



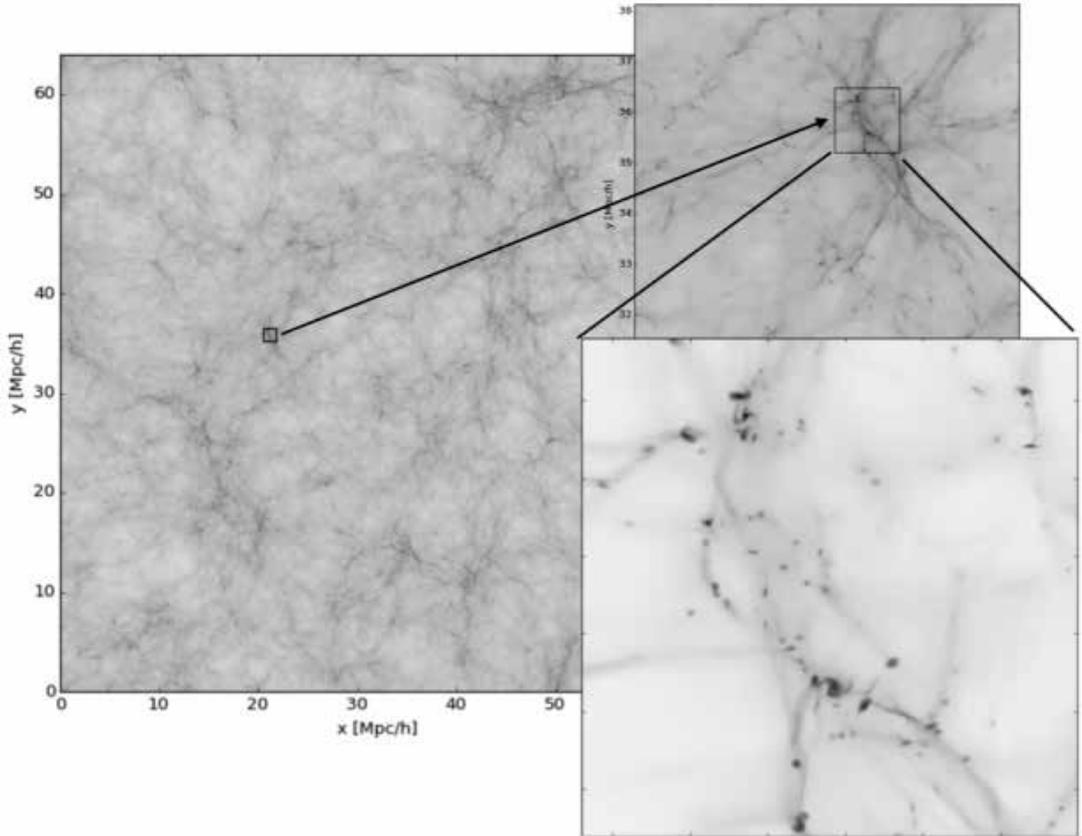
L'astronomie dans le monde

Quand les galaxies s'illuminent...

Basé sur un communiqué CNRS-INSU

Pour la première fois, on a pu prédire l'instant auquel les galaxies ont été éclairées par les toutes premières générations d'étoiles, dans l'Univers très jeune. Cette illumination ne fut pas instantanée car la lumière a dû se frayer un chemin dans un cosmos alors opaque et froid, en arrachant les électrons de la quasi totalité des atomes et le rendre ainsi totalement transparent.

Simulation couvrant 300 millions d'années-lumière et représentant l'état de l'Univers un milliard d'années après le Big Bang. En bleu la distribution du gaz et en rouge les régions de température supérieure à 20 000 kelvins – les dernières à avoir été illuminées. On voit que ce processus de réchauffage et d'illumination n'est pas réparti uniformément, traduisant la distribution complexe des premières étoiles et du gaz. (Dominique Aubert/ObAS)



Les astronomes ont montré que les galaxies actuelles les plus massives (10 à 100 fois plus massives que la Voie lactée) ont été illuminées 300 millions d'années après le Big Bang, tandis que les moins massives (1 000 à 10 000 fois moins massives que la Voie lactée) ont dû attendre bien plus longtemps et n'ont vu cette lumière que 750 millions d'années après le Big Bang.

La raison en est simple : les galaxies les plus massives sont capables de créer leurs étoiles en premier et fabriquent leur propre lumière rapidement. Les galaxies moins massives doivent attendre plus longtemps, le temps qu'elle rassemble les conditions leur permet-

Zoom sur des galaxies créées par la simulation dans la distribution de gaz cosmique 1 milliard d'années après le Big Bang. Dans le panneau en bas à droite, on distingue des disques de galaxies en formation. Environ 20 millions de galaxies sont ainsi formées. (Dominique Aubert, ObAS)

tant de fabriquer leurs étoiles. Les plus petites galaxies sont quant à elles quasiment incapables d'en fabriquer par leurs propres moyens et doivent attendre que l'Univers devienne transparent pour être illuminées de l'extérieur par des galaxies voisines.

Qu'en est-il de notre galaxie, la Voie lactée, et de sa voisine, la galaxie d'Andromède? Ces prédictions montrent que ces deux galaxies se sont allumées séparément entre 400 et 500 millions d'années après le Big Bang, sans s'influencer l'une l'autre, et ce malgré leur très grande proximité. Ceci est d'autant plus remarquable que cette paire de galaxies est proche d'amas de galaxies très massifs, comme l'amas de la Vierge, et donc producteurs de grandes quantités de lumière : malgré cet environnement, ces deux galaxies n'ont semble-t-il pas été submergées par le rayonnement de ces amas puissants.

Pourquoi faut-il s'intéresser à la façon dont les galaxies sont éclairées par la lumière des premières étoiles? Tout simplement parce que cette lumière empêche d'autres étoiles de se former : en réchauffant et en ionisant l'hydrogène, elle rend le gaz moins susceptible de se convertir en étoiles. On a donc un scénario complexe, où les étoiles empêchent d'autres étoiles d'apparaître. Il faut étudier comment ce processus opère pour comprendre les populations stellaires des galaxies actuelles et en particulier les plus anciennes.

Cet ensemble de prédictions est le résultat d'un défi technologique de tout premier ordre. Pour les réaliser, les chercheurs ont produit une simulation numérique cosmologique de l'histoire de l'Univers à ces époques, capable de reproduire l'émergence des premières structures, la dynamique du gaz et la formation des premières étoiles dans un cosmos virtuel sur des distances de 300 millions d'années-lumière.

Un défi particulièrement important fut d'être capable de suivre dans cet Univers simulé la propagation de la lumière. À cause de la vitesse finie de celle-ci, aussi grande soit-elle, les calculs liés à cette physique sont extrêmement longs et exigeants. Afin de les rendre supportables, les chercheurs ont utilisé une nouvelle technologie où ces calculs sont confiés à des cartes graphiques. Ces cartes, habituellement dédiées aux tâches de rendu 3D dans les jeux vidéo par exemple, sont d'excellents outils de calcul pour peu que l'on sache les utiliser. La simulation cosmologique

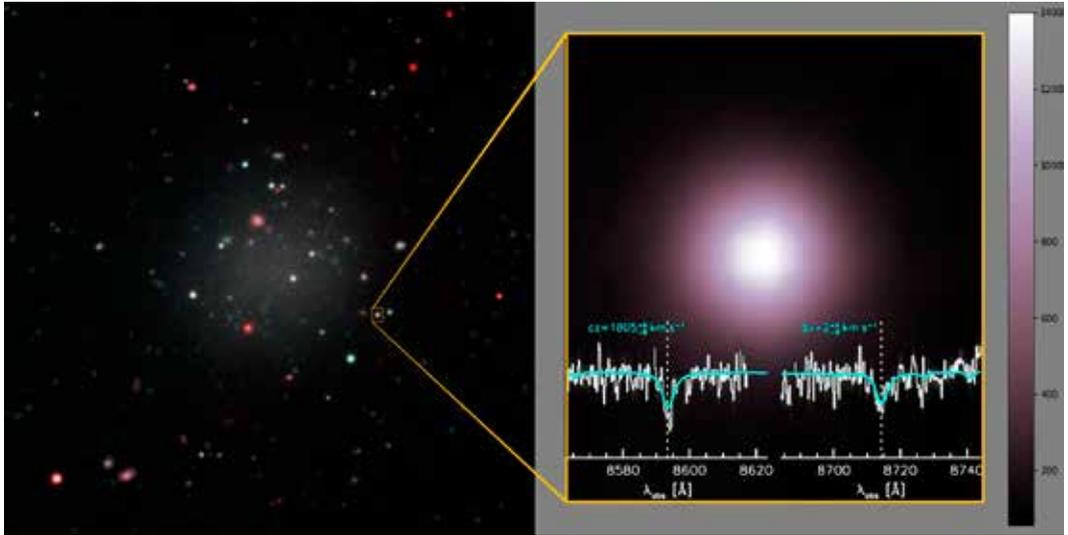
utilisée ici a nécessité 32 768 processeurs de calculs associés à 4 096 cartes graphiques, installés sur le plus grand super-calculateur américain, Titan, à Oak Ridge, USA. Environ 20 millions d'heures de calcul sur ces processeurs ont été nécessaires pour la production de cette simulation au cours du premier trimestre 2017. Le volume de calcul et l'ampleur des ressources utilisées font de cette simulation l'une des plus grandes jamais réalisées pour étudier ces époques reculées.

Une galaxie sans matière sombre

Les astronomes ont été très étonnés de découvrir une galaxie, NGC1052-DF2, presque dépourvue de matière sombre, celle-ci étant normalement la composante principale de toute galaxie qui se respecte. On pense d'ailleurs que les galaxies naissent d'une concentration de matière noire où vient s'agréger du gaz qui finalement donne des étoiles. NGC1052-DF2 remet en question ce scénario sans doute simpliste. C'est une galaxie très étendue mais de faible luminosité. On la classe parmi les « ultra-diffuses », un type de galaxies seulement mis en évidence en 2015 en raison de leur faible éclat. Les galaxies ultra-diffuses se sont révélées assez abondantes mais jusqu'à présent NGC1052-DF2 est la seule à ne pas contenir – ou contenir très peu – de matière sombre.

NGC1052-DF2 a été découverte avec le réseau de télescopes Dragonfly Telephoto Array, un système mis au point spécifiquement pour la recherche de tels objets. Les images obtenues avec le Dragonfly montrent une tache floue alors que celles du survey SDSS (Sloan Digital Sky Survey) donnent un groupe de sources ponctuelles.

Afin d'en apprendre plus sur NGC1052-DF2 les astronomes ont utilisé le spectrographe GMOS (Gemini Multi Object Spectrograph) du télescope Gemini North. Les observations ont permis de cartographier la morphologie de la galaxie et de confirmer qu'elle n'est en interaction avec aucune galaxie voisine.



Des spectres des sources ponctuelles ont été pris avec les spectrographes DEIMOS (Deep Imaging Multi-Object Spectrograph) et LRIS (Low-Resolution Imaging Spectrometer) du télescope Keck, ce qui a permis d'identifier 10 amas globulaires. Les mesures de vitesses radiales indiquent que les amas globulaires se déplacent beaucoup plus lentement que prévu. En fait, leurs vitesses correspondent aux vitesses orbitales si la masse de la galaxie est exactement celle de toutes les étoiles qu'elle contient. S'il y avait de la matière sombre, les amas devraient bouger plus rapidement pour ne pas tomber dans la galaxie.

Ce résultat montre qu'il n'y a pas nécessairement de la matière sombre dans chaque galaxie. Il tend aussi à prouver le concept de matière sombre comme composante indépendante des galaxies.

Les amas globulaires et la structure atypique de NGC1052-DF2 intriguent les astronomes qui se demandent comment cette galaxie qui semble constituée uniquement d'un halo et d'amas globulaires a pu se former.

On a bien quelques pistes mais aucune n'explique bien toutes les caractéristiques de NGC1052-DF2. Comme l'indique son nom, elle réside dans un groupe dominé par la

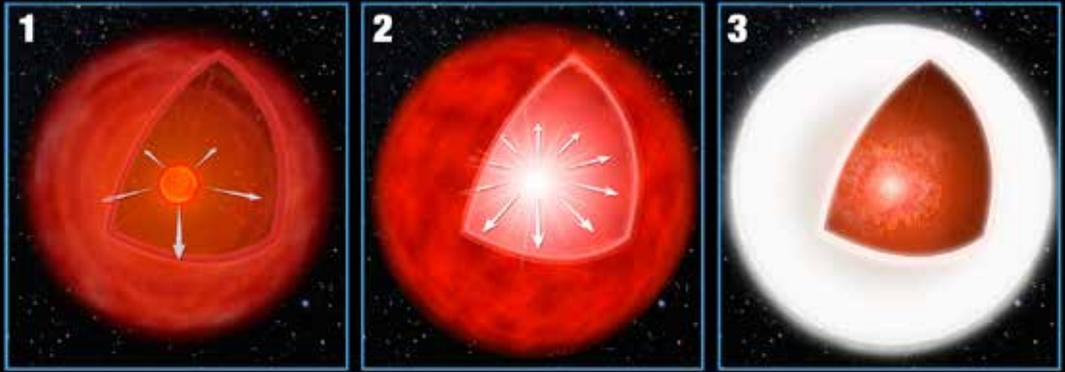
À gauche, image composite de NGC1052-DF2 construite à partir de données du télescope Gemini North à Hawaï.

Le spectre d'un amas globulaire de NGC1052-DF2 montre des raies d'absorption qui permettent de calculer sa vitesse radiale. Ces informations donnent la masse de la galaxie.

(Gemini Observatory / NSF / AURA / W.M. Keck Observatory / Jen Miller / Joy Pollard)

galaxie elliptique massive NGC1052. La formation des galaxies est un phénomène violent et turbulent et la naissance de NGC1052 a pu jouer un rôle dans l'absence de matière sombre de NGC1052-DF2. Un phénomène cataclysmique comme la naissance de nombreuses étoiles massives a pu balayer tout le gaz et la matière sombre.

Les astronomes recherchent maintenant d'autres exemples de galaxies déficientes en matière sombre. L'analyse d'images prises par le télescope spatial Hubble de 23 galaxies diffuses en montre trois qui semblent avoir quelques similitudes avec NGC1052-DF2.



FELTs

On estime qu'une supernova explose chaque seconde dans l'Univers. On n'en détecte qu'une faible proportion car elles ne brillent que quelques semaines et l'on ne surveille pas le ciel profond en permanence. Plus difficiles à capturer sont les FELTs (Fast-Evolving Luminous Transient) qui ne durent quant à eux que quelques jours. Seuls une poignée de FELTs avaient été observés jusqu'à l'entrée en scène du télescope spatial Kepler. Celui-ci surveille continuellement une portion du ciel, prenant une image toutes les 30 minutes. Kepler a pu observer plusieurs FELTs et obtenir des courbes de lumière détaillées.

On a ainsi pu déterminer que les FELTs sont des supernovæ qui profitent pendant un moment d'un supplément d'éclat grâce à leur environnement. Si elles sont entourées d'enveloppes de gaz et de poussière, l'explosion fait briller celles-ci pendant un bref moment.

On peut maintenant ranger au placard les théories plus ou moins exotiques qui avaient été élaborées pour tenter d'expliquer les FELTs.

Les observations par Kepler du cas extrême du FELT KSN 2015K, montrent une

Modèle de FELT (Fast-Evolving Luminous Transient). Une vieille géante rouge perd de la masse par le vent stellaire et crée une énorme enveloppe. Le noyau de l'étoile implose, ce qui génère la supernova. L'onde de choc rencontre l'enveloppe et l'énergie cinétique se dissipe en lumière, un éclat qui dure dix fois moins longtemps qu'une supernova typique.

(NASA, ESA, A. Feild/STScI)

montée de luminosité de seulement 2,2 jours et une durée de 7 jours au-dessus de la moitié de l'éclat maximal. On estime qu'une enveloppe avait été éjectée moins d'un an avant l'explosion. Les FELTs permettent ainsi de décrire les derniers instants de certaines étoiles massives. Elles expulsent des enveloppes de gaz lors d'une série de mini-explosions avant l'explosion finale.

Galaxie relique

La galaxie NGC1277 est située près du centre de l'amas de Persée, un ensemble de plus de 1 000 galaxies à 240 millions d'années-lumière. Elle est quatre fois plus petite que

la Voie lactée mais elle contient le double d'étoiles.

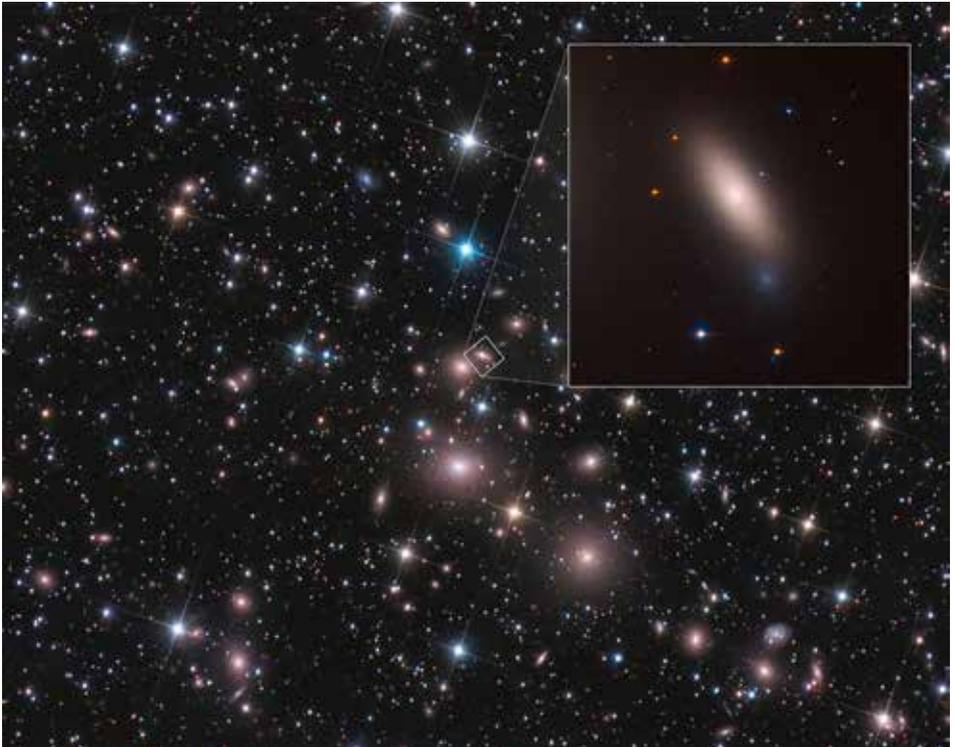
Elle se déplace si vite au travers de l'amas (à 3,2 millions de kilomètres par heure) qu'elle ne parvient pas à fusionner avec d'autres galaxies ni même à capturer du gaz qui lui assurerait de quoi fabriquer de nouvelles étoiles. Au cœur de l'amas, le gaz intergalactique est si chaud qu'il ne peut se condenser en étoiles.

Les observations faites avec le télescope spatial Hubble ont montré qu'elle est une galaxie « relique ». On estime qu'une galaxie sur mille est relique, c'est-à-dire morte et rouge. Elles se sont formées au début de l'Univers et ont formé des étoiles mille fois plus vite que ne le fait actuellement la Voie lactée. Il y a dix milliards d'années, elles ont cessé toute activité, et elles restent calmes depuis. Elles

ne contiennent plus que de vieilles étoiles, ce qui explique leur couleur. Une caractéristique des galaxies reliques est l'absence d'amas globulaires bleuâtres, pauvres en métaux, qui se forment plus tard dans la vie des galaxies lorsqu'elles absorbent d'autres galaxies.

Les galaxies reliques observées jusqu'à présent par Hubble n'étaient que de petites taches rouges lointaines ; NGC1277 est beaucoup plus proche, assez pour pouvoir être étudiée en détail. Elle devrait nous apprendre beaucoup sur l'histoire de l'Univers.

La galaxie relique NGC1277 photographiée avec le télescope spatial Hubble. (NASA, ESA, M. Beasley / Instituto de Astrofísica de Canarias, and P. Kehusmaa)





KIC 8462852

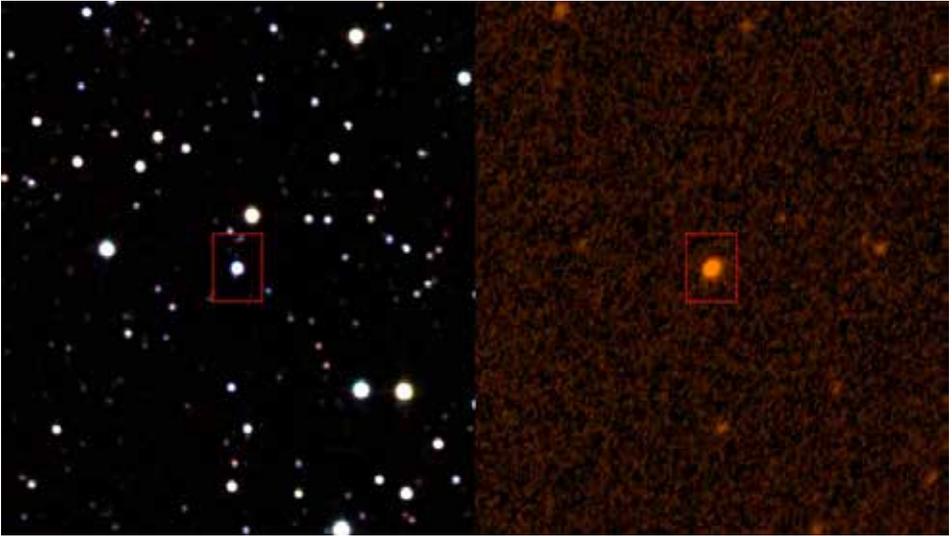
En fouillant parmi les données du télescope spatial Kepler, les membres du projet citoyen Planet Hunters détectèrent le comportement étrange de l'étoile KIC 8462852 : des baisses d'éclat mais contrairement aux transits d'exoplanètes leurs profils étaient irréguliers, une fois simple, une fois complexe. Deux grosses diminutions de flux ont été enregistrées, l'une de 15%, l'autre de 22%. L'ampleur même de ces éclipses exclut d'emblée une planète qui devrait avoir une taille absurde-ment grande : l'étoile étant déjà 50% plus grosse que le Soleil, l'objet doit mesurer son million de kilomètres, voire plus s'il n'est pas totalement opaque.

Que se passe-t-il donc près de KIC 8462852 (étoile dite « de Boyajian » ou « de Tabby »)? L'étoile semble trop vieille pour être encore entourée d'un disque de poussière protoplanétaire. D'ailleurs, le télescope infrarouge IRTF de la NASA n'a pas observé d'émission caractéristique au voisinage immédiat de l'étoile. Le passage d'essaims de comètes, ou des nuages de poussières produits par des collisions d'astéroïdes ou de planètes pourraient obscurcir l'étoile de façon aléatoire.

Vision d'artiste. Les débris d'une énorme comète ayant une période de 700 jours pourraient expliquer les chutes d'éclat de l'étoile de Tabby. (NASA/JPL-Caltech)

L'absence d'émission infrarouge notée par les télescopes spatiaux WISE et Spitzer semblait écarter un scénario de collisions qui produiraient des poussières chaudes.

On s'est tourné vers des solutions plus exotiques. Parmi les possibilités envisagées, on a même évoqué les traces d'une civilisation extraterrestre avancée qui aurait édifié une mégastructure du genre sphère de Dyson incomplète (ou délabrée). L'institution SETI a utilisé le réseau Allen de radiotélescopes pour rechercher de possibles émissions par une intelligence extraterrestre. En vain. Une étude a proposé toute une série de causes internes (activité magnétique, rotation différentielle, convection, ...) qui peuvent conduire à un blocage du flux photosphérique. D'autres options impliquaient les anneaux d'une grosse planète et/ou un essaim associé d'astéroïdes troyens.



L'étoile KIC 8462852 vue en infrarouge par le survey 2MASS et en ultraviolet par GALEX. (NASA/STScI/IPAC)

L'intérêt pour ce mystère était tel que de nombreux observatoires se sont attaqués à son étude, en particulier le réseau de l'observatoire de Las Cumbres – une organisation rassemblant 21 télescopes sur 8 sites autour du globe.

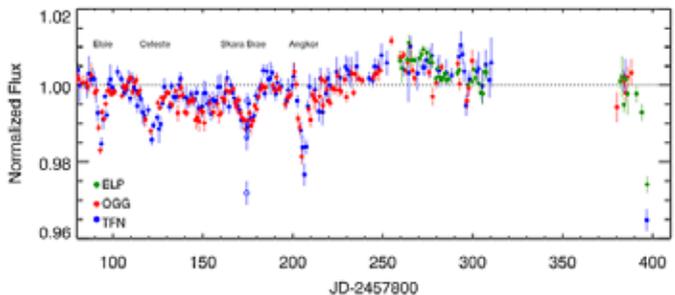
Des observations réalisées à partir de mars 2016 ont montré plusieurs épisodes d'obscurcissement, le dernier démarrant le 16 mars. L'objet a aussi été étudié par les télescopes spatiaux Spitzer (infrarouge) et Swift (ultraviolet) ainsi que par le télescope public de 68 centimètres d'AstroLAB IRIS à Zillebeke.

Il est apparu que le spectre des éclipses n'est pas neutre : l'extinction dépend de la longueur d'onde. Ce n'est donc pas un objet opaque qui bloque

une partie de la lumière, mais quelque chose de transparent, probablement des nuages de fines poussières, ce qui remet à l'ordre du jour l'hypothèse de débris de comètes.

Les partisans de la mégastructure alien sont loin d'être convaincus, bien sûr. Les petits hommes verts pourraient très bien avoir mis au point une mégastructure filtrant la lumière de façon particulière.

Variations d'éclat de l'étoile de Tabby. (NASA/JPL-Caltech)



La galaxie d'Andromède

*Basé sur un communiqué CNRS/
Observatoire de Paris*

La galaxie spirale Andromède s'est structurée il y a moins de trois milliards d'années à la suite d'une collision majeure entre deux galaxies. C'est la conclusion rapportée par une étude adossée à des moyens de calculs informatiques sans précédent.

La grande nébuleuse d'Andromède a été décrite pour la première fois en 964, par l'astronome perse Abd al-Rahman al-Soufi. Répertoiree en 1923 comme galaxie, elle a souvent été considérée comme la sœur jumelle de notre Voie lactée. C'est sa plus proche voisine et cette proximité permet l'observation comparée de ses propriétés qui, jusqu'à aujourd'hui, intriguaient les astrophysiciens.

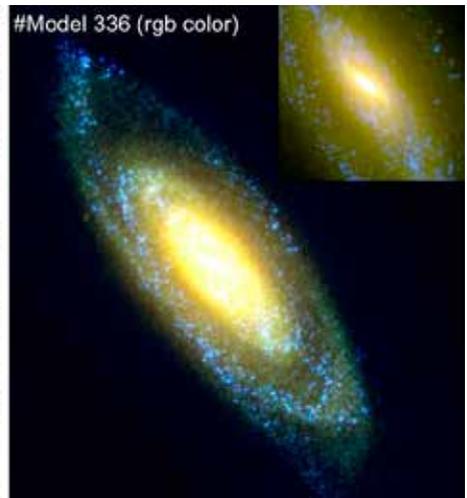
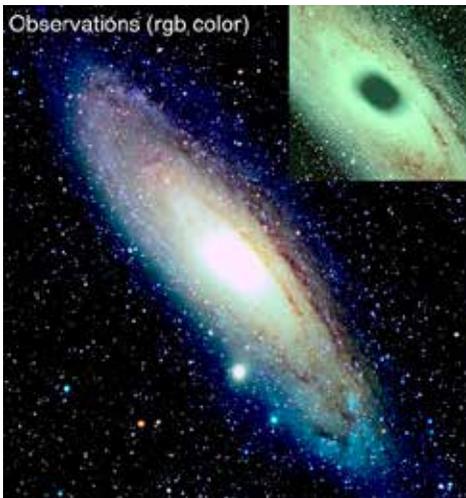
Une campagne d'observation américaine, menée entre 2006 et 2014, avait en effet souligné une différence considérable avec la Voie lactée : dans le disque géant d'Andromède, toutes les étoiles âgées de plus de deux milliards d'années subissent des mouvements désordonnés dont l'ampleur est presque comparable à leur mouvement de rotation autour du centre de cette galaxie. À titre comparatif, les étoiles du disque de la Voie lactée, dont fait partie le Soleil, ne sont sujettes qu'à un simple

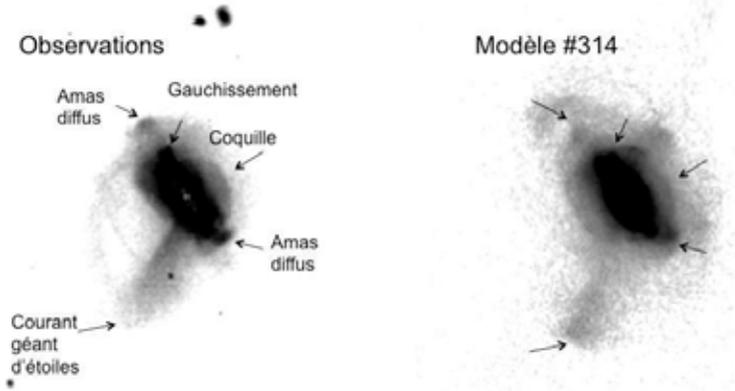
mouvement de rotation. Comment expliquer cette différence ? À l'aide de modélisations effectuées sur les ordinateurs les plus puissants disponibles en France et après traitement de près d'un téraoctet de données, les scientifiques sont parvenus à caractériser les mécanismes physiques de formation d'Andromède, levant ainsi le voile sur l'origine de sa formation. Ils ont démontré que seule une collision « récente » pouvait expliquer l'agitation des étoiles, collision suivie par un épisode de formation stellaire dans l'ensemble du disque géant d'Andromède. Il y a 7 à 10 milliards d'années, à la place d'Andromède, se trouvaient deux galaxies sur une trajectoire de ren-

Vues comparées en vraies couleurs de la galaxie d'Andromède, M31, dont le disque très incliné s'étend sur environ 40 kpc.

À gauche, M31 observée en couleurs réelles. À droite, simulation numérique à 24 millions de particules. L'insert, en haut et à droite de chaque image, montre que la simulation parvient aussi à reproduire la barre de la galaxie (noire dans l'insert gauche, jaune dans celui de droite), ainsi que les régions de formation stellaire (bleues) qui appartiennent au disque d'Andromède.

(Obs. de Paris - PSL / Hammer et al. 2016 / R. Crisp)





contre. Les astronomes ont découvert qu'elles avaient fusionné il y a 1,8 à 3 milliards d'années. Cette collision a donné naissance à Andromède telle que nous la connaissons. La plus grande des deux galaxies était environ quatre fois plus massive que la plus petite.

Grâce à ces calculs numériques intensifs, les astrophysiciens parviennent pour la première fois à reproduire en détail l'ensemble des nombreuses structures qui composent la galaxie d'Andromède : le bulbe, la barre et le disque géant. Ce dernier inclut un gigantesque anneau d'étoiles jeunes dont la stabilité dans le temps restait inexplicée.

La galaxie d'Andromède est entourée de gaz et d'étoiles peuplant une région dix fois plus étendue qu'elle, communément appelée le halo. Des observations réalisées entre 2008 et 2014 avec le télescope franco-canadien à Hawaïi (CFHT) montrent que le halo d'Andromède est parcouru de gigantesques courants d'étoiles, dont celui prédominant du « courant géant d'étoiles ». Le disque géant présente des bords déformés, sur lesquels on retrouve également d'autres structures ayant la forme d'amas diffus ou de coquilles.

En faisant une comparaison systématique avec ces observations qui sont les plus profondes du halo d'Andromède, l'équipe est parvenue à reproduire et à comprendre l'origine de ces structures. Le courant géant ainsi que les coquilles proviennent du plus

À gauche, vue détaillée des observations profondes ; à droite, la simulation opérée à l'aide de puissants calculateurs parvient à reproduire les observations et à en expliquer l'origine.

(Obs. de Paris - PSL, Hammer et al. 2016)

petit progéniteur, tandis que les amas diffus et la déformation du disque proviennent du plus grand. Cela explique pourquoi les premières structures sont sous-abondantes en éléments lourds par rapport aux secondes : le plus petit progéniteur étant moins massif, il a formé moins d'éléments lourds et d'étoiles que le plus grand.

C'est la toute première fois qu'une simulation numérique, basée sur 24 millions de particules, parvient à reproduire une galaxie avec autant de détails. La collision gigantesque qui a eu lieu alors que notre planète existait déjà pourrait avoir laissé des traces dans notre environnement, le Groupe local de galaxies. Elle est le seul moyen d'expliquer comment se sont formés le bulbe, la barre, les disques minces et épais, l'anneau stable de jeunes étoiles dans le disque, le récent événement de formation stellaire dans tout le disque, la structure 3D du courant géant d'étoiles, les coquilles et amas diffus, ainsi que la distribution des étoiles dans le halo.

Micrométéorites ultra-carbonées

Basé sur un communiqué CNRS

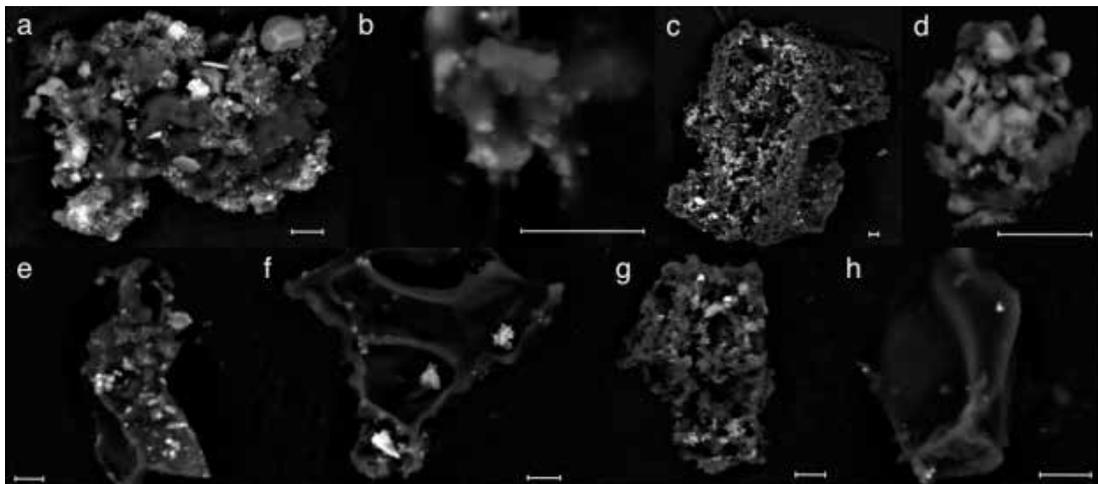
Une équipe interdisciplinaire de chercheurs a procédé à la première étude systématique en laboratoire de la matière organique provenant de poussières interplanétaires exceptionnelles, les micrométéorites ultra-carbonées (Ultra-Carbonaceous MicroMeteorites, UCAMMs).

Les poussières interplanétaires parcourent le Système solaire et représentent le principal flux de matière extraterrestre sur notre planète, sous forme de micrométéorites de taille allant jusqu'à quelques centaines de microns. Des micrométéorites ultra-carbonées ont été collectées dans la neige du continent antarctique à proximité de la Station Concordia. Les UCAMMs ne représentent qu'une faible fraction du flux de micrométéorites mais elles contiennent des proportions très élevées de matière organique dont les caractéristiques diffèrent de celles de la matière organique présente dans les autres matériaux extraterrestres.

Les auteurs ont procédé à la première étude systématique de huit UCAMMs en utilisant des techniques de micro-spectroscopie

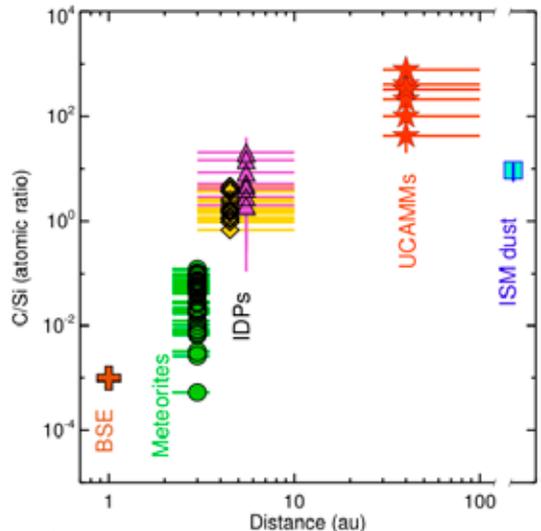
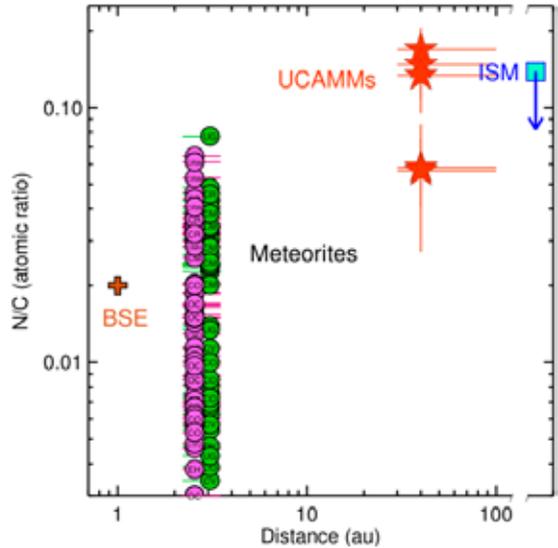
infrarouge sur synchrotron (μ -FTIR), de spectrométrie Raman visible et d'analyse par microsonde électronique. Les résultats révèlent un composant organique dont le rapport entre les liaisons CH de type aliphatique et aromatique C=C est faible. La teneur en azote de la matière organique est très supérieure à celle observée dans la matière organique extraite des météorites ou des poussières interplanétaires classiques alors que la teneur en oxygène s'avère inférieure. Les spectres μ -FTIR sont compatibles avec la présence de groupements fonctionnels de type cétone ou aldéhyde et certains spectres IR et Raman montrent la signature de liaisons de type nitrile. Les spectres sont compatibles avec la présence de liaisons C-N dans un réseau carboné différent de celui observé dans la matière organique extraite des météorites. Enfin, le rapport carbone sur silicium des UCAMMs s'avère très supérieur à celui de la matière extraterrestre analysée à ce jour (météorite, poussières interplanétaires).

Image électronique à 15kV des fragments de micrométéorites UCAMMs analysés dans cette étude. Les barres d'échelle correspondent à 5 μ m pour chaque image. (CNRS-INSU)



L'ensemble de ces résultats indique que les processus physico-chimiques à l'origine de la formation de la matière organique des UCAMMs ont eu lieu dans un environnement froid et riche en azote, soumis à un rayonnement énergétique (photons, rayons cosmiques). De telles conditions sont réunies à la surface des petits corps glacés situés dans le Système solaire externe. Les rapports d'abondance de C/Si et N/C dans les UCAMMs analysées dans ce travail sont les plus élevés observés dans le Système solaire. Ils confirment la possibilité d'un gradient des rapports d'abondances élémentaires d'éléments majeurs dans les phases solides du disque protoplanétaire qui entourait le jeune Soleil.

Les UCAMMs ouvrent la possibilité d'obtenir de nouvelles connaissances sur la composition de la surface des petits objets glacés les plus éloignés de notre étoile et participent à une meilleure compréhension de l'origine de la matière organique interplanétaire.



Rapport des abondances atomiques de l'azote au carbone (en haut) et du carbone au silicium (en bas) dans les UCAMMs et dans d'autres corps solides en fonction de la distance au Soleil.
(CNRS-INSU)

Mars poussiéreuse

Deux images de Mars prises à près de dix ans d'intervalle montrent comment la poussière efface toutes traces sur le sol. Ces photos ont été obtenues par la caméra à haute résolution HiRISE du satellite MRO (Mars reconnaissance Orbiter) le 20 juillet 2008 et le 21 décembre 2017. Elles couvrent une région de 300 mètres de côté autour du site où atterrit la sonde Phœnix le 25 mai 2008. Toutes deux bénéficiaient des mêmes conditions d'éclairement à cinq années martiennes d'écart dans l'été boréal.

L'atterrisseur (lander) est tout en haut. Il se voit très bien sur la première image mais est pratiquement invisible, enfoui dans le sable sur la seconde. La grosse tache noire de droite marquant l'impact du bouclier thermique est invisible dans la seconde photo. Le parachute et la coque arrière de la sonde (au bas des images) sont aussi recouverts de poussière. Le parachute, devenu difficilement discernable, s'est légèrement déplacé vers l'ouest, entraîné par les vents.

Rappelons que Phœnix avait effectué sa mission nominale de trois mois et avait pu la prolonger de deux avant d'être mis hors service par l'hiver martien.



Climat, la tendance continue

Si l'année 2017 n'est pas la plus chaude jamais enregistrée, il s'en faut de peu. Elle n'est que la deuxième, devancée seulement par 2016 depuis le début des enregistrements en 1880.

Poursuivant la tendance à long terme du climat, la température moyenne globale de 2017 a été plus élevée de 0,9 degré que la moyenne de la période 1951-1980 selon les scientifiques de l'institut GISS (Goddard Institute for Space Studies) de la NASA à New York. Une analyse indépendante faite par l'agence NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) donne 2017 en troisième position, les légères différences provenant des méthodes utilisées. Les deux études sont en très bon accord et montrent que les cinq années les plus chaudes ont eu lieu depuis 2010.

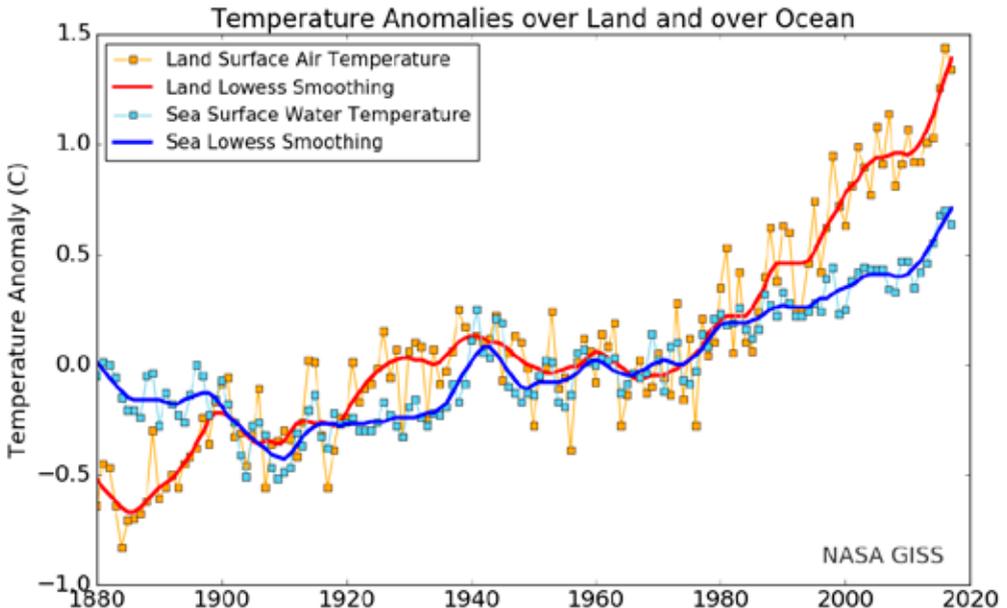
Il est difficile de comparer des mesures faites sur une aussi longue période. Les instruments de mesures changent ainsi que les stations où l'on collecte les données. Les procédures d'analyse se modifient. Malgré

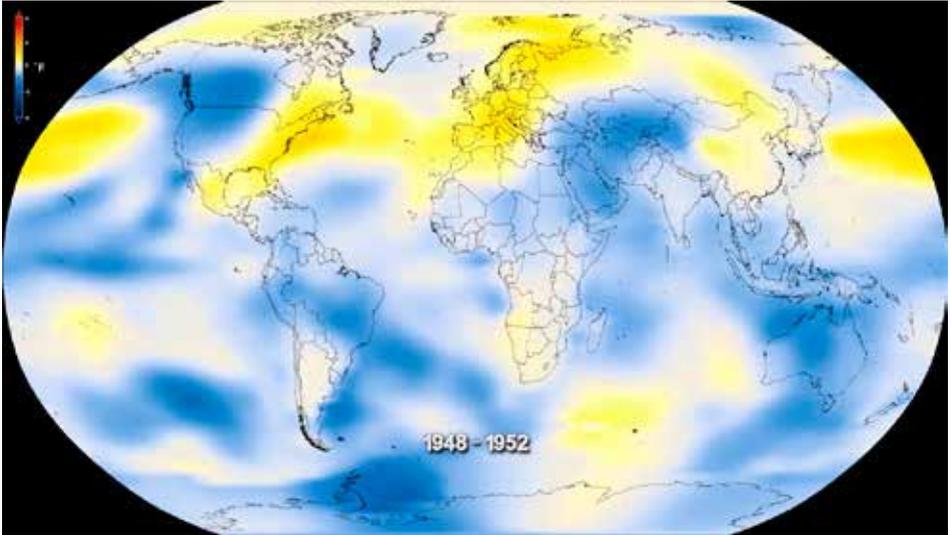
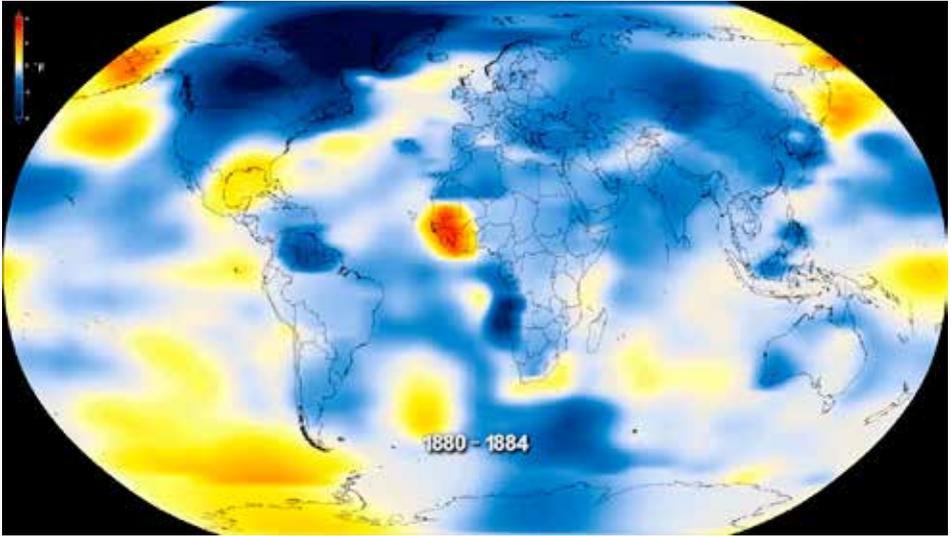
cela, les scientifiques estiment que le résultat global de 2017 est correct à 0,06 degré près et donnent un niveau de confiance de 95%.

Durant le dernier siècle la température moyenne du globe s'est élevée de plus d'un degré, principalement à cause des émissions de gaz carbonique et des autres rejets dus aux activités humaines.

Les phénomènes d'El Niño et de La Niña réchauffent ou refroidissent les couches supérieures de l'Océan Pacifique dans les tropiques, changent les vents et modifient la météo. Ils apportent ainsi des variations à court terme de la température moyenne du globe. El Niño fut actif en 2015 et au début de 2016. En 2017, au contraire, c'est La Niña qui s'est manifestée dans les derniers mois. Malgré cela les températures de 2017 se sont situées entre celles de 2015 et 2016.

Évolution de l'anomalie annuelle de température des terres et des mers (non gelées) depuis 1880. (NASA/GISS)

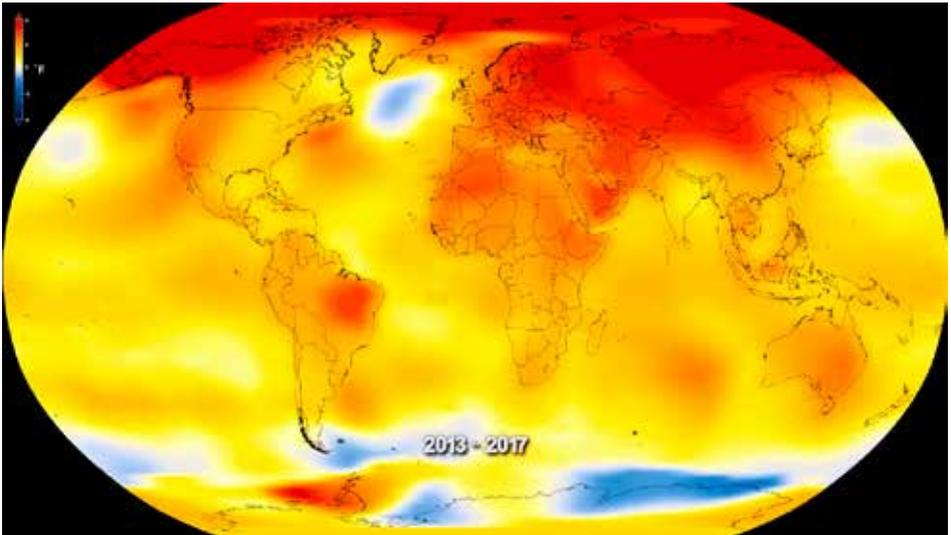
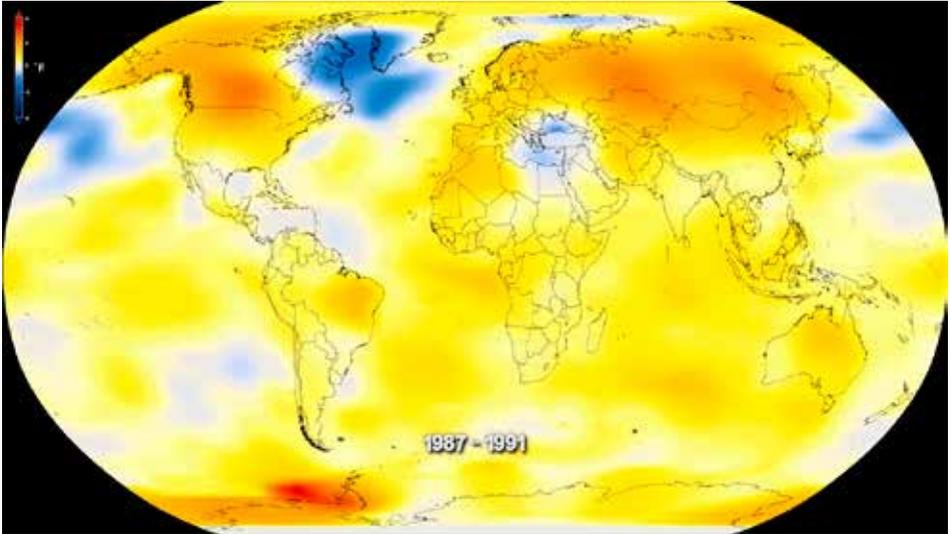




En soustrayant statistiquement les effets des récents épisodes de Niño et Niña, 2017 s'établirait comme l'année la plus chaude de toutes.

Des effets locaux sont à l'œuvre. Le réchauffement est le plus important dans les régions arctiques.

Les mesures utilisées par la NASA proviennent de 6 300 stations météorologiques, d'observations faites en mer par des navires ou des bouées ainsi que de stations de recherches antarctiques. Les algorithmes utilisés tiennent compte de la répartition spatiale des stations et de l'effet des agglomérations.



Ci-dessus, et à la page précédente, cartes montrant la répartition de l'excès de température par rapport à la période 1951-1980 selon l'analyse du Goddard Institute for Space Studies. Les valeurs positives sont en jaune, orange et rouge. Chaque carte correspond à une moyenne sur quatre années. (NASA's Scientific Visualization Studio)

L'idée d'un réchauffement anthropique global n'est pas neuve. Le phénomène a été évoqué à plusieurs reprises dans *Le Ciel* au cours des dernières décennies, et souvent dans des termes analogues, les records de température se succédant inlassablement.

Dans notre bulletin de février 2002 (*Le Ciel* vol. 64, 46) reprenant un article de l'Agence Spatiale Européenne, on pouvait lire :

Les scientifiques s'accordent pour dire que la température moyenne du globe a augmenté d'un demi-degré centigrade par rapport au siècle précédent, que la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est en hausse depuis deux siècles et que le dioxyde de carbone est le gaz à effet de serre influant le plus sur le réchauffement de la planète. En outre, il est généralement reconnu que les années 1990 ont été la décennie la plus chaude et 1999 l'année la plus chaude depuis 1861, année où l'on a commencé à enregistrer les températures.

Prudente, l'ESA ajoutait :

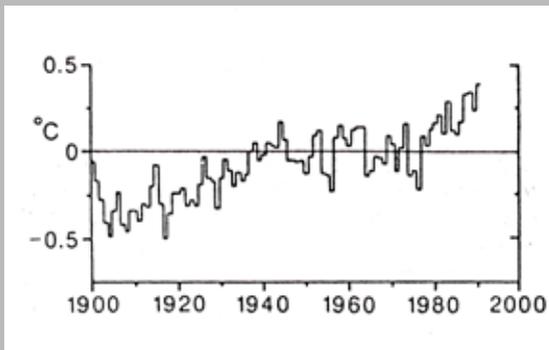
Toutefois, malgré les apparences, la communauté scientifique n'est pas en mesure de déclarer si le réchauffement est dû principalement aux émissions de CO₂, s'il va se poursuivre et, le cas échéant, s'il est réellement nocif.

Onze ans plus tôt, dans le bulletin de février 1991 (*Le Ciel*, vol. 53, 70) nous écrivions :

1990, l'année la plus chaude

L'Office Météorologique de Grande-Bretagne et l'université d'East Anglia étudient l'évolution de la température moyenne du globe depuis le début du siècle. Pour ce faire, ils se basent sur des données obtenues à la fois depuis des stations terrestres, comme depuis des navires. Comme le montre la figure, les résultats sont clairs et ne laissent guère de doute quant à l'échauffement progressif de la surface de notre planète.

L'année 1990 est la plus chaude jamais enregistrée, dépassant 1988, l'ancien record, de 0,05°C. Qui plus est, les six années les plus chaudes sont toutes dans la dernière décennie. Bien que ces variations semblent faibles, elles sont pourtant d'une grande importance pour notre planète, et la persistance du phénomène, ou son amplification, auraient des conséquences dramatiques.



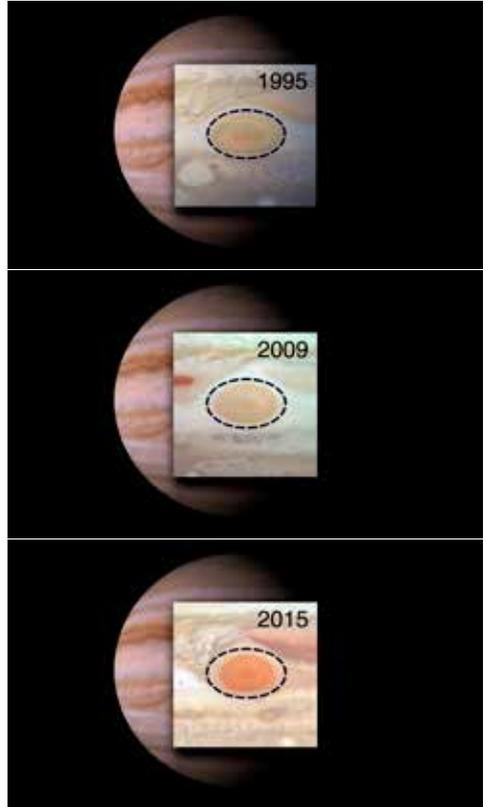
Jupiter

La Grande Tache rouge de Jupiter montre un comportement plus capricieux qu'on ne le pensait. Sa taille diminue depuis plus d'un siècle et ses variations ont été suivies régulièrement depuis le survol des sondes Voyager en 1979 [cf *Le Ciel*, 80 (2018) 72]. Les scientifiques de la NASA ont combiné les observations faites par le télescope spatial Hubble et diverses sondes avec celles faites au sol depuis le 19^e siècle. Ils ont trouvé que l'évolution n'a pas été continue. Tantôt la tache rétrécissait, tantôt elle gagnait en surface, comme dans les années 1920. Il semble aussi que lorsque la tache diminue, sa hauteur augmente.

La Grande Tache rouge reste confinée à la même latitude par deux jet streams et elle se déplace moins vite que la rotation générale de la planète. Ce décalage vers l'ouest n'est pas régulier. Il s'est fortement accéléré récemment.

Les astronomes pensaient que lorsque le tourbillon de la Grande Tache rouge se contractait, la vitesse des vents augmentait,

Variations de taille et de teinte de la Grande Tache rouge de Jupiter. Actuellement elle est à peine plus large que notre planète. (NASA)



selon l'image classique de la patineuse qui tourne bras écartés, puis les resserre. Au lieu de cela ils ont constaté que le cyclone gagnait en hauteur.

En même temps la couleur de la Grande Tache rouge change. Depuis 2014 elle est de plus en plus orangée. Peut-être est-ce dû au rayonnement ultraviolet qui est plus intense en altitude et qui interagit plus fortement avec les composés chimiques de l'atmosphère.

On ne sait pas l'avenir de la Grande Tache rouge mais, si la tendance actuelle se poursuit, la prochaine décennie promet d'être intéressante.

Pas d'océan caché dans le noyau terrestre !

Basé sur un communiqué CNRS-INSU

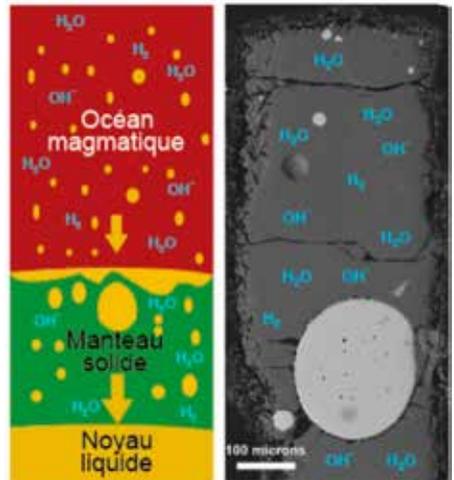
Les planètes telluriques, telles que la Terre et Mars, sont « différenciées » : elles possèdent en leur centre un noyau métallique composé essentiellement de fer. Il est entouré d'un manteau rocheux (silicaté). Ce noyau s'est formé dans les premiers millions d'années de l'accrétion planétaire, lorsque ces planètes étaient encore très chaudes et couvertes par un océan magmatique de plusieurs centaines de kilomètres de profondeur. Dans cet océan magmatique les particules de métal plus denses ont migré pour former le noyau. Au cours de sa descente, le métal s'est équilibré avec les silicates liquides et a incorporé un certain nombre d'éléments légers, tels que l'oxygène, le silicium, le soufre et, peut-être, l'hydrogène.

Des chercheurs ont étudié le comportement de l'hydrogène, et notamment mesuré son partage entre l'alliage métallique riche en fer et le silicate, en recréant en laboratoire les conditions ayant régné lors de la formation du noyau terrestre (haute pression, haute température et quantités raisonnables d'eau) à l'aide d'une presse « multi-enclume ». Il s'avère que l'hydrogène se comporte comme un élément lithophile (il préfère rester dans la partie silicatée) et que seule une quantité infime d'hydrogène intègre le noyau des planètes tel-

luriques lors de la ségrégation noyau-manteau, un comportement qui favorise la formation précoce d'un manteau et d'une atmosphère riches en eau.

La nouvelle étude a été réalisée avec des teneurs en H₂O bien plus représentatives de la formation des noyaux planétaires que les études antérieures, et pour des alliages de fer contenant les éléments légers importants dans les noyaux planétaires.

En se basant sur les teneurs en hydrogène les plus élevées des matériaux météoritiques ayant participé à l'accrétion terrestre, cette étude conclut que la concentration en hydrogène dans le noyau doit être inférieure à 70 ppm. De ce fait, le manteau contient l'essentiel de l'hydrogène disponible après la ségrégation du noyau. Cet hydrogène est alors inclus dans le magma et peut éventuellement être relâché en surface pour la formation d'une atmosphère riche en H₂ ou H₂O.



A droite, image de microscopie électronique à balayage montrant un échantillon préparé à 5 GPa et 2 000 °C. L'hydrogène intègre préférentiellement le silicate (matrice grise) lors de la mise en équilibre avec le métal (billes claires).

Orion

Basé sur un communiqué ESO

De nouvelles données acquises par le Réseau ALMA, le radiotélescope de 30 mètres de l'IRAM et le VLT ont permis de générer une mosaïque montrant les filaments de gaz dans la nébuleuse d'Orion. L'ensemble d'étoiles brillantes de couleur bleuâtre situées en haut de l'image forment l'amas du Trapèze. Ce sont des étoiles chaudes et jeunes, âgées de quelques millions d'années seulement.

Les structures filiformes qui parsèment l'image sont de longs filaments de gaz froid, visibles seulement au travers de télescopes opérant dans le domaine millimétrique. Ils sont invisibles à l'œil nu ainsi qu'aux longueurs d'onde infrarouges. ALMA est l'un des rares instruments au moyen desquels les astronomes peuvent les étudier. Ce gaz donne naissance à de nouvelles étoiles en s'effondrant progressivement sous l'effet de son propre poids.

Les scientifiques ont utilisé ALMA afin de détecter la signature du diazénylium (N_2H^+) présent dans ces structures. Cette étude a permis à l'équipe d'identifier un réseau de 55 filaments.

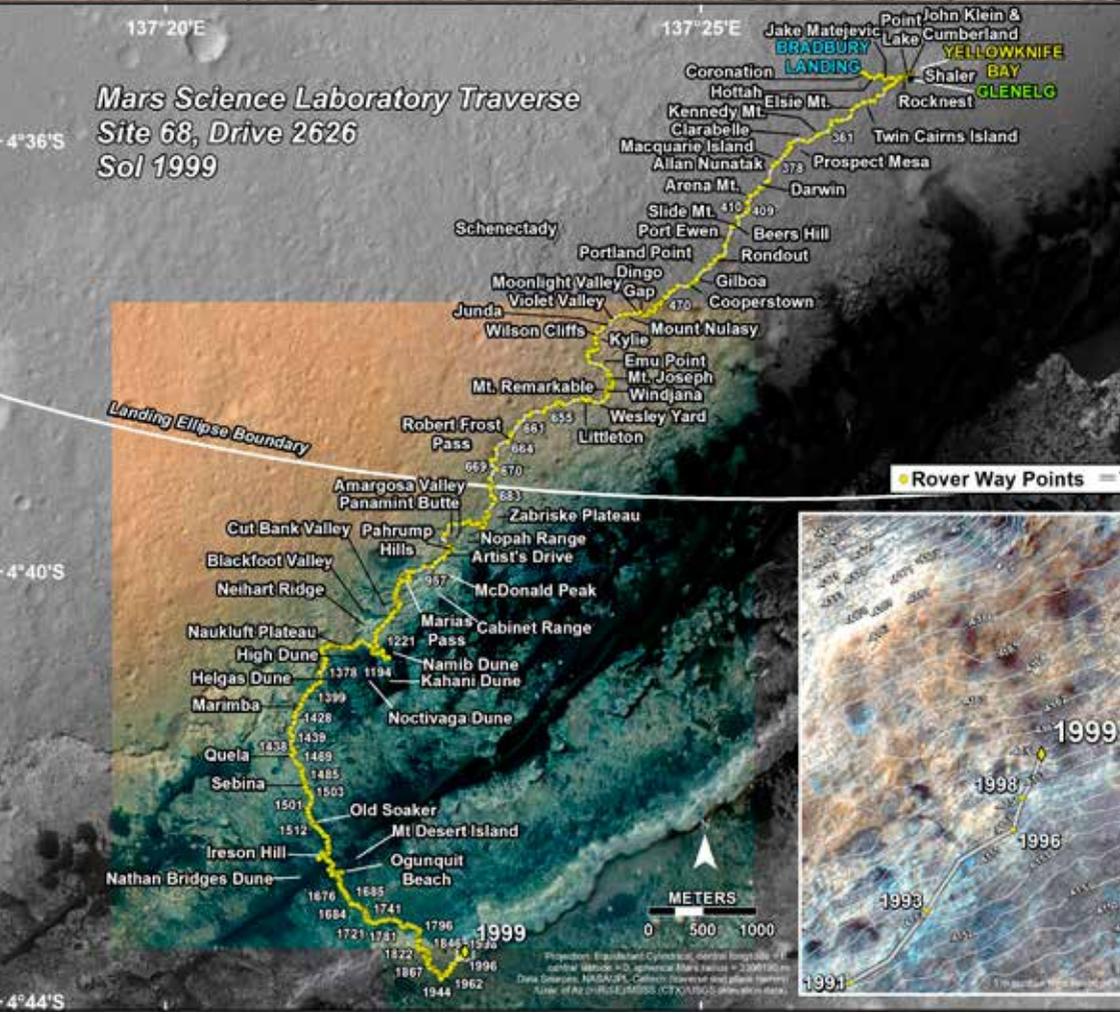
La nébuleuse d'Orion est la région de formation d'étoiles massives la plus proche de la Terre. Elle constitue donc une cible particulièrement intéressante pour les astronomes cherchant à mieux comprendre la formation ainsi que l'évolution des étoiles lors de leurs premiers millions d'années d'existence.

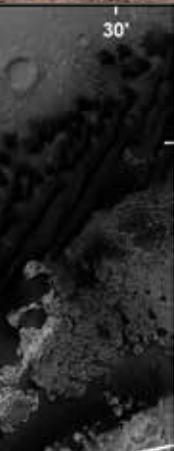
La composante millimétrique de cette image résulte de la combinaison de 296 ensembles de données distincts, acquis par les télescopes ALMA et IRAM. À ce titre, elle constitue, en termes de résolution spatiale, l'une des plus grandes mosaïques d'une région de formation stellaire créée à ce jour dans le domaine millimétrique.

Les premières mosaïques d'Orion à des longueurs d'onde millimétriques utilisaient des radiotélescopes dotés d'une seule antenne, comme APEX. Les nouvelles observations effectuées au moyen d'ALMA et d'IRAM utilisent des techniques d'interférométrie qui combinent les signaux issus d'antennes multiples et distantes afin de créer des images beaucoup plus détaillées.

Mosaïque d'une partie de la nébuleuse d'Orion dans les domaines millimétrique et visible. (ESO/H. Drass/ALMA, NAOJ/NRAO/A. Hacar)







Traverse



Ci-dessus, une mosaïque prise par Curiosity vers le sommet du Mont Hill qu'il est occupé à gravir depuis 2014. La zone délimitée en blanc contient des roches argileuses que les scientifiques comptent bien explorer car elles pourraient apporter des informations sur le rôle de l'eau dans l'origine de la montagne. L'image a été assemblée à partir de dizaines d'images obtenues lors de Sol 1931 avec la caméra (Mastcam). (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

À gauche, le trajet suivi par Curiosity jusqu'à Sol 1999. Il est dessiné sur une carte obtenue par la caméra HiRISE du satellite MRO (Mars Reconnaissance Orbiter). (NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona)

Curiosity

Le rover martien Curiosity a passé le cap des 2 000 jours martiens (« sols »). L'image ci-dessus, prise en janvier, donne un aperçu de ce qui l'attend. Au centre de l'image figure la cible prioritaire de Curiosity, une zone déjà étudiée depuis l'espace et qui contient des roches argileuses. On sait que la formation des argiles demande de l'eau. Les scientifiques ont pu déterminer que les terrains du bas du Mont Sharp se sont formés dans les anciens lacs du cratère Gale. L'étude des zones plus élevées sera précieuse pour mieux évaluer la présence de l'eau, si elle a persisté longtemps et si elle a permis un environnement propice à la vie.

En vue de cette étude et d'autres à venir, une nouvelle procédure de forage a été mise au point.

Depuis son atterrissage en août 2012, Curiosity a parcouru près de 19 kilomètres. Il a mis en évidence un ancien lac d'eau douce qui a pu offrir tous les ingrédients de base indispensables à la vie microbienne. L'examen des roches sur un dénivelé de plus de 200 mètres a conduit les scientifiques à conclure que les conditions d'habitabilité ont persisté durant des millions d'années.

WASP-39b

Les observations faites par les télescopes spatiaux Hubble et Spitzer ainsi que le VLT de l'ESO ont été combinées pour étudier l'atmosphère de l'exoplanète chaude WASP-39b. Il s'agit là de l'analyse la plus complète jamais réalisée d'une atmosphère « exoplanétaire ». La composition qui a été trouvée suggère que la formation des exoplanètes peut suivre des scénarios très différents de celui qui a présidé à la naissance des géantes gazeuses du Système solaire.

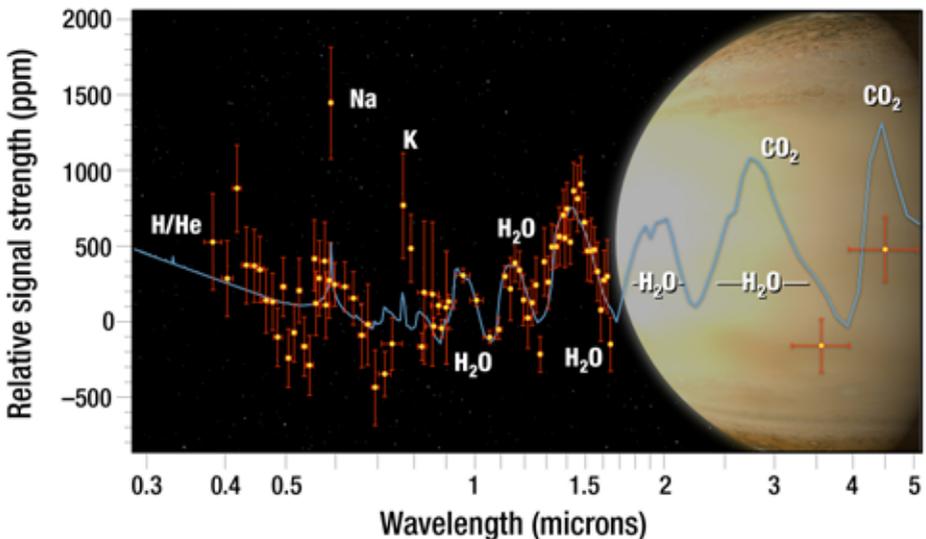
L'étude de leur atmosphère donne effectivement des renseignements sur la formation des planètes et c'est l'une des motivations qui ont poussé les astronomes à regarder de près WASP-39b, une Saturne chaude située à 700 années-lumière. On dispose ainsi du spectre le plus détaillé que peut donner la technologie actuelle de l'atmosphère d'une exoplanète.

Malgré sa désignation, WASP-39b est bien différente de Saturne. Non seulement elle est très chaude, étant proche de son

étoile, mais on ne lui connaît pas de système d'anneaux. Son atmosphère est dépourvue de nuages d'altitude, ce qui permet aux observateurs d'accéder aux couches profondes. Les spectres ont montré la présence de grandes quantités de vapeur d'eau. Il y a probablement aussi beaucoup de molécules plus lourdes, comme le dioxyde de carbone, ce qui porte à croire que la planète a été bombardée de glaces de tous genres lorsqu'elle se trouvait beaucoup plus loin de son étoile. On en conclut qu'elle a traversé le système planétaire de WASP-39 avant de se fixer dans son orbite actuelle, huit fois plus petite que celle de Mercure autour du Soleil. Si l'« année » de WASP-39b ne

Spectre de WASP-39b montrant la présence d'eau. Les mesures effectives sont les gros points. Les lignes sont des simulations. Le futur télescope spatial James Webb sera idéalement adapté à étudier la partie infrarouge.
(NASA, ESA, G. Bacon, A. Feild/STScI, Wakeford/STScI/Univ. of Exeter)

Comprehensive spectrum of WASP-39b



de quatre jours terrestres, son « jour » est sans fin. Comme la Lune autour de la Terre, elle présente toujours la même face vers l'étoile. On a mesuré une température de 750 degrés Celsius. L'hémisphère opposé à l'étoile est pratiquement aussi chaud que l'autre car des vents violents se chargent de répartir la chaleur autour du globe.

Spectres Hubble et Spitzer de plusieurs exoplanètes. Les mesures effectives sont les gros points. Les lignes sont des simulations. (ESA/Hubble & NASA)

