur 1635 nanomètres, en vert) et Ks (centré sur 2150 nanomètres, en rouge). (ESO/Nogueras-Lara et al.)*





◀ *Quelques objets remarquables du centre galactique : au centre, l'amas d'étoiles nucléaire (NSC) et l'amas des Arches, l'amas le plus riche en étoiles de la Voie lactée; l'amas du Quintuplet, composé de cinq étoiles proéminentes; et une région de gaz d'hydrogène ionisé (HII).*  
(ESO/Nogueras-Lara et al.)

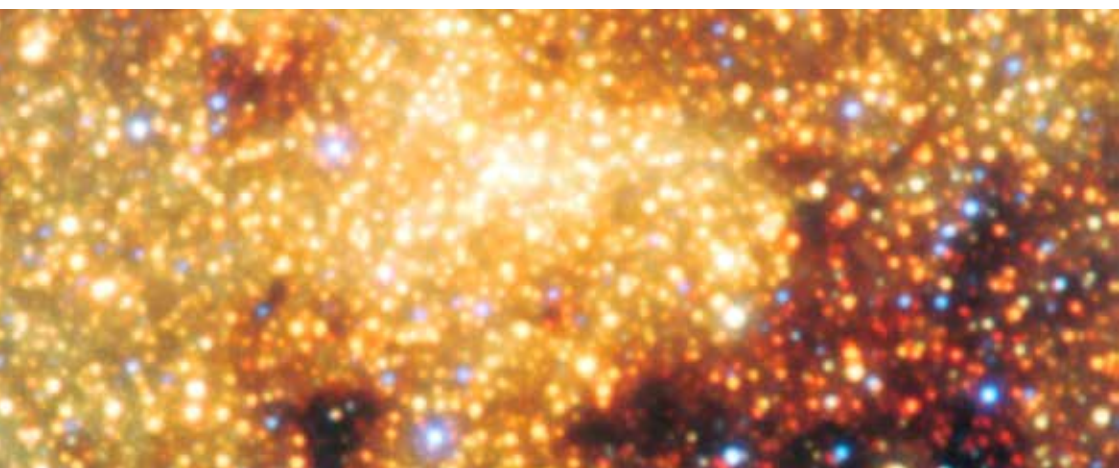
▼ *Image dans le domaine visible de la même région du Sagittaire en direction du centre de notre galaxie. Beaucoup d'étoiles sont cachées derrière des nuages de poussière et ne sont révélées que par des images infrarouges. Cette vue a été créée à partir de photographies prises en lumières rouge et bleue et faisant partie du survey DSS2. Le champ est de 3,5 degrés × 3,6 degrés.*  
(ESO and Digitized Sky Survey 2; Davide De Martin et S. Guisard [www.eso.org/~sguisard](http://www.eso.org/~sguisard))



100 masses solaires par an. Actuellement, le taux de formation d'étoiles dans la Voie lactée n'est que d'une ou deux masses solaires par an.

Ce sursaut d'activité, certainement responsable de l'explosion de centaines de milliers d'étoiles en supernovæ, fut probablement l'un des événements les plus énergétiques de toute l'histoire de la Voie lactée. Au cours d'un tel sursaut, de nombreuses étoiles massives apparaissent. Leur durée de vie étant inférieure à celle des étoiles de faible masse, elles achèvent leur existence plus rapidement, et disparaissent au cours de violentes explosions.

Cette recherche est basée sur l'observation des régions centrales de la galaxie au moyen de l'instrument HAWK-I qui équipe le VLT de l'ESO dans le désert chilien de l'Atacama. Cette caméra sensible à l'infrarouge a permis de percer les nuages de poussières et d'offrir un cliché remarquablement détaillé des régions centrales de la Voie lactée. Cette surprenante image dotée d'une résolution angulaire de 0,2 seconde d'arc montre la région de la Voie lactée la plus riche en étoiles, en gaz et en poussière – une région qui abrite un trou noir supermassif.



*En haut, un agrandissement de la partie centrale de l'image HAWK-I. En bas, la même région photographiée avec le télescope infrarouge de survey de l'ESO, VISTA, dans le cadre du programme VVV (Vista Variables in the Via Lactea). (ESO/Nogueras-Lara et al.)*

Cette image constitue la première publication du sondage baptisé GALACTICNUCLEUS. Ce programme vise à générer une image parfaitement nette des régions centrales de notre galaxie. Le sondage a observé plus de trois millions d'étoiles distribuées sur une surface projetée de plus de 60 000 années-lumière carrées.

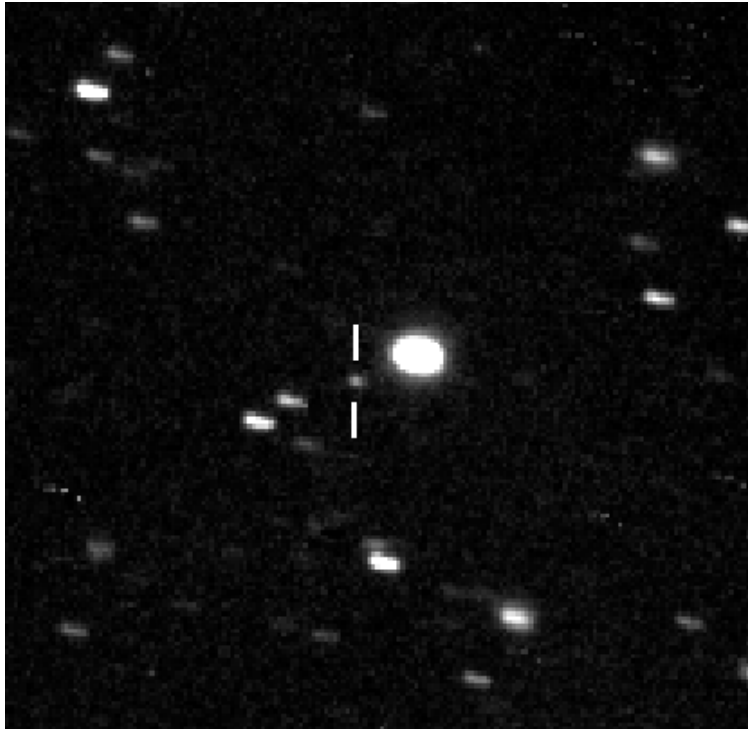
## Astéroïde liégeois

Le Centre des Petites Planètes (MPC, Minor Planet Center) de l'Union Astronomique Internationale a officialisé la première découverte d'un astéroïde avec le télescope liégeois TRAPPIST de La Silla. (541897) 2012 CK = 2016 ED<sub>194</sub> est situé entre Mars et Jupiter, dans la ceinture principale des astéroïdes. Son orbite de 4,2 ans est inclinée sur l'écliptique de 15 degrés. Le demi-grand axe de l'ellipse est de 2,6 unités astronomiques.

L'équipe estime sa taille entre 1,3 et 2 km selon que sa composition soit rocheuse ou carbonée.

Comme l'un des noms l'indique, l'objet a été découvert en 2012. Il a fallu l'observer lors de trois oppositions avant que la découverte soit validée par le MPC. Il restait à lui trouver un nom. Sans grande surprise, c'est Trappist qui a été proposé.

► *L'astéroïde 2016 ED<sub>194</sub>. Image composite de 5 poses de 240 s prises avec le télescope TRAPPIST-S le 1<sup>er</sup> février 2019. (E. Jehin, Trappist Team)*



▼ *Éléments de l'orbite de l'astéroïde 2016 ED<sub>194</sub> tels qu'apparus dans le MPO (Minor Planet Circulars Orbit Supplement)*

(541897)\* 2012 CK = 2016 ED<sub>194</sub>

Discovered\* 2012 Feb. 1 by TRAPPIST at La Silla.

Id. R. Weryk (MPO 484114)

Epoch 2020 May 31.0 TT = JDT 2459000.5

				P	MPC	Q
<i>M</i>	84.56216		(2000.0)			
<i>n</i>	0.23480209	$\omega$	316.85921	+0.48986248		-0.83198391
<i>a</i>	2.6021645	$\Omega$	102.20818	+0.85467625		+0.39938581
<i>e</i>	0.1274914	<i>i</i>	15.45507	+0.17193968		+0.38508927
<i>P</i>	4.20	<i>H</i>	16.9	<i>G</i> 0.15		<i>U</i> 0



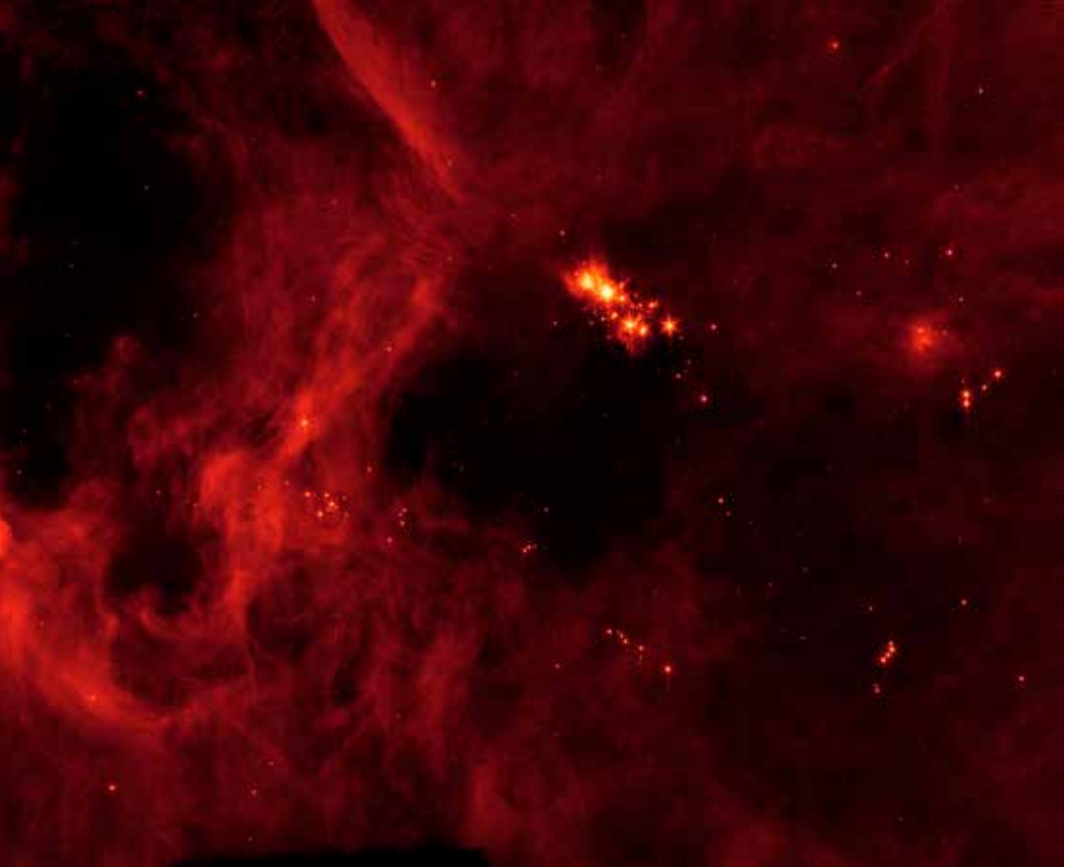
### ***Le nuage de Persée***

Le nuage moléculaire de Persée qui s'étend sur plus de 500 années-lumière abrite une abondance d'étoiles jeunes et attire l'attention des astronomes depuis des décennies. L'instrument MIPS (photomètre imageur multibande) du télescope spatial infrarouge Spitzer a pris l'image ci-dessus au cours de la mission dite « froide » de l'engin, qui s'est déroulée du lancement du vaisseau spatial en 2003 jusqu'en 2009, lorsque le télescope spatial a épuisé sa réserve d'hélium liquide de refroidissement.

Le rayonnement thermique infrarouge des poussières génère une grande partie de la lueur que l'on voit ici. Les amas d'étoiles,

comme celui situé du côté gauche de l'image, IC348, rayonnent encore plus en infrarouge et illuminent les nuages environnants. La majorité de la poussière vue en infrarouge n'émet que peu ou pas dans le domaine visible. En fait la poussière bloque la lumière visible, ce qui permet parfois de la distinguer sous la forme de nuages obscurs.

Du côté droit de l'image, on voit l'amas d'étoiles jeunes, brillantes, connu sous le nom de NGC 1333, que Spitzer a observé à plusieurs reprises. Distant d'un millier d'années-lumière, NGC 1333 est relativement proche de nous et a constitué une des premières cibles de l'astronomie infrarouge. Certaines de ses étoiles ont été observées dès le milieu des



années 1980 par le satellite IRAS (Infrared Astronomical Survey), le premier télescope spatial infrarouge.

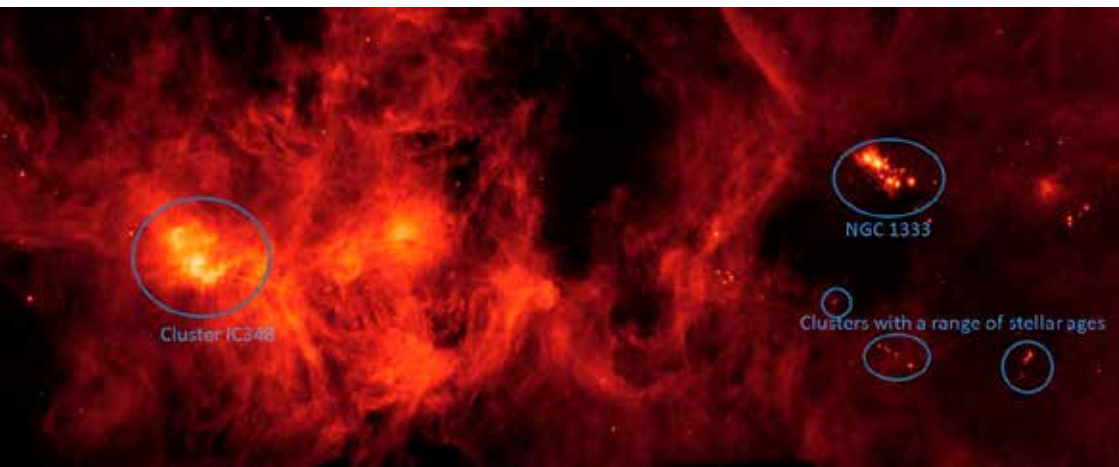
Les nombreuses étoiles jeunes de l'amas expulsent de grandes quantités de matière qui rayonne brillamment en heurtant le milieu interstellaire environnant. L'étude détaillée de ces régions permet aux astronomes d'avoir un aperçu clair de la façon dont les étoiles passent d'une adolescence parfois turbulente à une vie adulte plus calme.

D'autres amas d'étoiles visibles sous NGC 1333 sur cette image ont constitué un mystère fascinant pour les astronomes : ils semblent contenir à la fois de nouvelles étoiles, des adolescentes et des adultes. Un tel

*Le nuage de Persée vu par Spitzer à la longueur d'onde infrarouge de 24 microns. Les petits espaces le long des bords de cette image non observés par Spitzer ont été comblés à l'aide de données à 22 microns provenant du Wide-Field Infrared Survey Explorer (WISE) de la NASA (voir version annotée en page 92).  
(NASA/JPL-Caltech)*

mélange d'âges est étrange. Bien que de nombreux frères et sœurs stellaires puissent naître ensemble dans des amas denses, les étoiles sont toujours en mouvement et, en vieillissant, elles ont tendance à s'écarter de plus en plus.

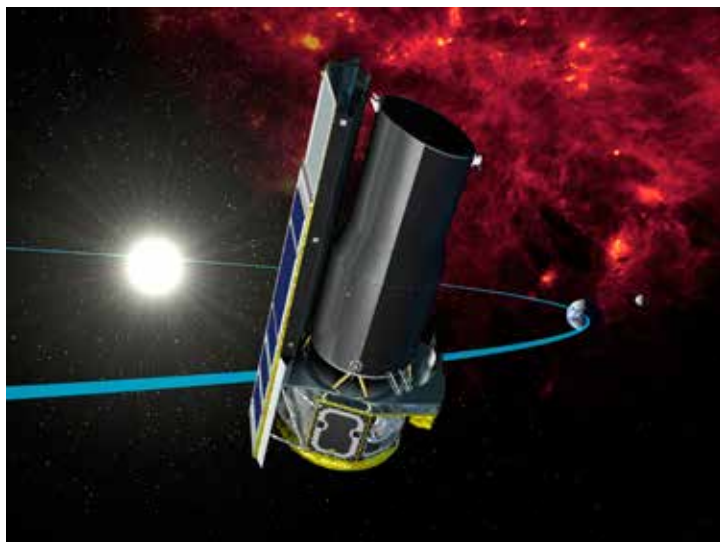
Trouver cette variété d'âges ne correspond pas aux idées actuelles sur l'évolution

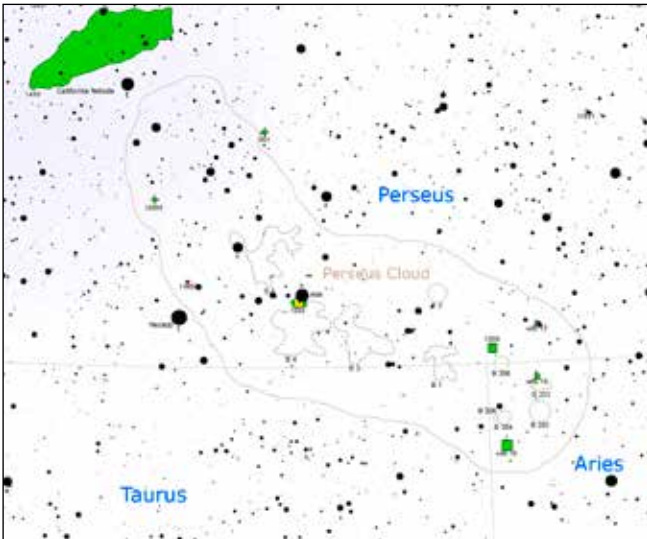


des étoiles. L'énigme que présente cette région est une chose qui incite les astronomes à y revenir encore et toujours. Depuis les premières observations de l'IRAS, la région est bien mieux connue. Les nouveaux instruments apportent plus de sensibilité et de nouvelles techniques, et l'histoire devient plus claire avec chaque nouvelle génération d'observatoires. Le 30 janvier 2020, la NASA mettra hors service le télescope spatial Spitzer, mais son héritage a ouvert la voie à de nouveaux observatoires, notamment le télescope spatial James Webb, qui observera également la lumière infrarouge.

*Image annotée du nuage moléculaire de Persée montrant l'emplacement de divers amas d'étoiles dont NGC 1333 et IC348. (NASA/JPL-Caltech)*

*Le télescope spatial Spitzer, vision d'artiste. (NASA/JPL-Caltech)*





*Situation du nuage moléculaire de Persée dans son environnement de constellations.  
(NASA/JPL-Caltech, CC-BY-SA 3.0, R. Mura)*

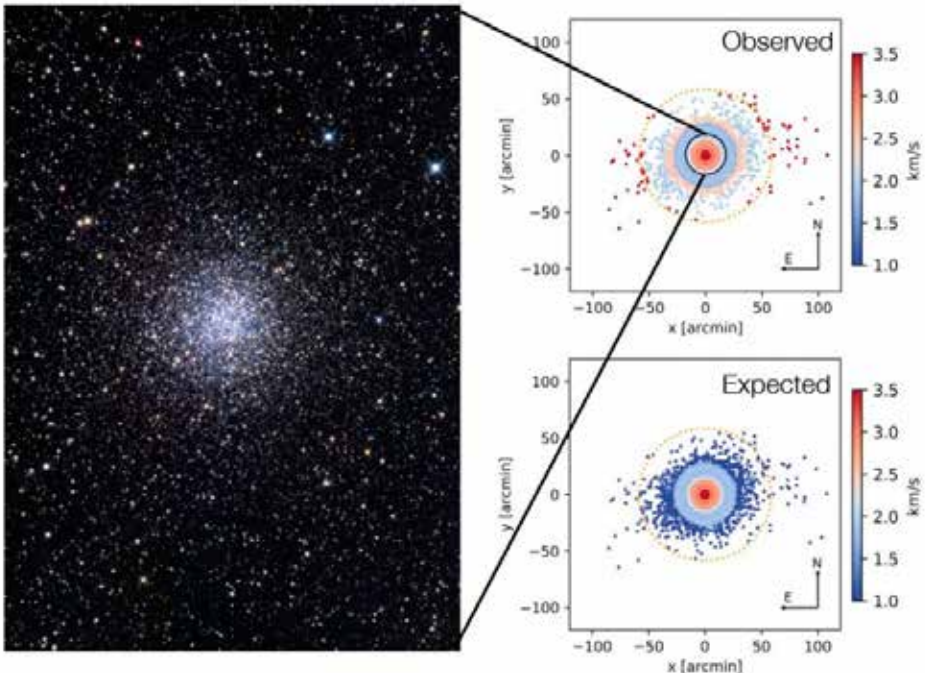
## De la matière noire dans les amas globulaires ?

Basé sur un communiqué CNRS/INSU

Les amas globulaires sont des collections sphéroïdales, denses d'environ un million d'étoiles très anciennes, en orbite autour d'une galaxie hôte. Ils figurent parmi les systèmes stellaires étudiés depuis le plus longtemps (dès le XVII<sup>e</sup> siècle). Cependant, leur formation demeure encore aujourd'hui l'un des phénomènes les plus méconnus de l'astrophysique moderne. Leur apparente simplicité en a fait au départ l'exemple parfait de systèmes de populations d'étoiles âgées et isolées, caractérisées par une dynamique très simple, toute la masse étant fournie uniquement par leurs étoiles. Néanmoins, on soupçonne aussi depuis longtemps que de tels objets auraient pu naître à l'intérieur de petits halos de matière noire assez légers mais aucun effet de cette matière noire n'avait encore été observé directement dans la dynamique des amas globulaires.

En analysant soigneusement les vitesses angulaires (mesurées avec le satellite Gaia de l'Agence Spatiale Européenne) des étoiles à la périphérie de l'amas globulaire NGC 3201, situé à 16 000 années-lumière du Soleil, les astronomes pensent avoir enfin détecté l'influence de la matière noire dans un amas globulaire. Ils ont découvert que les mouvements des étoiles (c'est-à-dire la dispersion

*Le grand champ des observations Gaia autour de NGC 3201 nous permet de mesurer la dispersion des vitesses aux confins de l'amas. Celle-ci est significativement plus élevée (points rouges dans le graphique en haut à droite) par rapport à ce qui est attendu en dynamique newtonienne (graphique en bas à droite). Ceci suggère la présence de matière noire, résidu de la formation de l'Univers primordial, ou la présence de forces de marée étonnamment élevées dues au potentiel de la Voie lactée.*  
(P. Bianchini et al.)





*Image du cœur de NGC 3201 obtenue avec le télescope spatial Hubble. Situé dans la constellation australe de Vela, cet amas a plusieurs particularités comme une orbite rétrograde dans la Galaxie, la présence d'un trou noir, et une population stellaire hétérogène. (ESA/Hubble & NASA)*

des vitesses des étoiles) sont beaucoup plus importants que ce à quoi on s'attendait dans les zones externes de l'amas, et ce même en présence des perturbations de la Voie lactée produisant un échauffement par effet de marée. La mesure pourrait donc indiquer que le chauffage de marée de NGC 3201 a été plus fort pour une raison inconnue, ou que de la matière noire est présente dans l'amas.

La matière noire commencerait en effet à affecter la dynamique des étoiles dans ces régions externes, tandis qu'elle resterait sous-dominante dans les régions plus internes où la densité des étoiles est extrêmement élevée. Un tel effet pourrait-il également être une signature potentielle d'une modification de la gravitation ? Les chercheurs notent que

l'effet mesuré serait un peu trop fort pour être expliqué par les modèles de gravitation alternative populaires, mais qu'il faudrait faire des simulations détaillées pour conclure de façon définitive en ce sens. Dans tous les cas, ce résultat ouvre la voie à une véritable révolution dans notre compréhension de la dynamique, de l'histoire et de la formation des amas globulaires. Y a-t-il quelque chose de vraiment particulier et d'anormal dans NGC 3201, ou s'agit-il d'un cas représentatif ? Les amas globulaires ont-ils en fait presque tous de la matière noire ? Pour le savoir, les astronomes envisagent maintenant d'étendre le champ de leur étude à un plus grand échantillon d'amas, en utilisant à nouveau les données de la mission Gaia.