

# L'astronomie dans le monde

*Simulation des orbites d'étoiles proches du trou noir supermassif de la Voie lactée.  
(ESO/L. Calçada/spaceengine.org)*

## ***Ballet au centre de la Voie lactée***

*Basé sur un communiqué ESO*

Des observations effectuées au moyen du VLT de l'ESO ont révélé l'accord parfait entre les mouvements d'une étoile autour du trou noir supermassif de la Voie lactée et la théorie de la relativité générale d'Einstein.

Ce résultat tant attendu a été permis par le gain constant en précision des mesures effectuées ces 30 dernières années. Il offre aux astronomes la possibilité de percer le mystère entourant ce monstre tapi au centre de notre galaxie.

La théorie de la relativité générale prédit que l'orbite d'un objet autour d'un autre n'est pas fermée – contrairement à ce que dit la théorie de la gravitation newtonienne – mais précesse vers l'avant dans le plan du mouvement. Ce fameux effet, observé pour la première fois dans le cas de Mercure autour du Soleil, constitua la première preuve de la théorie de la relativité générale. Une centaine d'années plus tard, on a pu le déceler dans le mouvement d'une étoile autour de la source radio compacte Sagittarius A\* située au centre de la Voie lactée. Ce résultat observationnel

renforce l'idée selon laquelle Sagittarius A\* est un trou noir supermassif dont la masse approche les 4 millions de masses solaires.

Situés à 26 000 années-lumière du Soleil, Sagittarius A\* et l'amas stellaire dense qui l'entoure offrent un laboratoire unique de test des lois de la physique dans des conditions de gravité extrêmes. L'une de ces étoiles, baptisée S2, s'approche à moins de vingt milliards de kilomètres du trou noir supermassif – ce qui représente 120 fois la distance Terre-Soleil. Elle est l'une des étoiles dont l'orbite la rapproche le plus de ce type de monstre céleste. À cette distance S2 se déplace à 3% de la vitesse de la lumière, complétant son orbite en 16 ans seulement. Après avoir suivi le déplacement de l'étoile sur son orbite durant plus de 25 ans, des mesures précises ont mis en évidence la précession qui modifie la trajectoire de l'étoile S2 autour de Sagittarius A\*.

Le périastre de l'orbite de S2 autour du trou noir change à chaque révolution, de sorte que l'orbite suivante est un peu tournée par rapport à la précédente, générant l'aspect d'une rosette. La théorie de la relativité permet de déterminer avec précision l'amplitude de ce changement qui s'avère être en parfait accord

avec les dernières observations. Cet effet, baptisé précession de Schwarzschild, n'avait encore jamais été mesuré pour une étoile en orbite autour d'un trou noir supermassif.

Cette étude menée grâce au VLT de l'ESO a par ailleurs permis aux scientifiques de mieux connaître l'environnement du trou noir central de la Galaxie. Les mesures effectuées sur S2 sont en accord si parfait avec la théorie que l'on peut estimer la quantité de matière invisible – matière noire ou éventuellement de petits trous noirs – autour de Sagittarius A\*. Ce champ d'investigation présente un intérêt certain pour la compréhension de la formation et de l'évolution des trous noirs supermassifs.

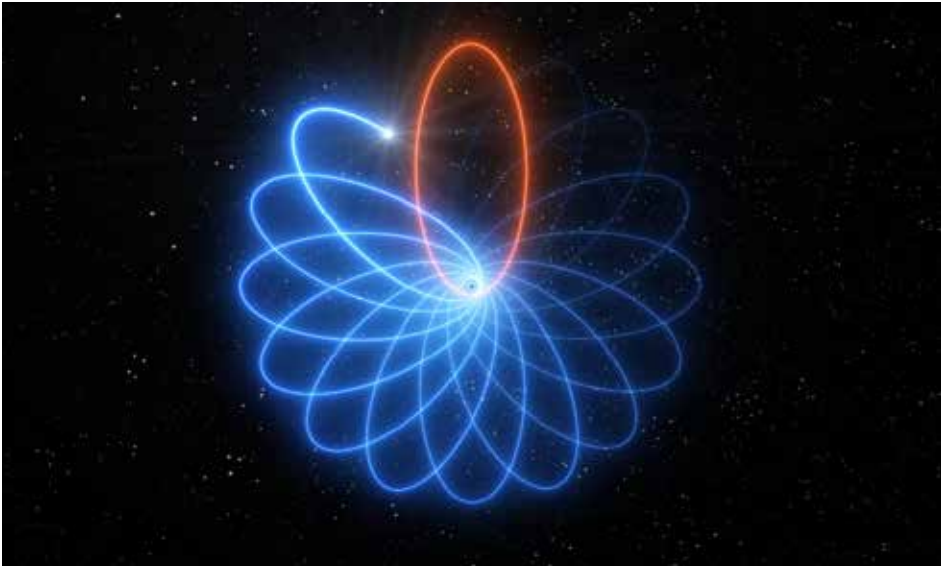
Pour obtenir ce résultat, les astronomes ont effectué plus de 330 mesures au moyen des instruments GRAVITY, SINFONI et NACO du VLT. Parce que des années sont nécessaires à S2 pour décrire son orbite autour du trou noir supermassif, il était crucial de suivre l'étoile durant près de trois décennies afin de saisir toutes les subtilités de son mouvement.

Cette équipe de chercheurs constitue la collaboration GRAVITY, du nom de l'instrument qu'elle a développé pour l'interféromètre

du VLT, qui combine la lumière des quatre télescopes de 8 mètres du VLT pour en faire un super télescope dont la résolution équivaut à celle d'un télescope de 130 mètres de diamètre. En 2018, la même équipe avait rapporté l'observation d'un autre effet prédit par la théorie de la relativité générale : la lumière en provenance de l'étoile S2 rougissait à mesure qu'elle s'approchait de Sagittarius A\*.

Avec le futur Extremely Large Telescope de l'ESO, l'équipe pense pouvoir observer des étoiles de magnitude plus élevée orbitant à plus faible distance du trou noir supermassif de notre galaxie et devrait être capable de détecter la présence d'étoiles suffisamment proches du trou noir pour ressentir les effets de sa rotation. Cela signifierait alors que les astronomes seraient en mesure de déterminer deux quantités, à savoir le spin et la masse de Sagittarius A\*, et de définir l'espace et le temps qui l'environnent. Cela constituerait un test encore différent de la théorie de la relativité générale.

*Vue d'artiste de la précession de l'orbite stellaire – l'effet est exagéré afin de permettre une meilleure visualisation. (ESO/L. Calçada)*



## **Disparition**

*Basé sur un communiqué ESO*

Entre 2001 et 2011, le comportement d'une étoile massive située dans la galaxie naine de Kinman laissait penser qu'elle se trouvait dans un stade avancé de son évolution. Une étude entreprise en 2019 avec le VLT de l'ESO n'en trouva aucune trace. L'étoile avait simplement disparu.

La galaxie naine de Kinman se situe à 75 millions d'années-lumière dans la constellation du Verseau. Elle est trop distante pour permettre de distinguer les étoiles individuelles mais on peut discerner la signature de quelques-unes d'entre elles. Ainsi, les observations antérieures avaient montré la présence d'une étoile massive de type LBV (Luminous Blue Variable) – un astre 2,5 millions de fois plus brillant que le Soleil. Les LBV sont particulièrement instables et présentent parfois de brusques variations de spectre et de brillance. En dépit de ces changements, les variables bleues lumineuses laissent des traces spécifiques que les scientifiques peuvent identifier. Ces signatures spectrales n'apparaissent pas dans les données collectées par l'équipe en 2019, laissant les scientifiques particulièrement perplexes : il serait en effet très étrange qu'une étoile aussi massive disparaisse sans donner lieu à une explosion de supernova.

Dans un premier temps, au mois d'août 2019, l'équipe avait pointé l'instrument

ESPRESSO – le plus récent spectrographe de haute résolution de l'ESO – en direction de l'étoile, bénéficiant ainsi de la résolution offerte par l'utilisation simultanée des quatre télescopes de 8 mètres qui composent le VLT. Ils ne parvinrent toutefois pas à détecter la LVB. Quelques mois plus tard, l'équipe employa l'instrument X-shooter, qui équipe également le VLT de l'ESO, sans plus de succès.

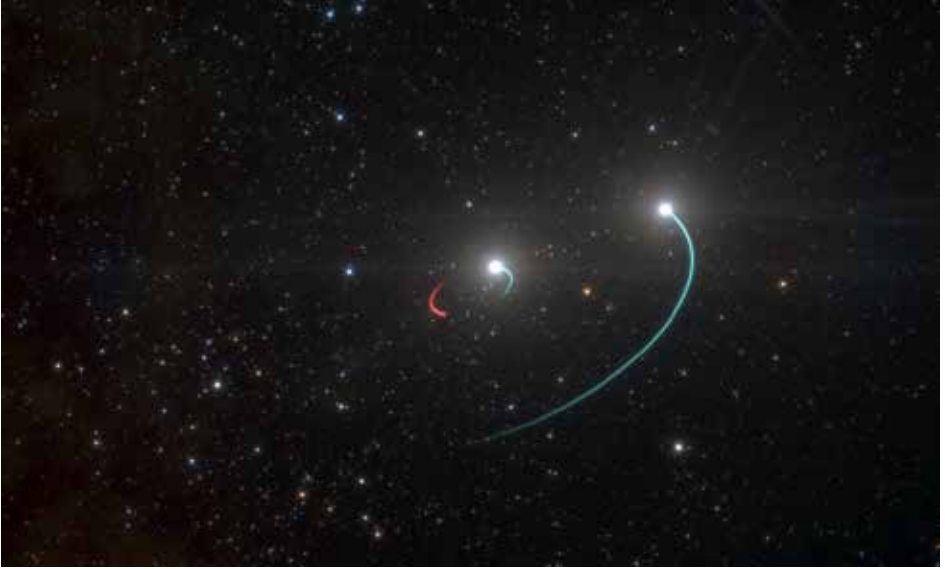
L'équipe s'est alors penchée sur les anciennes données collectées au moyen du VLT ainsi que par d'autres télescopes. Les archives scientifiques de l'ESO ont permis de dénicher et d'utiliser les données relatives au même objet datant de 2002 et 2009. La comparaison des spectres de haute résolution acquis par UVES en 2002 avec des observations de 2019 effectuées au moyen d'ESPRESSO, s'avéra particulièrement révélatrice, tant d'un point de vue astronomique qu'au plan de l'instrumentation.

Les anciennes données suggèrent que l'étoile de la galaxie naine de Kinman pourrait avoir connu une période de sursauts intenses et répétés qui s'est probablement achevée après 2011. Les étoiles variables bleues lumineuses telles que celle-ci sont susceptibles de traverser, au cours de leur existence, des phases d'explosions majeures, causant une perte de masse considérable et une augmentation de luminosité remarquable.

Sur la base de leurs observations et des modèles existants, les astronomes entrevoient deux explications possibles de la disparition de l'étoile et de l'absence de supernova. L'explosion pourrait avoir changé la variable bleue lumineuse en une étoile de moindre luminosité, en partie masquée par la poussière environnante. Ou l'étoile pourrait s'être effondrée en un trou noir, sans être passée par le stade supernova. Cet événement serait extrêmement rare : notre compréhension actuelle de la fin des étoiles massives plaide en faveur d'une explosion en supernova.

*La galaxie naine de Kinman (PHL 293B) observée en 2011 par la caméra WFC 3 du Télescope Spatial Hubble. (NASA, ESA/Hubble, J. Andrews/Arizona)*





## Trou noir proche

*Basé sur un communiqué ESO*

Les astronomes ont découvert un trou noir distant de 1000 années-lumière seulement. Il s'agit du premier système stellaire, visible à l'œil nu, comprenant un trou noir.

L'équipe observait HR 6819 dans le cadre d'une étude consacrée aux étoiles doubles. L'analyse des observations révéla l'existence d'un troisième objet, un trou noir. Les observations effectuées au moyen du spectrographe FEROS installé sur le télescope MPG/ESO de 2,2 mètres à La Silla montrèrent que l'une des deux étoiles visibles à l'œil nu tournait en 40 jours autour d'un imperceptible objet, tandis que la seconde étoile se trouvait à plus grande distance de cette paire intérieure.

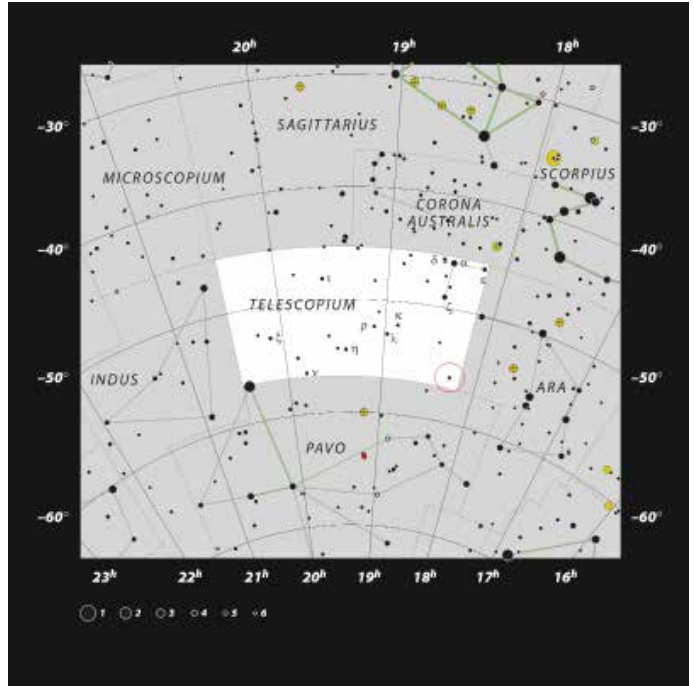
Le trou noir dissimulé dans le système HR 6819 est l'un des premiers trous noirs de masse stellaire découverts à ce jour qui n'interagit pas violemment avec son environnement et qui, par voie de conséquence, nous apparaît véritablement noir. L'équipe a pu détecter sa présence et déterminer sa masse en étudiant l'orbite de l'étoile composant la paire intérieure. Un objet invisible doté d'une masse

*Sur cette vue d'artiste figurent les orbites des objets composant le système triple HR 6819. Ce système est une binaire composée d'une étoile (trajectoire de couleur bleue) et du trou noir récemment découvert (trajectoire de couleur rouge), ainsi que d'un troisième objet, une autre étoile décrivant une orbite plus étendue (également de couleur bleue). (ESO/L. Calçada)*

équivalant à 4 masses solaires ne peut être qu'un trou noir.

À ce jour, les astronomes n'ont repéré que quelques dizaines de trous noirs dans notre galaxie, dont la plupart interagissent fortement avec leur environnement, ce qui se traduit par l'émission de puissants rayons X et les rend détectables. Les scientifiques estiment cependant que, depuis la naissance de la Voie lactée, un nombre beaucoup plus élevé d'étoiles se sont effondrées en trous noirs à la fin de leur existence. La découverte d'un trou noir silencieux et invisible dans le système HR 6819 laisse entrevoir la détection de nombreux trous noirs dissimulés dans notre galaxie.

*Carte montrant la position du système triple HR 6819, contenant le trou noir le plus proche de nous, dans la constellation du Télescope. Cette carte indique la plupart des étoiles visibles à l'œil nu dans de bonnes conditions d'observation – depuis un site situé dans le sud. (ESO, IAU, Sky & Telescope)*



La découverte d'un trou noir dans un système triple aussi proche suggère en effet que nous n'apercevons que la partie émergée d'un formidable iceberg.

En outre, les astronomes pensent que leur découverte pourrait expliquer un second système, LB-1. Celui-ci pourrait également être un système triple mais de nouvelles observations seront nécessaires pour le confirmer. LB-1 est un peu plus éloigné de la Terre mais relativement proche à l'échelle astronomique, laissant supposer que ce type de système existe en nombre probablement beaucoup plus élevé. Leur découverte suivie de leur étude nous permettrait de mieux connaître la formation et l'évolution de ces rares étoiles de plus de huit masses solaires dont l'existence s'achève en explosion de supernovæ, laissant derrière elles des trous noirs.

La découverte de ces systèmes triples composés d'une binaire interne et d'une étoile distante pourraient également nous renseigner sur les violents processus de fusion cosmique qui libèrent des ondes gravitationnelles suffisamment puissantes pour être détectées sur Terre. Certains astronomes pensent que les processus de fusion peuvent se produire dans des systèmes semblables, en terme de configuration, à HR 6819 ou LB-1, mais dont la paire intérieure serait composée de deux trous noirs ou d'un trou noir et d'une étoile à neutrons. L'objet extérieur peut exercer une influence gravitationnelle sur la paire intérieure au point d'initier un processus de fusion et la libération d'ondes gravitationnelles. Bien que les systèmes HR 6819 et LB-1 ne contiennent qu'un seul trou noir et pas d'étoile à neutrons, leur étude pourrait aider les astronomes à mieux comprendre les processus conduisant à des collisions dans les systèmes stellaires triples.

## Web cosmique

Basé sur un communiqué UC Santa Cruz

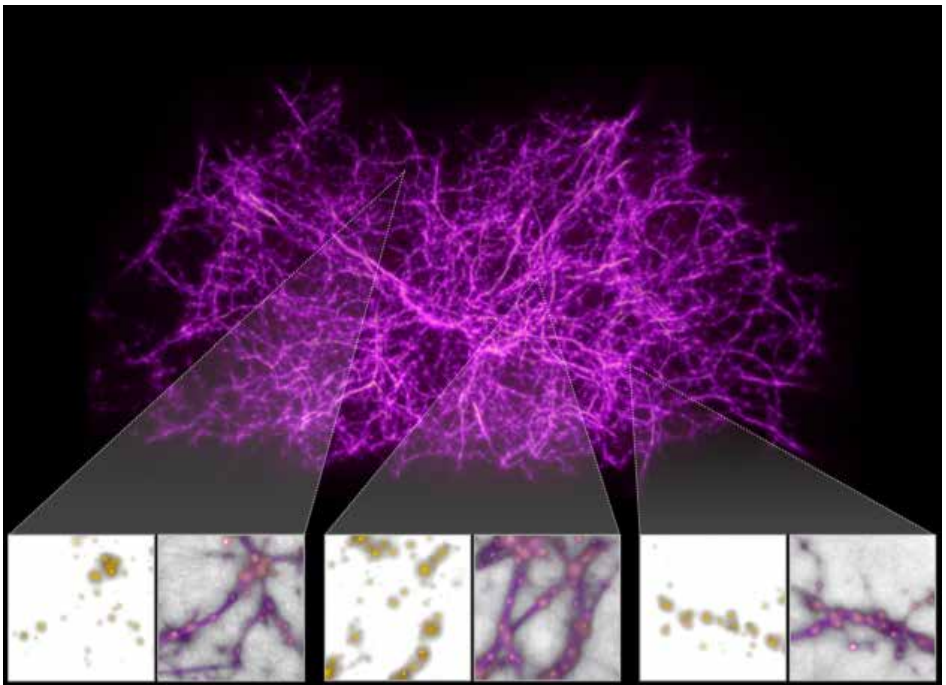
Les astronomes se sont inspirés de moisissures pour créer un modèle des filaments sombres de la toile cosmique qui relie les galaxies, montrant ainsi l'association entre le gaz intergalactique et la structure à grande échelle prédite par la cosmologie.

Selon la théorie dominante, alors que l'Univers évoluait après le Big Bang, la matière s'est répartie en un réseau de filaments interconnectés, séparés par d'énormes vides. Des galaxies sont apparues aux intersections et dans les régions les plus denses des filaments, là où la matière est la plus concentrée. Les filaments d'hydrogène qui s'étendent entre les galaxies sont pratiquement invisibles, mais les astronomes ont réussi à en apercevoir certaines parties.

Il est difficile de voir un rapport entre ces filaments et une petite moisissure visqueuse (myxomycète) appelée Physarum

polycephalum, que l'on trouve généralement sur les troncs d'arbres en décomposition, dans la litière de feuilles sur le sol des forêts et, parfois, en masses jaunes spongieuses sur les pelouses. Mais Physarum surprend depuis longtemps les scientifiques par sa capacité à créer des réseaux de distribution optimaux et à résoudre des problèmes d'organisation spatiale

*Ce réseau filamentaire complexe (ci-dessous) est une reconstruction de la toile cosmique créée en alimentant des données sur les emplacements et les masses de 37 000 galaxies dans un algorithme basé sur les modèles de croissance d'une moisissure visqueuse. Les images du bas sont des vues agrandies de petites régions, montrant les galaxies sous-jacentes à gauche et, à droite, les filaments du réseau cosmique superposés aux galaxies.*  
(Burchett et al., ApJL, 2020)



difficiles. Dans une expérience célèbre, cette moisissure a reproduit la disposition du système ferroviaire japonais en reliant des sources de nourriture disposées de manière à représenter les villes autour de Tokyo.

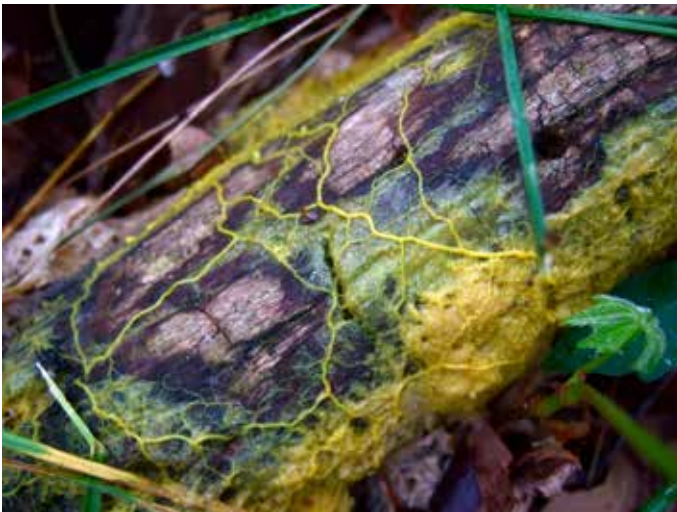
Impressionnés par les « biofabrications » de Physarum de l'artiste berlinois Sage Jenson, les chercheurs sont partis du modèle bidimensionnel de Physarum utilisé par ce dernier et l'ont étendu à trois dimensions en y apportant des modifications supplémentaires pour créer un nouvel algorithme qu'ils ont appelé la machine à Physarum de Monte Carlo.

En appliquant le nouvel algorithme sur un ensemble de données de 37 000 galaxies provenant du Sloan Digital Sky Survey (SDSS), le résultat a été une représentation assez convaincante de la toile cosmique. Ce succès n'est pas entièrement une coïncidence. Une moisissure visqueuse crée un réseau de transport optimisé, en trouvant les voies les plus efficaces pour relier les sources de nourriture. Dans la toile cosmique, la croissance de la structure produit des réseaux qui sont aussi, en un sens, optimaux. Les processus sous-jacents sont différents mais ils produisent des structures mathématiques qui sont analogues.

Bien sûr, une forte ressemblance visuelle des résultats du modèle avec la structure attendue de la toile cosmique ne prouve rien. Les chercheurs ont donc effectué divers tests pour valider le modèle tout en continuant à l'affiner.

Jusqu'à présent, les meilleures représentations du réseau cosmique sont issues de simulations informatiques de l'évolution de la structure de l'Univers, montrant la distribution de la matière noire à grande échelle, y compris les halos massifs dans lesquels se forment les galaxies et les filaments qui les relient. La matière noire est invisible, mais elle représente environ 85 % de la matière de l'Univers, et la gravité fait que la matière ordinaire suit la distribution de la matière noire.

Les chercheurs ont utilisé les données d'une simulation cosmologique (dite Bolshoi-Planck) pour tester la machine à Physarum de Monte Carlo. Après avoir extrait de la simulation un catalogue de halos de matière noire, ils ont exécuté l'algorithme pour reconstruire le réseau de filaments. Lorsqu'ils ont comparé le résultat de l'algorithme à la simulation originale, ils ont constaté une étroite corrélation. Le modèle de moisissure a essentiellement reproduit le réseau de filaments dans la simulation de matière noire, et les chercheurs ont pu utiliser la simulation pour affiner les paramètres de leur modèle.



*La moisissure Physarum polycephalum développe un réseau de tubes interconnectés alors qu'elle explore l'environnement à la recherche de nourriture.*  
(Frankenstoen/CC BY)

L'utilisation de 450 000 halos de matière noire permet d'obtenir un ajustement presque parfait aux champs de densité dans la simulation cosmologique. Un autre test a consisté à comparer les propriétés observées des galaxies du SDSS avec les densités du gaz dans le milieu intergalactique prévues par le modèle de moisissure visqueuse. L'activité de formation d'étoiles dans une galaxie a montré la corrélation attendue avec la densité de son environnement galactique.

L'équipe disposait ainsi d'un modèle pour le réseau cosmique reliant les 37 000 galaxies du SDSS et elle pouvait le tester par rapport aux observations astronomiques. Pour cela, ils ont utilisé les données du spectrographe Cosmic Origins du télescope spatial Hubble pour observer les traces du gaz intergalactique en absorption dans le spectre de centaines de quasars lointains.

Sachant où les filaments de la toile cosmique devaient se trouver grâce au modèle de moisissure, les astronomes ont pu sélectionner les spectres de quasars des archives de Hubble et chercher les signatures du gaz. Partout où un filament était prédit par le modèle, les spectres de Hubble ont montré les raies du gaz et le signal s'est renforcé vers le milieu des filaments où le gaz devrait être plus dense.

Dans les régions les plus denses, le signal a cependant diminué. Cela aussi répondait aux attentes, car le gaz y est plus chaud, ionisé et ne provoque plus d'absorption.

Ces résultats permettent pour la première fois d'estimer la densité du milieu intergalactique, depuis la périphérie des filaments de la toile cosmique jusqu'à l'intérieur chaud et dense des amas de galaxies. Non seulement ils confirment la structure du réseau cosmique prédite par les modèles cosmologiques, mais ils nous donnent un moyen d'améliorer notre compréhension de l'évolution des galaxies en la reliant aux réservoirs de gaz à partir desquels elles se forment.

## **Géantes, rouges et pleines de taches**

*Basé sur un communiqué MPS*

Environ 8% des géantes rouges sont couvertes de taches et tournent plus vite que leurs consœurs.

Les étoiles géantes rouges sont plus souvent tachetées qu'on ne le pensait. Les taches sont l'expression de forts champs magnétiques créés au plus profond de l'étoile dans un processus qui associe convection et rotation rapide.

Les géantes rouges sont généralement considérées comme des rotateurs lents, mais celles qui présentent des taches stellaires font apparemment exception. Les raisons de la rotation rapide peuvent aller de la synchronisation forcée avec une compagne très proche, à l'ingestion d'une étoile ou d'une planète, en passant par un ralentissement à partir d'une vitesse de rotation initiale rapide.

Parmi les caractéristiques les plus frappantes du Soleil figurent ses taches solaires, des zones relativement sombres par rapport au reste de la photosphère. Ces taches sont parfois visibles depuis la Terre même sans grossissement. De nombreuses autres étoiles, qui comme le Soleil sont dans la force de l'âge, sont également couvertes de taches. En revanche, chez les géantes rouges, qui sont à un stade avancé de l'évolution stellaire, elles étaient considérées comme rares. La raison de cette différence peut être trouvée au plus profond des étoiles. Dans un processus de dynamo, l'interaction des courants de plasma, conducteurs électriques, et de la rotation génère le champ magnétique qui remonte ensuite en surface. À certains endroits, des champs magnétiques particulièrement puissants empêchent le plasma chaud de s'écouler vers le haut. Ces régions apparaissent sombres et constituent les taches stellaires.

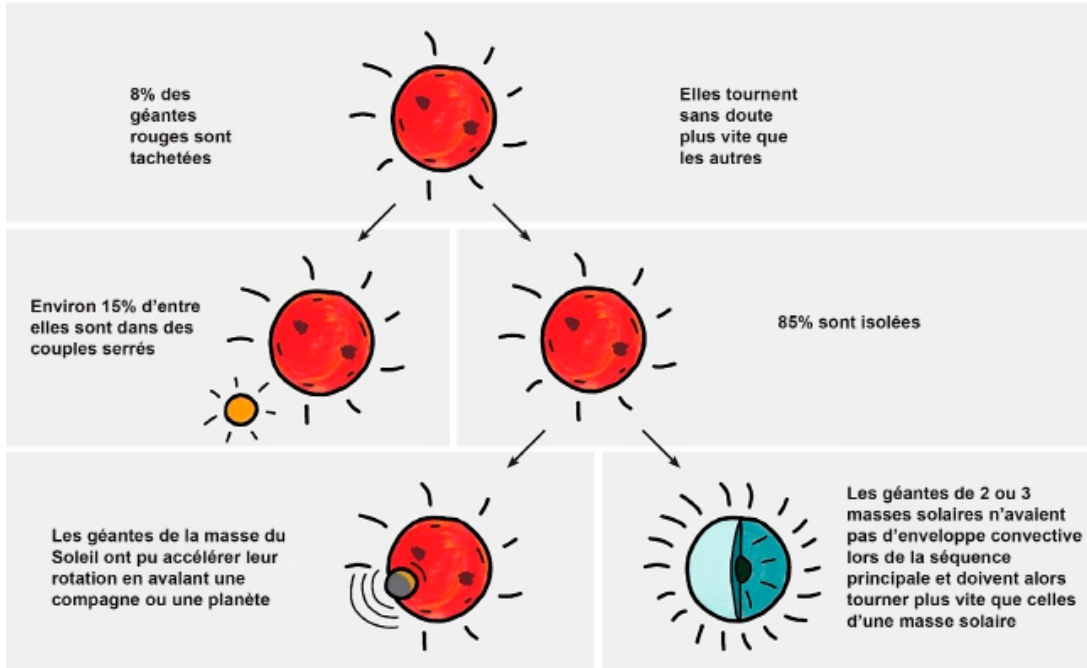
La rotation et la convection sont des ingrédients essentiels de la formation des champs magnétiques de surface et des taches stellaires. Les étoiles qui ont des couches convectives externes ont le potentiel de générer des champs magnétiques de surface grâce

à l'effet de dynamo mais ce n'est que lorsque l'étoile tourne assez vite que l'activité magnétique devient détectable. Jusqu'à présent, les chercheurs supposaient que presque toutes les géantes rouges tournaient assez lentement autour de leur propre axe. Les étoiles enflent de façon spectaculaire et deviennent des géantes rouges vers la fin de leur vie. En conséquence, leur rotation ralentit, comme celle de la légendaire patineuse qui écarte les bras lors d'une pirouette.

L'équipe de chercheurs a examiné les mesures d'environ 4 500 géantes rouges observées par le télescope spatial Kepler de 2009 à 2013 pour trouver des preuves de la présence de taches. Ces taches affaiblissent la luminosité de l'étoile. Comme elles ne changent généralement que très peu en plusieurs mois, elles ont le temps de passer sur l'hémisphère opposé puis de réapparaître après une rotation. Cela produit des fluctuations de luminosité typiques qui se répètent régulièrement.

Dans un deuxième temps, les scientifiques se sont penchés sur la question de savoir pourquoi les géantes tachetées tournent aussi rapidement. Comment ont-elles acquies cette vitesse ? Pour répondre à cette question, les astronomes ont déterminé autant de propriétés des étoiles que possible puis ont dressé un tableau d'ensemble. À l'observatoire Apache Point (Nouveau-Mexique), par exemple, les chercheurs ont étudié les variations de vitesse grâce à l'effet Doppler. L'équipe a également étudié les fluctuations rapides de la luminosité qui se superposent aux fluctuations plus lentes causées par les taches stellaires. Les fluctuations les plus rapides sont l'expression des ondes de pression qui se propagent à travers l'intérieur d'une étoile jusqu'à sa surface. Ces mesures d'astérosismologie contiennent des informations sur de nombreuses propriétés internes des étoiles, telles que la masse et l'âge.

L'analyse a révélé qu'environ 15 % des géantes tachetées appartiennent à des systèmes d'étoiles binaires proches, généralement constitués d'une géante rouge et d'une compagne plus petite et moins massive. Dans ces systèmes, les vitesses de rotation des deux



étoiles se synchronisent dans le temps jusqu'à ce qu'elles tournent à l'unisson. La géante rouge, plus lente, prend donc de l'élan et tourne plus vite qu'elle ne l'aurait fait sans son compagnon.

Les autres géantes rouges tachetées, soit environ 85 %, sont isolées, et pourtant elles tournent rapidement. Celles qui ont une masse à peu près égale à celle du Soleil ont probablement fusionné avec une autre étoile ou planète au cours de leur évolution et ont ainsi gagné en vitesse de rotation. Les étoiles un peu plus massives, dont la masse est deux à trois fois supérieure à celle du Soleil, ont connu une évolution différente. À l'apogée de leur vie, avant qu'elles ne deviennent des géantes rouges, leur structure interne empêchait la création d'un champ magnétique global qui poussait progressivement de la matière stellaire dans l'espace, freinant ainsi la rotation. Contrairement à leurs homologues magnétiques, qui tournent donc de plus en plus lentement au fil du temps, leur rotation n'a

### *Trois voies pour les géantes rouges tachetées.*

*(adapté de MPS / hormesdesign.de)*

probablement jamais ralenti de manière significative. Même devenues géantes rouges, elles tournent encore presque aussi vite que dans leur jeunesse.

Au total, outre le fait que certaines géantes rouges ont des taches, les astronomes ont pu distinguer trois groupes d'étoiles en rotation rapide, dont chacun a une explication très différente. Il n'est donc pas étonnant que le phénomène soit plus répandu qu'on ne le pensait.

Des études comme la présente recherche mettent en lumière, entre autres, l'évolution de la rotation et de l'activité magnétique des étoiles et leur interaction complexe, y compris l'impact sur l'habitabilité des systèmes planétaires qu'elles peuvent abriter.

## ***L'origine des trous noirs supermassifs***

*Basé sur un communiqué Cardiff university*

Peut-être sommes-nous plus près de comprendre comment naissent les trous noirs supermassifs (SMBH), et ce grâce à une nouvelle technique qui a permis de zoomer sur l'un de ces énigmatiques objets cosmiques avec des détails sans précédent.

Les scientifiques ne savent pas si les SMBH se sont formés dans des conditions extrêmes peu après le Big Bang, au cours d'un processus dit d'« effondrement direct », ou s'ils ont été formés beaucoup plus tard à partir de trous noirs résultant de la mort d'étoiles massives.

Dans le premier cas, les SMBH naîtraient avec des masses extrêmement importantes – des centaines de milliers à des millions de fois plus massives que le Soleil – et auraient une taille minimale.

Dans la seconde hypothèse, les SMBH commenceraient avec des trous noirs stellaires d'une centaine de masses solaires seulement, et grossiraient progressivement en se nourrissant des étoiles et des nuages de gaz environnants.

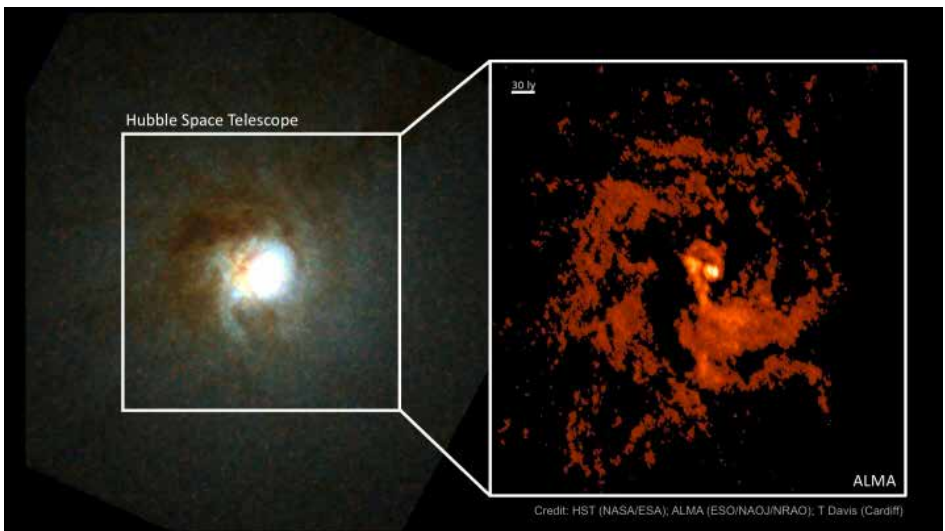
Les astronomes s'efforcent depuis longtemps de trouver les plus petits SMBH, les chaînons manquants qui permettraient de résoudre le problème.

Dans la nouvelle étude, des astronomes ont repoussé les limites, révélant l'un des SMBH les plus légers jamais observés – pesant moins d'un million de fois autant que le Soleil – dans une galaxie proche.

Le SMBH en question trône au cœur de la galaxie que l'on appelle familièrement « le fantôme de Mirach », en raison de sa proximité avec l'étoile brillante Mirach (bête Andromedae), ce qui lui donne un aspect fantomatique.

Les découvertes ont été faites grâce à une nouvelle technique appliquée au réseau ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) situé sur le plateau de Chajnantor dans les Andes chiliennes. ALMA est utilisé pour

*À gauche, on voit une image composite en couleur du centre du « fantôme de Mirach » prise par le télescope spatial Hubble. À droite, la nouvelle image ALMA de cette même région révèle en détail la distribution du gaz froid et dense qui tourbillonne autour du centre de l'objet. (Université de Cardiff)*



étudier la lumière de certains des objets les plus froids de l'Univers.

Le SMBH du fantôme de Mirach semble avoir une masse située dans la gamme prédite par les modèles d'effondrement direct. Il est actuellement actif et avale du gaz, ce qui exclut certains des modèles d'« effondrement direct » les plus extrêmes qui ne produisent que des SMBH très massifs.

Ce n'est pas suffisant en soi pour faire la différence entre les trous noirs stellaires initiaux et l'effondrement direct mais c'est un pas important dans la bonne direction.

Des SMBH ont également été trouvés dans des galaxies très lointaines, apparues quelques centaines de millions d'années seulement après le Big Bang. Cela suggère qu'au moins certains SMBH auraient pu devenir très massifs en très peu de temps, ce qui est difficile à expliquer selon les modèles de formation et d'évolution des galaxies.

Tous les trous noirs se développent en avalant les nuages de gaz et en perturbant les étoiles qui s'aventurent trop près d'eux, mais certains ont une vie plus active que d'autres.

La recherche des plus petits SMBH dans les galaxies voisines pourrait donc nous aider à comprendre leur origine.

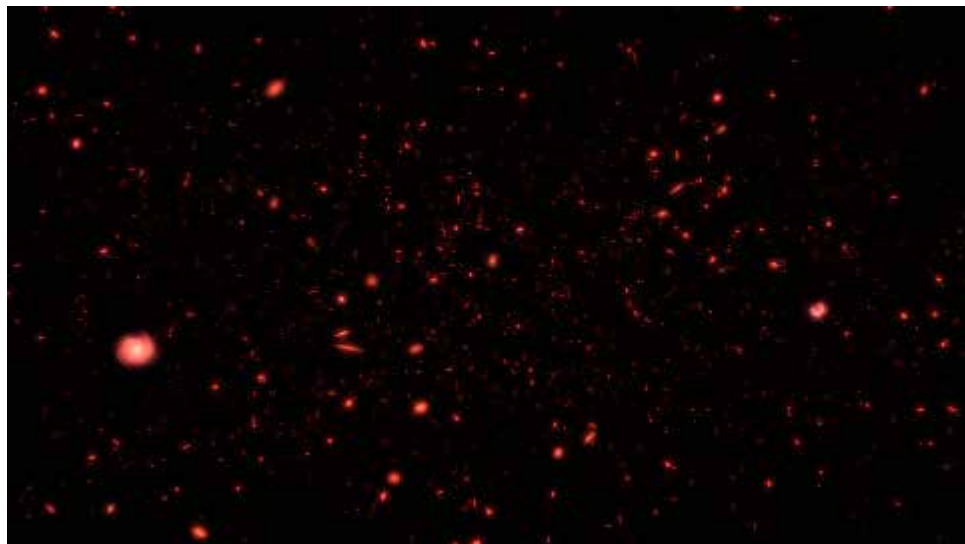
Dans leur étude, l'équipe a utilisé des techniques toutes nouvelles pour zoomer sur le cœur de la petite galaxie proche NGC 404, ce qui leur a permis d'observer les nuages de gaz tourbillonnants autour du SMBH.

ALMA a permis de résoudre les nuages de gaz au cœur de la galaxie, révélant des détails de seulement 1,5 année-lumière, ce qui en fait l'une des cartes à la plus haute résolution jamais réalisée pour le gaz d'une galaxie, et de résoudre une décennie de résultats contradictoires en révélant la véritable nature du SMBH au centre de la galaxie.

Cette nouvelle technique permettra d'explorer à la fois les propriétés et les origines de ces objets mystérieux et d'essayer de découvrir s'il existe une masse minimale pour un trou noir supermassif.

***Image Pan-STARRS de NGC 404 baignant dans la lueur de Mirach, d'où son surnom de fantôme de Mirach. (Donald Pelletier; CC BY-SA 4.0)***





## **Population III**

*Basé sur un communiqué ESA*

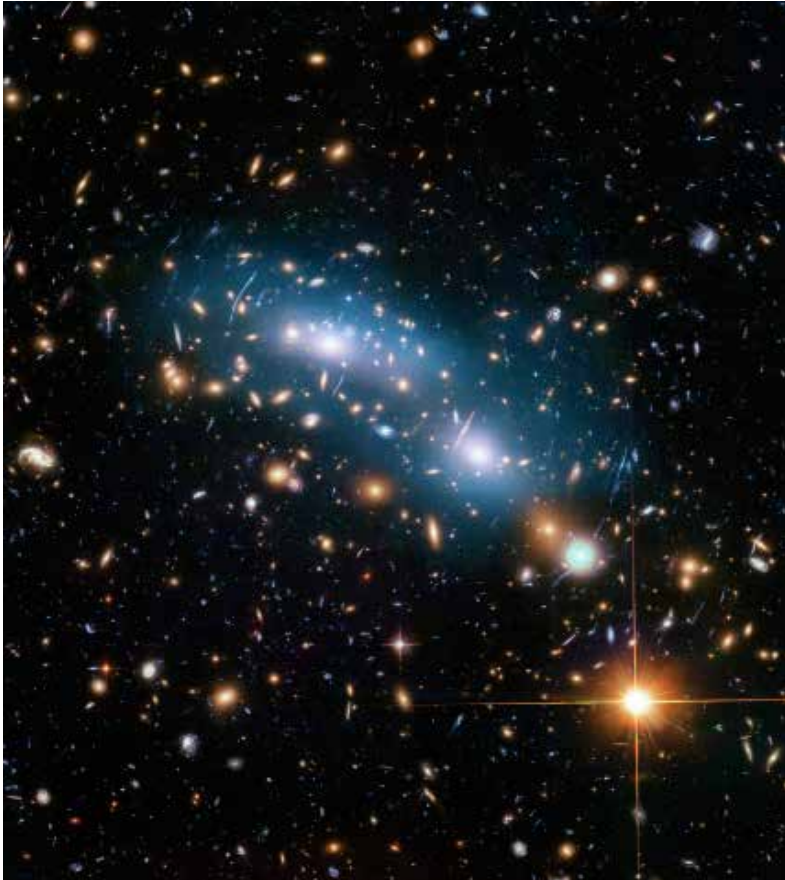
Une équipe de chercheurs s'est attachée à étudier la première génération d'étoiles de l'Univers primitif. Connues sous le nom d'étoiles de Population III, ces étoiles ont été forgées à partir de la matière primordiale qui a émergé du Big Bang. Les étoiles de Population III ont dû être fabriquées uniquement à partir d'hydrogène, d'hélium et de lithium, les seuls éléments qui existaient avant que les processus dans les noyaux de ces étoiles puissent créer des éléments plus lourds, tels que l'oxygène, l'azote, le carbone et le fer.

Les astronomes ont sondé l'Univers primitif environ 500 millions à 1 milliard d'années après le Big Bang en étudiant l'amas MACS J0416 et son champ « parallèle » (un champ de référence, proche de l'amas) avec le télescope spatial Hubble et ont étudié des données complémentaires provenant du télescope spatial infrarouge Spitzer et du VLT de l'ESO. Ils n'ont pu trouver aucune trace de ces étoiles de la première génération de Population III dans cet intervalle de temps cosmique.

***Impression d'artiste : l'Univers primitif.***  
***(ESA/Hubble, M. Kornmesser and NASA)***

Le résultat a été obtenu en utilisant les caméras WFC3 et ACS du télescope spatial Hubble dans le cadre du programme Hubble Frontier Fields. Ce programme (qui a permis d'observer six amas de galaxies lointaines de 2012 à 2017) a produit les observations les plus profondes jamais faites d'amas de galaxies et des galaxies situées derrière eux qui ont été amplifiées par l'effet de lentille gravitationnelle, révélant ainsi des galaxies 10 à 100 fois plus faibles que toutes celles observées précédemment. Les masses des amas de galaxies au premier plan sont suffisamment grandes pour courber et amplifier la lumière des objets plus éloignés qui se trouvent derrière eux. Cela permet à Hubble d'utiliser ces loupes cosmiques pour étudier des objets qui sont au-delà de ses capacités opérationnelles nominales.

Les scientifiques ont mis au point une nouvelle technique qui permet d'éliminer la lumière des galaxies de premier plan qui constituent ces lentilles gravitationnelles. Cela



*Cette image du télescope spatial Hubble de la NASA/ESA montre l'amas de galaxies MACS J0416. C'est l'un des six amas de galaxies étudiés par le programme Hubble Frontier Fields, qui a produit les images les plus profondes de lentilles gravitationnelles jamais réalisées. Les scientifiques ont utilisé la lumière intra-amas (visible en bleu) pour étudier la distribution de la matière noire au sein de l'amas. (NASA, ESA et M. Montes, university of New South Wales)*

leur a permis de découvrir des galaxies dont la masse est plus faible que celle jamais observée avec Hubble, à une distance correspondant à l'époque où l'Univers avait moins d'un milliard d'années. À cette époque cosmique, le manque de preuves de l'existence de populations stellaires exotiques et l'identification de nombreuses galaxies de faible masse étaient la suggestion que ces galaxies sont les candidates les plus probables à la réionisation de l'Univers. Cette période de réionisation dans l'Univers primitif est celle où le milieu intergalactique neutre a été ionisé par les premières étoiles et galaxies.

Ces résultats ont de profondes conséquences astrophysiques car ils montrent que les galaxies ont dû se former beaucoup plus tôt que nous le pensions. Cela soutient aussi fortement l'idée que les premières galaxies de faible masse et de faible luminosité sont responsables de la réionisation.

Ces résultats suggèrent également que la formation des étoiles et des galaxies s'est produite beaucoup plus tôt que ce que l'on peut sonder avec le télescope spatial Hubble. Il reste donc un domaine de recherche passionnant pour le prochain télescope spatial James Webb de la NASA/ESA/CSA.

## Le ciel X

Basé sur un communiqué MPE

En 182 jours, le télescope X eROSITA embarqué sur la mission Spectrum-Röntgen-Gamma (SRG)<sup>1</sup>, a effectué un premier balayage complet du ciel. Cette nouvelle carte de l'Univers chaud contient plus d'un million d'objets, doublant ainsi le nombre de sources de rayons X connues découvertes au cours des 60 ans d'histoire de l'astronomie X. La plupart des nouvelles sources sont des noyaux galactiques actifs lointains, témoins de l'existence de gigantesques trous noirs.

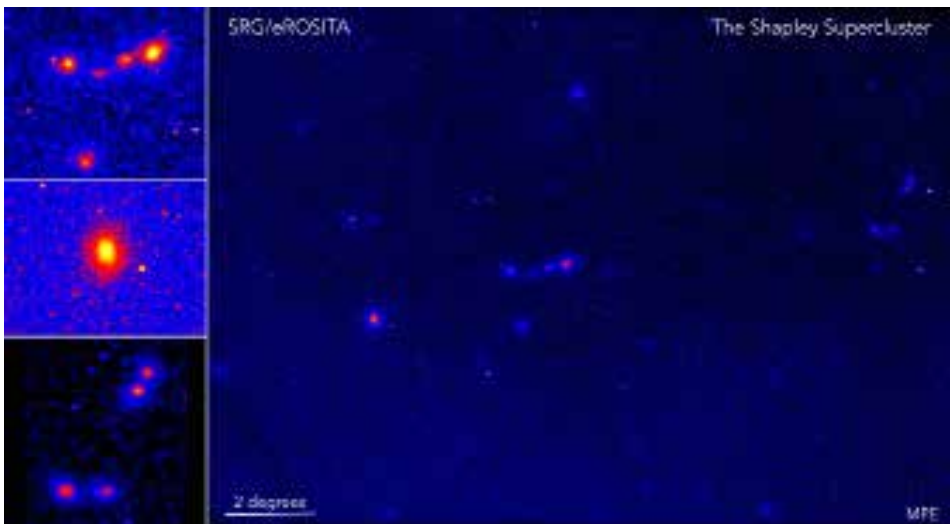
Les amas de galaxies cartographiés avec eROSITA serviront à étudier la croissance des structures cosmiques et à contraindre

divers paramètres cosmologiques. Plus près de nous, on découvre des étoiles aux couronnes très chaudes, des binaires et des restes de supernovæ. Nous disposons ainsi d'une carte complète des baryons chauds de la Voie lactée, ce qui ne pouvait être réalisé qu'avec la vue à 360 degrés d'eROSITA. Cette image du ciel entier en rayons X change radicalement la façon dont les astronomes regardent l'Univers énergétique. Outre la richesse de détails, la beauté des images est vraiment stupéfiante.

*Le superamas de galaxies de Shapley est l'une des concentrations de galaxies les plus massives de l'Univers local, à une distance d'environ 650 millions d'années-lumière. Chacune des douze structures étendues est elle-même un amas de galaxies, constitué de centaines ou milliers de galaxies individuelles, chacune d'entre elles marquant l'intersection de filaments de la grande toile cosmique. Cette image s'étend sur 16 degrés dans le ciel (environ 30 fois la taille de la pleine lune), soit environ 180 millions d'années-lumière de diamètre à la distance du superamas de Shapley. Les images de gauche montrent un zoom des amas les plus massifs du superamas de Shapley.*

*(Esra Bulbul, Jeremy Sanders/MPE)*

<sup>1</sup> Lancée le 13 juillet 2019, la sonde spatiale SRG évolue autour du deuxième point de Lagrange du système Terre-Soleil, le télescope étant en mode de balayage continu. Lors de la première étude du ciel, chaque point du ciel a été exposé au télescope eROSITA pendant une durée moyenne de 150 à 200 secondes. Les régions proches des pôles de l'écliptique, où les grands cercles tracés par le télescope sur le ciel se croisent, ont été revisitées à de nombreuses reprises, accumulant des expositions allant jusqu'à quelques heures. La SRG continuera à scruter le ciel pendant trois ans et demi encore.

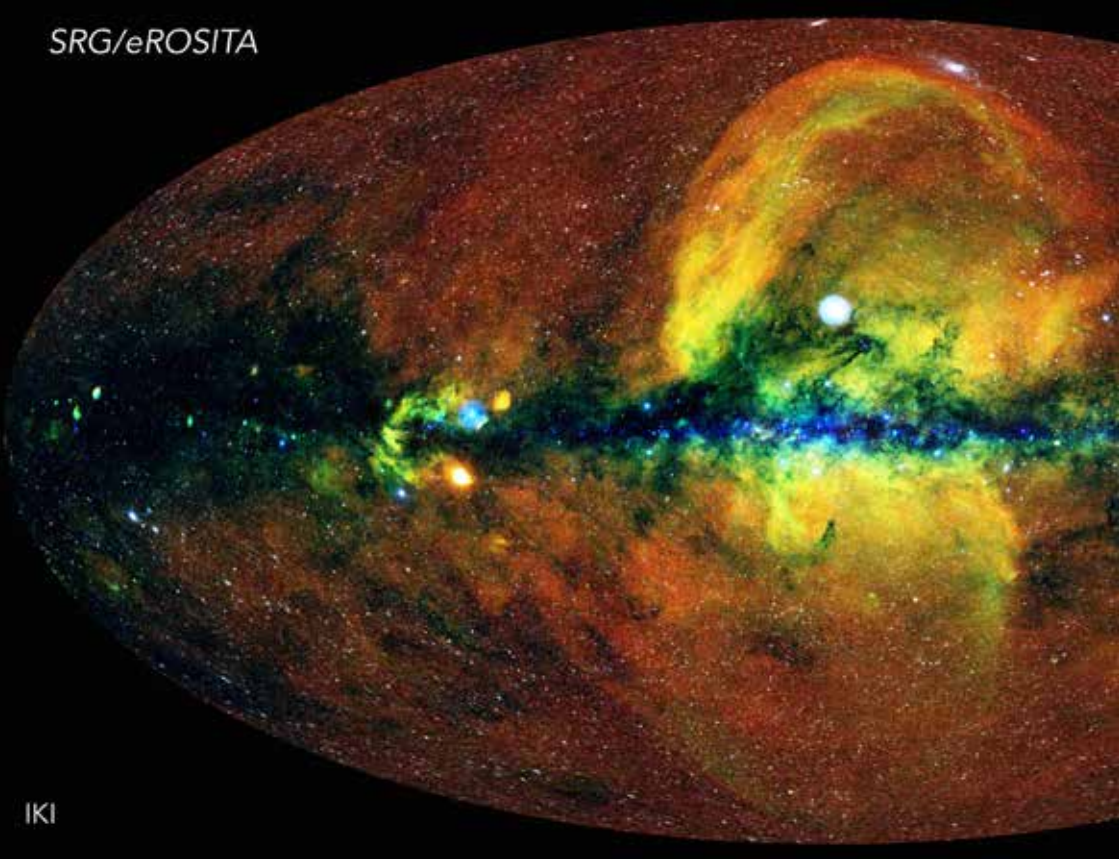




*En raison de sa taille et de sa proximité, le reste de supernova de Vela est l'un des objets les plus visibles du ciel X. La supernova Vela a explosé il y a environ 12 000 ans à une distance de 800 années-lumière et chevauche au moins deux autres restes de supernova, Vela Junior (un anneau bleuâtre en bas à gauche) et Puppis-A (en haut à droite). Vela Junior a été découverte il y a tout juste 20 ans. Des débris de cette explosion ont été trouvés dans des échantillons de glace polaire. Les trois explosions de supernova*

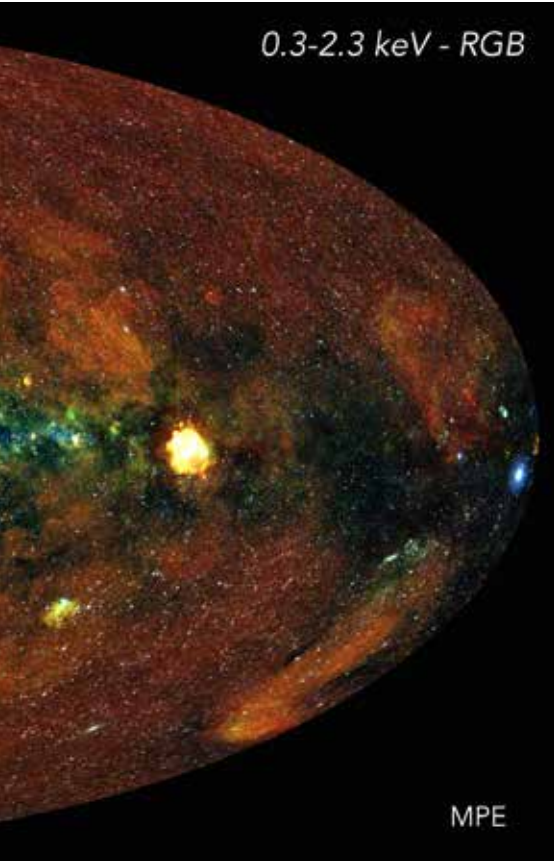
*ont produit à la fois des restes de supernova et des étoiles à neutrons, qui brillent comme d'intenses sources ponctuelles de rayons X près de leurs centres. La qualité des nouvelles données d'eROSITA dans ce cimetière stellaire donnera aux astronomes de nouvelles perspectives sur les processus physiques qui se déroulent dans le plasma chaud des supernovae ainsi que pour l'exploration des étoiles à neutrons. (Peter Predehl, Werner Becker/MPE, Davide Mella)*

SRG/eROSITA



*L'Univers énergétique vu avec le télescope à rayons X eROSITA. La première étude du ciel entier d'eROSITA a été réalisée sur une période de six mois en laissant le télescope tourner continuellement, ce qui a permis d'obtenir une exposition uniforme d'environ 150 à 200 secondes sur la plus grande partie du ciel, les pôles de l'écliptique étant visités plus profondément. Pendant qu'eROSITA balaie le ciel, l'énergie des photons collectés est mesurée avec une précision allant de 2 à 6 %. Pour générer cette image, dans laquelle le ciel entier est projeté sur une ellipse (projection Aitoff) avec le centre de la Voie lactée au milieu et le plan de la Galaxie à l'horizontale, les photons ont été codés par couleur en fonction de leur énergie (rouge pour les énergies 0,3-0,6 keV, vert pour 0,6-1 keV, bleu pour 1-2,3 keV). L'image originale, d'une résolution d'environ*

*10 secondes d'arc et d'une gamme dynamique correspondante de plus d'un milliard, a été lissée avec une gaussienne de 10 minutes d'arc de largeur afin de générer l'image ci-dessus. La lueur diffuse rouge qui s'éloigne du plan galactique est l'émission du gaz chaud à proximité du Système solaire (la Bulle locale). Le long du plan galactique la poussière et le gaz absorbent les photons de rayons X de faible énergie, de sorte que seules les sources émettrices de haute énergie peuvent être vues, et leur couleur apparaît en bleu dans l'image. Le gaz le plus chaud proche du centre galactique, représenté en vert et en jaune, porte l'empreinte de l'histoire des processus les plus énergétiques, comme les explosions de supernovae, les fontaines de gaz jaillissant du plan galactique et, peut-être, une ancienne explosion du trou noir supermassif maintenant dormant au*



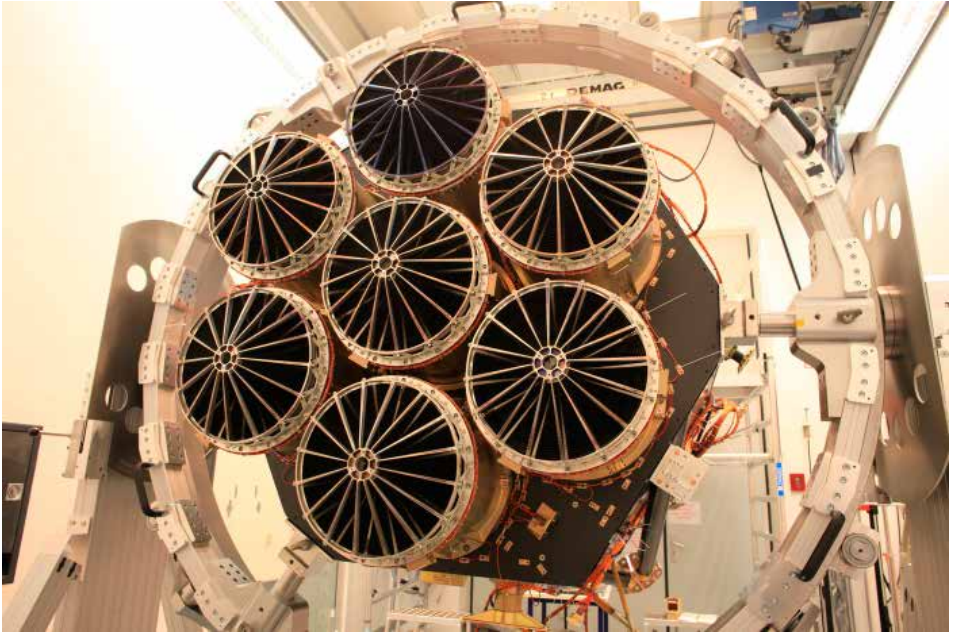
*centre de la Galaxie. Ce milieu chaud et turbulent est criblé de centaines de milliers de sources de rayons X, qui apparaissent pour la plupart en blanc sur l'image, et sont uniformément réparties dans le ciel. Parmi elles, des noyaux galactiques actifs éloignés (dont quelques-uns émettant à une époque où l'Univers avait moins d'un dixième de son âge actuel) sont visibles en tant que sources ponctuelles, tandis que des amas de galaxies se révèlent être des nébulosités de rayons X étendues. Au total, environ un million de sources de rayons X ont été détectées sur l'image du ciel d'eROSITA, un trésor qui occupera les équipes dans les années à venir.*

*(Jeremy Sanders, Hermann Brunner, team eSASS/MPE, Eugene Churazov, Marat Gilfanov/IKI)*

Cette première image complète du ciel est environ quatre fois plus profonde que celle de la précédente étude qui avait été effectuée grâce au télescope spatial X ROSAT il y a 30 ans, et on y trouve environ dix fois plus de sources : à peu près autant que celles qui ont été découvertes par tous les télescopes à rayons X passés réunis.

Si la plupart des objets astronomiques émettent des rayons X, l'Univers des hautes énergies est très différent de celui vu par les télescopes optiques ou radio. En regardant à l'extérieur de notre Galaxie, la plupart des sources eROSITA sont des trous noirs supermassifs situés à des distances cosmologiques et des amas de galaxies, qui apparaissent comme d'immenses halos de gaz chaud confiné par d'énormes concentrations de matière sombre. L'image du ciel entier révèle en détail la structure du gaz chaud dans la Voie lactée elle-même, ainsi que le milieu circum-galactique, dont les propriétés sont essentielles pour comprendre la formation et l'évolution de notre galaxie. La carte aux rayons X d'eROSITA révèle également des étoiles avec des couronnes très chaudes, magnétiquement actives, des systèmes binaires renfermant des étoiles à neutrons, des trous noirs ou des naines blanches, et des restes de supernovæ aussi bien dans la Voie lactée que dans des galaxies proches comme les nuages de Magellan.

Les scientifiques attendaient avec impatience cette première carte du ciel d'eROSITA. De grandes zones du ciel déjà couvertes dans de nombreuses longueurs d'onde demandaient d'être étudiées en rayons X. La carte eROSITA constitue un trésor de phénomènes rares et exotiques, y compris de nombreux types de transitoires et de variables, comme les éruptions d'objets compacts, les



***Le télescope X eROSITA consiste en 7 modules chacun contenant 54 miroirs recouverts d'or. (P. Friedrich/MPE)***

étoiles à neutrons en train de fusionner, ou encore les étoiles avalées par des trous noirs.

eROSITA voit souvent des sursauts de rayons X. Les télescopes au sol sont immédiatement alertés pour en déterminer la nature.

Assembler l'image a été une tâche gigantesque, demandant le traitement de 165 Go de données collectées par les sept caméras d'eROSITA. Alors que les astronomes analysent cette première carte pour approfondir notre compréhension de la cosmologie et des processus astrophysiques aux hautes énergies, le télescope a commencé sa deuxième étude du ciel, qui sera terminée d'ici la fin de l'année. Au total, au cours des prochaines années, on prévoit d'obtenir 7 cartes similaires à celle-ci. Leur sensibilité combinée sera meilleure d'un facteur 5 et sera utilisée par les astrophysiciens et les cosmologistes pendant des décennies.

Avec un million de sources en seulement six mois, eROSITA a déjà révolutionné l'astronomie des rayons X. Mais ce n'est qu'un avant-goût de ce qui va suivre. On échantillonne déjà un volume de l'Univers chaud beaucoup plus grand que ce qui était possible auparavant. Les prochaines années verront des sondages encore plus profonds, jusqu'à l'endroit où naquirent les premières structures cosmiques géantes et les trous noirs supermassifs.

## AB Aurigae

Basé sur un communiqué ESO

Des observations réalisées avec le VLT de l'ESO ont mis en évidence les signes révélateurs d'un système planétaire en formation. Autour de l'étoile jeune AB Aurigae se trouve un disque dense de poussière et de gaz dans lequel les astronomes ont repéré une structure en spirale avec une torsion qui marque le site où une planète pourrait se former. Cette structure pourrait être la première preuve directe de la naissance d'une planète.

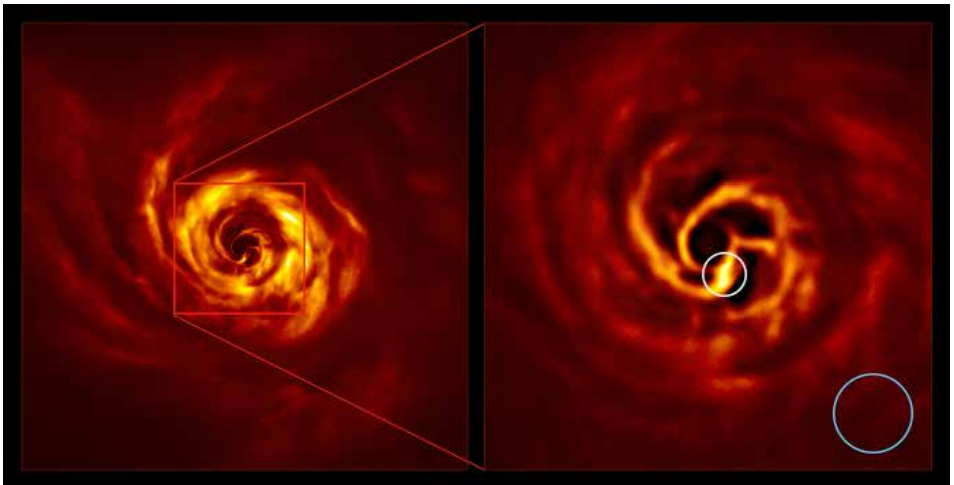
Les spirales de ce type signalent la présence de bébés planètes qui créent des ondes dans le disque, un peu comme le sillage d'un bateau. À mesure que la planète tourne autour de l'étoile centrale, les ondes prennent la forme de bras spiraux. La région jaune très brillante près du centre de l'image ci-dessous est l'un de ces sites de perturbation où l'équipe pense qu'une planète est en train de se former. Ce point de perturbation se trouve à peu près à la même distance de l'étoile que Neptune du Soleil.

Les observations du système AB Aurigae effectuées il y a quelques années avec ALMA ont fourni les premiers indices de la formation de planètes autour de l'étoile. Sur les images d'ALMA, les scientifiques ont repéré deux

bras spiraux de gaz près de l'étoile, situés dans la région interne du disque. En 2019 et début 2020, les astronomes ont entrepris de capturer une image plus précise de l'étoile en utilisant l'instrument SPHERE du VLT de l'ESO au Chili. Les images obtenues avec SPHERE sont les images les plus profondes du système AB Aurigae obtenues à ce jour.

Les astronomes ont ainsi pu confirmer la présence des bras spiraux détectés pour la première fois par ALMA et ont également repéré une autre caractéristique remarquable, une torsion, qui indique la présence d'une planète en cours de formation dans le disque. Cette torsion est prédite selon certains modèles théoriques de formation planétaire et correspond à la connexion de deux spirales – l'une s'enroulant vers l'intérieur de l'orbite de la planète, l'autre s'étendant vers l'extérieur – qui se rejoignent à l'emplacement de la planète. Elles permettent au gaz et à la poussière du disque de s'accréter sur la planète en formation et de la faire croître.

*Le système AB Aurigae. L'image de droite montre la région interne du disque, y compris la torsion jaune entourée de blanc, qui pourrait marquer l'endroit où une planète se forme. Le cercle bleu représente la taille de l'orbite de Neptune.*  
(ESO/Boccaletti et al.)



## Ganymède

*Basé sur un communiqué Kobe University*

Des chercheurs ont procédé à une nouvelle analyse détaillée des images obtenues par les sondes Voyager 1, 2 et Galileo afin d'étudier l'orientation et la distribution d'anciennes dépressions tectoniques sur Ganymède, la plus grosse lune de Jupiter. Ils ont découvert que ces creux sont distribués de façon concentrique sur presque toute la surface – une distribution globale qui suggère qu'ils pourraient faire partie d'un cratère géant. L'étendue radiale de ses anneaux mesurée à la surface du satellite est de 7 800 km (le diamètre du satellite est de 5 260 km). Une simulation numérique montre qu'un tel cratère géant résulterait de l'impact d'un astéroïde de 150 km de rayon percutant Ganymède à une vitesse de 20 km/s. Si c'est le cas, on a affaire à la plus grande structure d'impact identifiée dans le Système solaire jusqu'à présent. On pense qu'un tel impact s'est produit il y a environ 40 millions d'années.

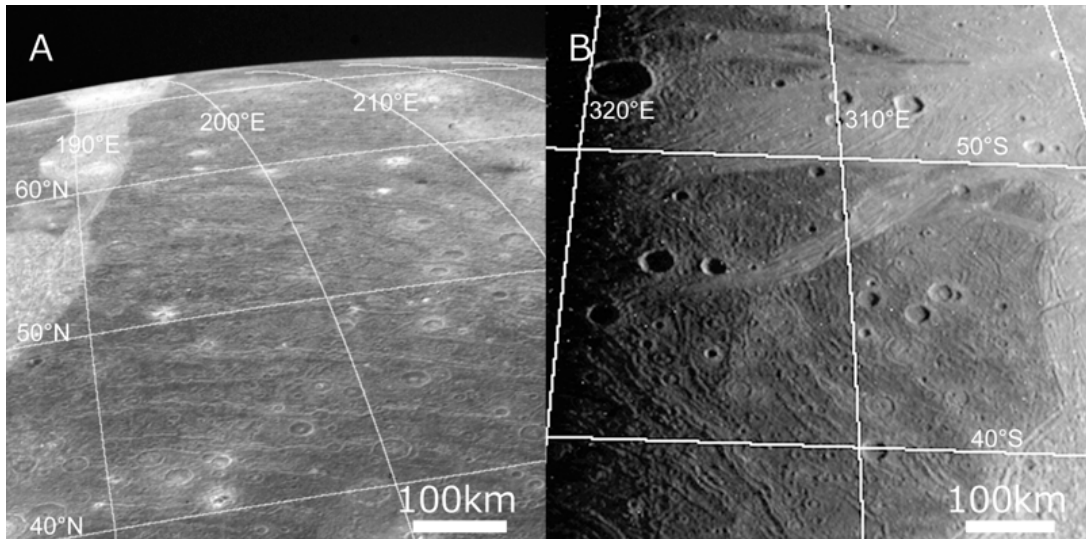
La surface de Ganymède est classée en deux catégories : terrain sombre et terrain clair. Le terrain sombre est extrêmement ancien et comporte de nombreux cratères, ainsi que d'autres dépressions. Le terrain clair est

relativement récent, peu cratérisé. Ces deux types de terrain ne sont pas disposés de façon cohérente mais sont répartis de façon aléatoire sur l'ensemble de Ganymède. On pense que les sillons sont les plus anciennes caractéristiques géologiques de Ganymède car ils ne se trouvent que sur le terrain sombre et sont recouverts par de nombreux cratères d'impact.

On peut donc supposer qu'il y avait un cratère d'impact géant avec une structure annulaire qui couvrirait toute la surface de Ganymède avant la formation des zones de terrain clair. Une structure similaire, le cratère Valhalla, subsiste à la surface de Callisto, un autre satellite de Jupiter. Jusqu'à présent, le cratère Valhalla était le plus grand cratère multi-anneaux identifié dans le Système solaire, avec un rayon d'environ 1 900 km.

La découverte que les séquelles d'un impact à grande échelle subsistent à la surface de Ganymède est importante en termes de processus de formation et d'évolution du satellite. Par exemple, le satellite Callisto de Jupiter

*Vues de Ganymède par Voyager 2 (à gauche) et Galileo. On reconnaît les terrains clairs et sombres, ces derniers recouverts de sillons. (NASA)*





***Composition : Jupiter et Ganymède sur un champ d'étoiles.***  
*(Tsunehiko Kato, 4D2U Project, NAOJ)*

a à peu près la même taille que Ganymède, mais on pense qu'il n'a pas de structure interne composée de couches différenciées. En revanche, Ganymède serait constitué de couches différenciées composées de roche, de fer et de glace. Une énorme quantité de chaleur est nécessaire pour former ces couches. Il est possible que le violent impact soit à l'origine de cette chaleur.

Cette étude devrait influencer les programmes d'exploration de Ganymède prévus dans les prochaines décennies. Les données d'images des missions Voyager et Galileo

ne fournissent que des vues partielles de la surface du satellite. On espère que les futures explorations pourront confirmer ou tester les résultats de cette étude en menant des investigations détaillées sur les formations multi-anneaux et en déterminant s'il existe ou non d'autres vestiges d'impacts à grande échelle. Il est à espérer que cela permettra de mieux comprendre les origines et l'évolution de Ganymède ainsi que des autres lunes de Jupiter.

La mission JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer) de l'Agence spatiale européenne, qui sera lancée en 2022 et arrivera dans le système de Jupiter en 2029, vise à accroître nos connaissances sur les satellites de Jupiter, dont Ganymède.

## Europe

*Basé sur un communiqué NASA/JPL*

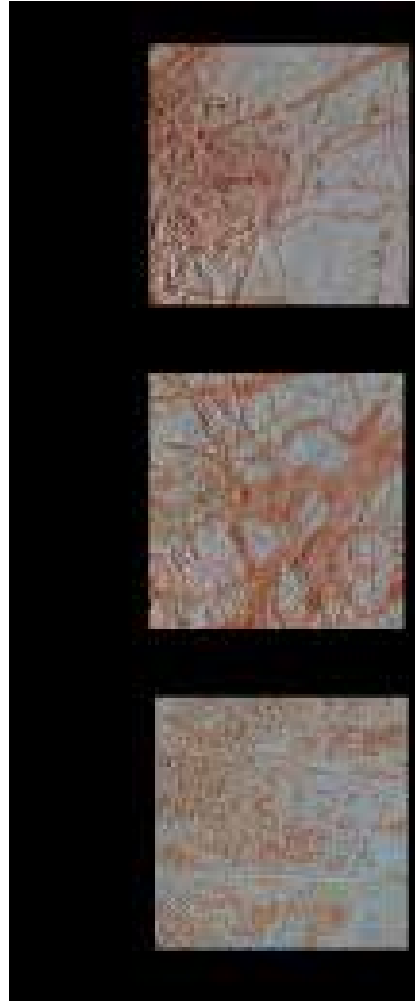
Europe, la plus petite des lunes galiléennes, présente un paysage très varié, avec des crêtes, des bandes, de petits dômes arrondis et des zones perturbées que les géologues qualifient de « terrains de chaos ». Trois images prises par Galileo à la fin des années 1990 ont été soigneusement retraitées et révèlent de nouveaux détails sur les diverses caractéristiques de la surface d'Europe.

Les données de Galileo datent de plus de vingt ans et les scientifiques ont pu utiliser des techniques modernes de traitement d'images pour affiner quelques vues de la surface d'Europe en prévision de l'arrivée de la sonde spatiale Europa Clipper. L'orbiteur de Jupiter qui doit être lancé dans quelques années effectuera des dizaines de survols d'Europe pour en apprendre davantage sur son océan souterrain et sur son interaction avec la surface.

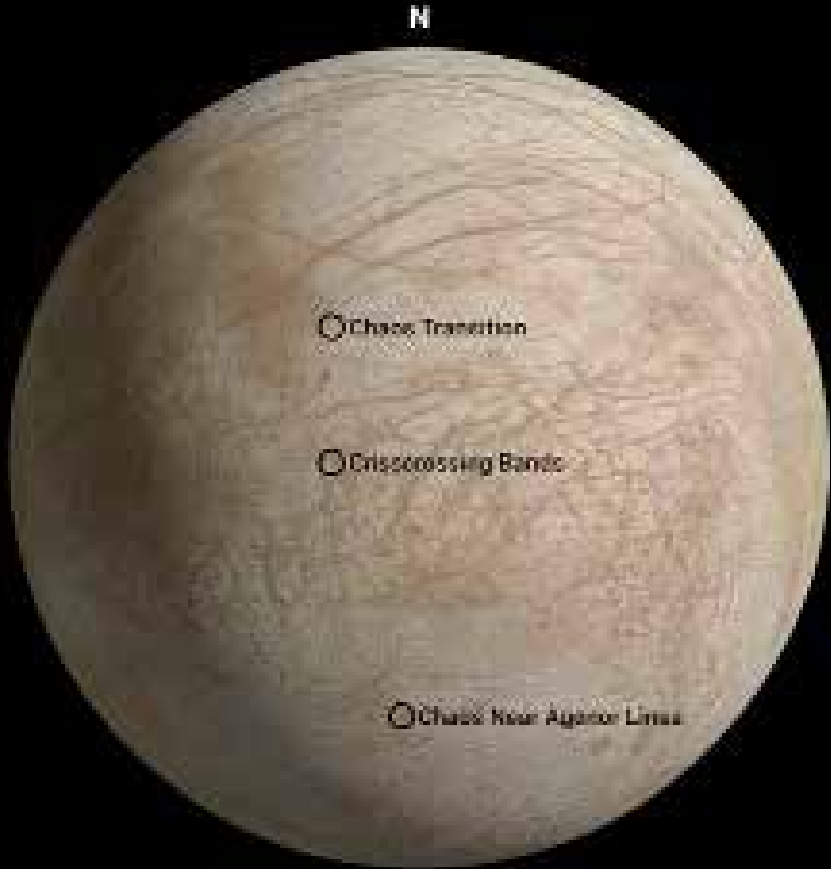
Les trois images retraitées avaient été prises à une même longitude d'Europe correspondant à celle du passage de Galileo le 26 septembre 1998, lors du huitième des onze survols de la lune. Les images haute résolution avaient été obtenues au travers de filtres gris. Des images couleur à plus faible résolution provenant d'un survol différent ont permis de colorier celles à haute résolution au prix d'un processus laborieux.

Les images ainsi améliorées permettent aux scientifiques de mettre en évidence les caractéristiques géologiques et chercher des indices sur la façon dont la surface s'est formée. Elles ne montrent pas Europe telle qu'il apparaîtrait à l'œil humain, mais exagèrent les variations de couleur pour mettre en évidence les différentes compositions chimiques de la surface.

Avec une moyenne d'âge de 40 à 90 millions d'années, la surface que nous voyons aujourd'hui est beaucoup plus jeune qu'Europe lui-même, qui s'est formé en même temps que le Système solaire il y a 4,6 milliards d'années. En fait, Europe possède l'une des surfaces les plus jeunes du Système solaire, l'une de ses nombreuses bizarreries.



On pense que les longues crêtes et bandes linéaires qui sillonnent la surface d'Europe sont liées au comportement de la croûte lorsqu'elle est étirée et triturée par la forte gravité de Jupiter. Les crêtes peuvent se former lorsqu'une fissure de la surface s'ouvre et se referme de manière répétée, formant un relief de généralement quelques centaines de mètres de haut, quelques kilomètres de large, et long de milliers de kilomètres.



En revanche, les bandes sont des endroits où les fissures semblent avoir continué à s'écarter horizontalement.

Les zones chaotiques contiennent des blocs qui se sont déplacés latéralement, ont tourné ou se sont inclinés avant d'être recongelés dans leur nouvel emplacement. Pour comprendre comment ils ont pu se former, les scientifiques étudient ces blocs comme s'ils étaient des pièces d'un puzzle géant.

*Emplacement des trois images de Galilée retraitées, chacune présentant une variété de caractéristiques et capturée lors de son huitième survol d'Europe. (NASA/JPL-Caltech)*



*Cette image, ainsi que les deux suivantes, ont été prises par le vaisseau spatial Galileo de la NASA le 26 septembre 1998, et révèlent des caractéristiques géologiques avec des couleurs différentes, qui sont liées aux compositions chimiques de la surface. Les zones qui apparaissent en bleu clair ou en blanc sont composées de glace d'eau relativement pure, et les zones rougeâtres contiennent davantage de matériaux non glaciaires, comme des sels. Cette image montre une zone de transition entre le terrain de chaos, à gauche, et les plaines sillonnées de crêtes, à droite. Quelques blocs sont visibles sur la gauche comme des*

*matériaux de surface préexistants brisés et retournés; leurs ombres indiquent que certains de ces blocs ont également basculé. Une crête passe au centre de cette image. Ces crêtes, qui contiennent des segments en forme d'arc reliés entre eux par une série de cuspidés, témoignent de la manière dont la croûte gelée d'Europe se fracture lorsqu'elle est soumise aux contraintes de la forte gravité de Jupiter. Le côté droit de l'image montre quelques « lenticules » – de petits dômes arrondis.*

*La résolution est de 230 mètres par pixel et l'image couvre environ 300 kilomètres de large. (NASA/JPL-Caltech/SETI Institute)*



*Cette image montre une région de la surface d'Europe couverte de crêtes et de bandes, avec quelques petites régions de chaos perturbées. On pense que les longues crêtes et bandes linéaires qui sillonnent la surface d'Europe sont liées aux mouvements de la croûte sous l'effet de la forte gravité de Jupiter.*

*On voit à la fois des crêtes et des bandes, qui interagissent entre elles de manière complexe, un peu comme l'activité tectonique sur la Terre. La résolution est d'environ 230 mètres par pixel, et l'image couvre une zone d'environ 285 kilomètres de large. (NASA/JPL-Caltech/SETI Institute)*



*Cette image montre une région de terrain chaotique, où la surface s'est brisée en de nombreux blocs plus petits qui sont entourés d'un matériau matriciel. De nombreux blocs ont été déplacés, retournés ou basculés avant d'être figés dans leur nouvel emplacement. Certains, plus importants, gardent des caractéristiques du terrain préexistant avant sa rupture. En utilisant ces indices, les scientifiques ont pu reconstruire certaines régions de chaos comme des puzzles pour suivre le mouvement des blocs.*

*La bande coupant le bas de l'image, Agenor Linea, est l'une des plus longues d'Europe et elle se distingue par son aspect bicolore, avec une région claire en haut et une région plus sombre en bas.*

*Une autre bande brillante rare, Katreus Linea, traverse la partie supérieure de l'image. La résolution est d'environ 220 mètres par pixel, et l'image couvre environ 280 kilomètres de large.*

*(NASA/JPL-Caltech/SETI Institute)*

## Précipitations sur Mars

*Basé sur un communiqué université du Texas à Austin*

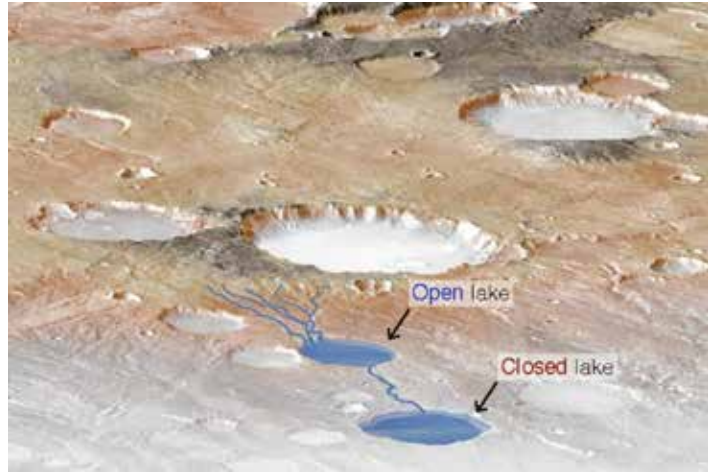
Une nouvelle étude révèle comment se sont remplis les lacs et les vallées de Mars il y a 3,5 à 4 milliards d'années. C'est la première fois que des chercheurs quantifient les précipitations qui ont dû se produire sur la planète. Cette étude paraît alors que le rover Mars 2020 Perseverance est en route vers la Planète rouge où il doit se poser dans un lac asséché.

L'ancien climat de Mars est une énigme pour les scientifiques. Pour les géologues, l'existence de lits de rivières et de paléolithes – d'anciens bassins lacustres – donne l'image d'une planète ayant subi d'importantes précipitations ou la fonte de neiges. Mais les modèles climatiques n'ont pas été capables de reproduire un climat avec de grandes quantités d'eau liquide présentes pendant assez longtemps pour expliquer la géologie observée.

Bien que les scientifiques aient trouvé de grandes quantités d'eau gelée sur Mars, aucune quantité significative d'eau liquide n'existe à l'heure actuelle.

Les chercheurs estiment que les précipitations ont dû atteindre entre 4 et 160 mètres en un seul épisode pour remplir les lacs et, dans certains cas, fournir assez d'eau pour faire déborder et ouvrir une brèche dans les bassins des lacs. Bien que la fourchette soit large, elle peut être utilisée pour aider à choisir parmi les modèles climatiques.

Les scientifiques ont examiné 96 lacs et leurs bassins versants, tous considérés comme s'étant formés il y a entre 3,5 et 4 milliards d'années. Certains lacs, dits ouverts, ont connu un débordement; les lacs fermés, en revanche, sont intacts. À l'aide d'images satellites et de la topographie, les scientifiques ont mesuré la superficie des lacs et de leurs bassins versants, ainsi que le volume des lacs, et ont pris en



*(Gaia Stucky de Quay)*

compte l'évaporation potentielle pour déterminer la quantité d'eau nécessaire pour remplir les lacs.

En examinant les anciens lacs fermés et ouverts, ainsi que les vallées fluviales qui les alimentaient, on a pu déterminer un minimum et un maximum de précipitations. Les lacs fermés donnent un aperçu de la quantité maximale d'eau qui aurait pu tomber en une seule fois sans ouvrir de brèche dans le bassin du lac. Les lacs ouverts montrent la quantité minimale d'eau nécessaire pour recouvrir le bassin du lac, ce qui provoque la rupture d'un côté et la fuite de l'eau.

Dans 13 cas, les chercheurs ont découvert des bassins couplés – contenant un bassin fermé et un bassin ouvert alimentés par les mêmes vallées fluviales – qui témoignent des précipitations maximales et minimales en un seul événement.

Une autre grande inconnue est la durée de l'épisode de pluie ou de fonte des neiges : des jours, des années ou des milliers d'années. C'est le nouvel objectif des chercheurs.

Le rover Mars 2020 Perseverance doit visiter le cratère de Jezero, qui contient l'un des bassins ouverts analysés dans l'étude. Les données qu'il y recueillera pourraient être importantes pour déterminer la quantité d'eau présente sur Mars et trouver des signes de vie passée.