

# L'astronomie dans le monde



## ***C/2012 K1 (PANSTARRS)***

La comète C/2012 K1 (PANSTARRS), tout comme C/2017 K2 (PANSTARRS) dont nous parlions en décembre (*Le Ciel*, 79 (2017) 591) est une comète découverte par le télescope Pan-STARRS à Hawaï. Tout comme elle, elle provient du lointain nuage d'Oort et effectuait sa première visite dans les parages du Soleil. Lors de sa découverte, le 17 mai

2012, elle était à 8,7 unités astronomiques (1,3 milliard de kilomètres). En été, puis en automne 2014 elle était visible aux jumelles, d'abord dans l'hémisphère nord, ensuite dans le sud.

*Séquence d'images de la comète C/2012 K1 prises le 2 mai 2014 par la mission NEOWISE. (NASA/JPL)*



Les comètes venant du nuage d'Oort font toujours l'objet d'une attention spéciale de la part des astronomes et des cosmogonistes. Ce sont des témoins de la formation du Système solaire, il y a 4,5 milliards d'années, et on espère voir dans leurs spectres des signes de la composition primitive de la nébuleuse pré-solaire. C'est ainsi que l'avion observatoire SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy) a été mis à contribution pour étudier la coma de gaz et de poussière enveloppant C/2012 K1 avec la caméra infrarouge FORCAST (Faint Object infraRed CAmera for the SOFIA Telescope).

Les astronomes ont pu déduire la taille et la composition des grains de poussière et analyser leurs propriétés thermiques. Contrairement à d'autres comètes Oort, 2012 K1 ne montrait dans son spectre que de faibles émissions de silicates. Les grains de poussières sont gros – une conclusion que l'absence de queue avait permis de tirer pour C/2017/K2. Ils semblent constitués surtout de carbone, plutôt que de silicate cristallin. Cette constatation surprenante remet en question les théories actuelles de formation des comètes dans le nuage d'Oort. Les comètes sont les matériaux non utilisés lors de la formation des planètes. Mieux les connaître permettra de mieux comprendre l'origine et l'évolution du Système solaire et, spécialement, la formation des planètes telluriques. Le futur télescope spatial James Webb, travaillant dans l'infrarouge, pourra étudier les émissions de silicate dans des comètes encore plus lointaines, ce qui aidera à comprendre les différences qu'elles peuvent présenter.

## Ross 128

Basé sur un communiqué ESO

L'instrument HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher) installé à l'observatoire de La Silla au Chili, a permis de détecter une exoplanète de faible masse en orbite autour de la naine rouge Ross 128. La

période orbitale de cette planète de dimensions semblables à celles de la Terre est de 9,9 jours. Sa température est probablement voisine de celle de notre planète. Enfin, Ross 128 est l'étoile proche la plus « tranquille » autour de laquelle orbite une exoplanète tempérée.

Cette découverte vient couronner plus d'une décennie d'observations répétées au moyen de l'instrument HARPS, combinées à l'utilisation de techniques de pointe en matière de réduction et d'analyse des données. HARPS est le seul instrument capable d'atteindre un tel degré de précision. 15 ans après sa mise en service, il demeure le meilleur instrument de mesure des vitesses radiales.

*Sur cette vue d'artiste figurent la planète Ross 128 b ainsi que son étoile hôte, une naine rouge, en arrière-plan. Ce nouveau monde est la deuxième planète tempérée la plus proche de la Terre après Proxima b. C'est également la planète la plus proche de nous en orbite autour d'une naine rouge inactive, ce qui renforce la probabilité qu'elle abrite la vie. (ESO/M. Kornmesser)*

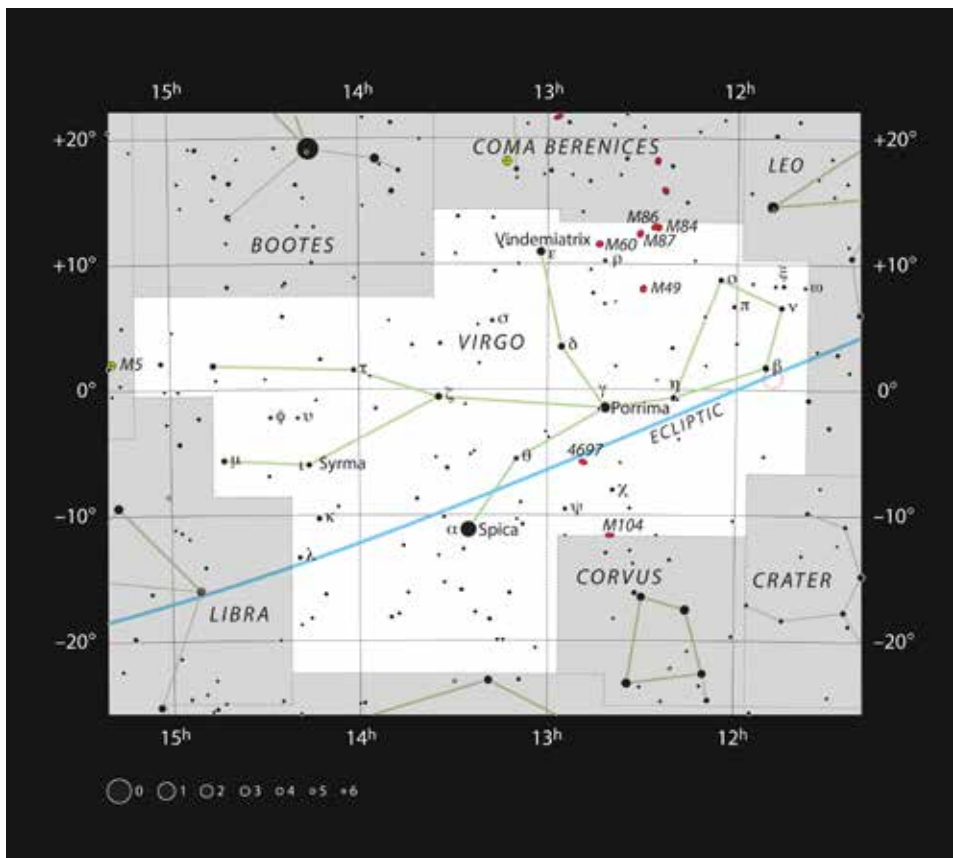


Les naines rouges figurent parmi les étoiles les plus froides, les moins brillantes – et pourtant les plus abondantes – de l’Univers. Elles constituent d’excellents hôtes potentiels d’exoplanètes et font l’objet d’études toujours plus nombreuses, d’autant plus qu’il est bien plus facile de détecter des exoterras à proximité de ces étoiles qu’autour d’étoiles semblables au Soleil. Une planète orbitant à proximité d’une naine rouge de faible masse produit sur son étoile hôte un effet gravitationnel plus important qu’une même planète orbitant à plus grande distance d’une étoile plus massive de type Soleil. En conséquence, la vitesse de ce « mouvement réflexe » s’avère plus facile à mesurer. Malheureusement le fait que les

naines rouges soient beaucoup moins brillantes rend leur observation plus délicate et demande de gros instruments.

De nombreuses étoiles de type naine rouge, y compris Proxima Centauri, s’embrasent parfois, baignant leurs planètes dans des rayonnements ultraviolet et X mortels.

*Carte de la constellation zodiacale de la Vierge montrant la position de la naine rouge Ross 128 parfois baptisée Proxima Virginis en raison de sa grande proximité avec la Terre. Sur cette carte figurent la plupart des étoiles visibles à l’œil nu par temps clair et par nuit noire. Ross 128 est visible au travers d’un petit télescope. (ESO, IAU, Sky & Telescope)*



Il semble cependant que Ross 128 soit une étoile bien plus calme, de sorte que les planètes qu'elle abrite pourraient constituer les mondes habitables les plus proches de notre Système solaire.

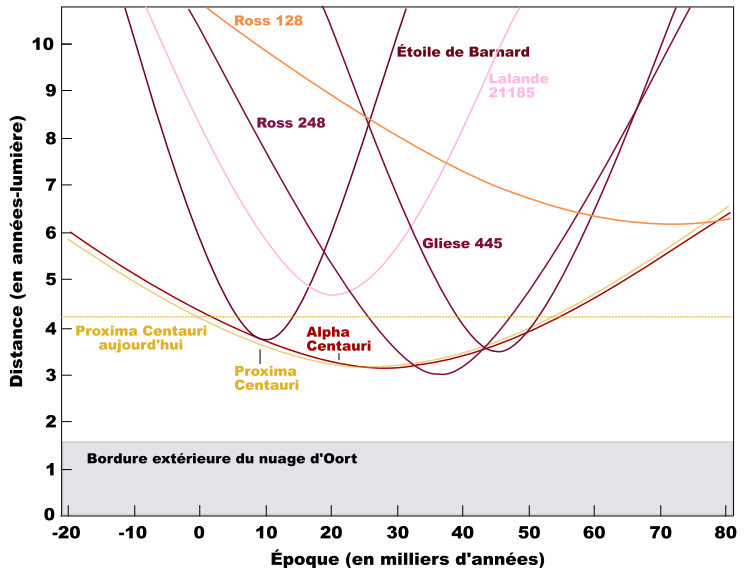
Distante actuellement de 11 années-lumière de la Terre, Ross 128 s'approche de nous. Elle pourrait devenir notre plus proche voisine stellaire d'ici moins de 79 000 ans – un clin d'œil à l'échelle cosmique. Ross 128 b détrônera alors Proxima b, devenant l'exoplanète la plus proche de la Terre.

Sur la base des données de HARPS, l'équipe a découvert que Ross 128 b se situait à une distance 20 fois plus petite de son étoile hôte que la distance séparant la Terre du Soleil. En dépit de cette proximité, Ross 128 b ne reçoit que 1,38 fois plus de rayonnement que la Terre. En conséquence, la température d'équilibre de Ross 128 b est estimée entre -60 et +20°C, ce qui en fait une planète tempérée. L'incertitude demeure toutefois quant à la localisation de la planète à l'intérieur, à l'extérieur ou à l'orée de la zone habitable, condition requise pour que de l'eau liquide recouvre tout ou partie de sa surface.

Les astronomes détectent maintenant un nombre toujours croissant d'exoplanètes tempérées. L'étape suivante consistera à étudier plus en détail leur atmosphère, leur composition et leur chimie. La détection potentielle de la présence de biomarqueurs tel que l'oxygène au sein des atmosphères des exoplanètes les plus proches constituera une étape importante, que les futurs télescopes géants comme l'ELT (Extremely Large Telescope) de l'ESO seront en mesure de franchir. Seules les quelques exoplanètes dont la distance à la Terre est suffisamment faible pour qu'elles puissent être résolues angulairement de leurs étoiles pourront ainsi être analysées.

Le plan de l'orbite de Ross 128 b ne passe pas près de la Terre. On ne peut donc malheureusement pas assister à des transits qui auraient permis de mieux caractériser la planète. Par contre, tout comme TRAPPIST-1, l'étoile est proche de l'écliptique et les « Rossiens » pourraient – ou ont pu récemment – voir transiter nos planètes devant le Soleil (cf. *Le Ciel*, 79 (2017) 196).

*Distance des étoiles les plus proches à partir d'il y a 20 000 ans jusqu'à 80 000 ans dans le futur. L'approche de Ross 128 est représentée par la ligne de couleur saumon.*  
(Kilom691, Wikipedia)





## ***A/2017 U1 PANSTARRS - 1I/2017 U1(suite)***

*Basé sur un communiqué ESO*

Dans notre précédent bulletin nous annonçons la découverte du premier astéroïde extraterrestre (*Le Ciel*, 79 (2017) 592). Les astronomes se sont rués sur leurs télescopes et peuvent maintenant apporter quelques précisions sur l'intrus.

Le 9 octobre 2017, le télescope Pan-STARRS 1 avait détecté ce qui ressemblait à un astéroïde de faibles dimensions se déplaçant à vitesse élevée. Des observations complémentaires avaient permis de préciser son orbite et de révéler, sans l'ombre d'un doute, que son origine différait nettement de celle de l'ensemble des astéroïdes et autres comètes observés à ce jour. Cet objet provenait, non pas de l'intérieur du Système solaire, mais de l'espace interstellaire. Bien que catalogué initialement parmi les comètes, les observations ne révélèrent aucun signe d'activité cométaire. L'objet a donc été rangé dans la classe des astéroïdes interstellaires, créée pour l'occa-

***Vue d'artiste du premier astéroïde interstellaire. 'Oumuamua est un objet très effilé de couleur rouge foncé, de composition métallique ou rocheuse, long de quelque 400 mètres, et qui ne ressemble en rien aux composants habituels du Système solaire. (ESO/M. Kornmesser)***

sion, et on l'a baptisé 1I/2017 U1 (et de façon plus amusante «'Oumuamua»)<sup>1</sup>.

'Oumuamua s'éloigne déjà du Soleil et il fallait agir rapidement. Le Very Large Telescope de l'ESO fut aussitôt réquisitionné dans le but de déterminer l'orbite de l'objet, sa

---

<sup>1</sup> L'équipe de Pan-STARRS a suggéré d'attribuer à l'objet interstellaire une appellation hawaïenne. Cette proposition a été retenue par l'International Astronomical Union, responsable de l'attribution des noms officiels aux corps du Système solaire et au-delà. En outre, l'IAU a créé une nouvelle classe d'objets pour les astéroïdes interstellaires, dont cet objet constitue le tout premier représentant. Les dénominations permises sont au choix 1I, 1I/2017 U1, 1I/'Oumuamua et 1I/2017 U1 ('Oumuamua). Le caractère précédant le O est un okina. Cette appellation se prononce comme suit : H O u mu a. Avant l'introduction de cette nouvelle nomenclature, l'objet était désigné A/2017 U1 – une désignation maintenant périmée.

brillance ainsi que sa couleur, avec une précision meilleure que celle des petits télescopes habituellement utilisés pour ce genre d'observations. La rapidité d'exécution fut essentielle, la luminosité d'Oumuamua diminuant drastiquement à mesure qu'il s'éloignait de nous.

D'autres surprises étaient à venir.

En combinant les images acquises au travers de quatre filtres différents par l'instrument FORS du VLT avec les clichés obtenus au moyen d'autres grands télescopes, on a pu mettre en évidence la variation périodique de luminosité de Oumuamua : sa brillance varie d'un facteur dix au fil de sa rotation autour de son axe, soit en l'espace de 7,3 heures.

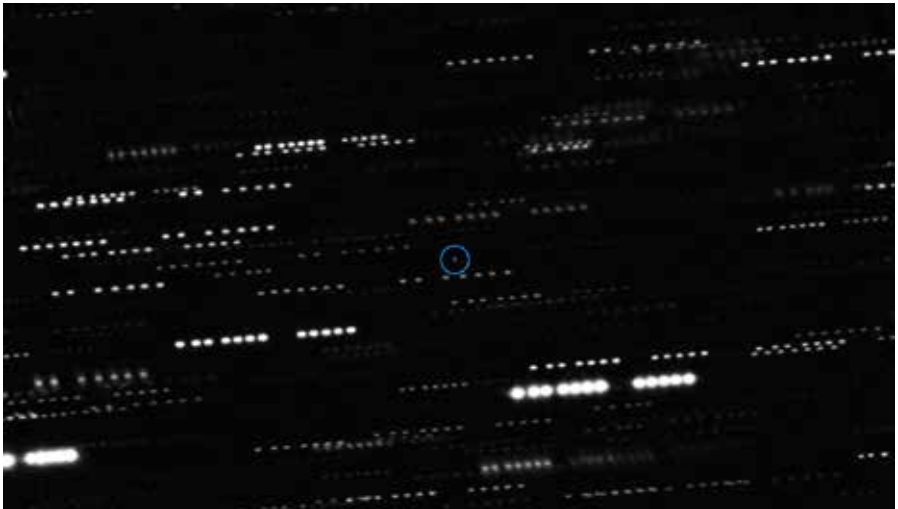
Cette variation importante et inhabituelle de luminosité s'explique par la forme très allongée de l'objet : il est une dizaine de fois plus long que large, et d'apparence compliquée, ondulée. Sa longueur est estimée à plus de 400 mètres. On a par ailleurs constaté qu'il était de couleur rouge foncé, semblable à celle des objets de la périphérie du Système solaire, et qu'il était totalement inerte, aucune trace de poussière n'ayant été détectée dans son environnement proche.

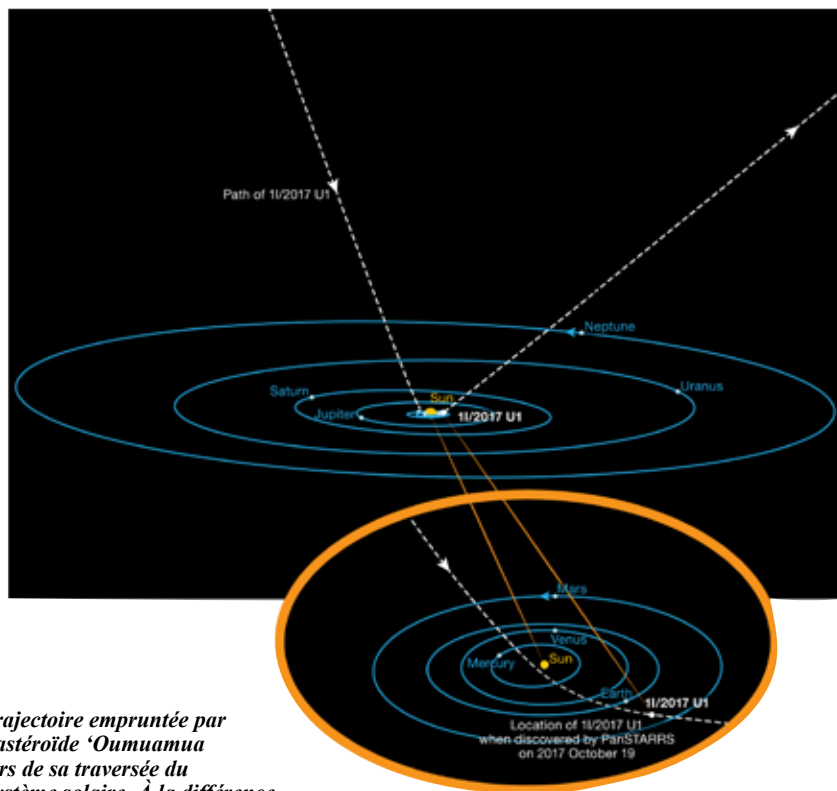
Ces propriétés laissent à penser que Oumuamua est un objet dense, potentielle-

ment rocheux voire majoritairement constitué de métal, dépourvu de quantités significatives d'eau ou de glace, et que la couleur sombre de sa surface résulte des effets de l'irradiation par les rayons cosmiques sur des millions d'années. Oumuamua a probablement erré dans la Voie lactée, indépendamment de tout système stellaire, durant des centaines de millions d'années avant qu'il ne rencontre fortuitement le Système solaire.

Les astronomes estiment qu'un astéroïde interstellaire semblable à Oumuamua pénètre à l'intérieur du Système Solaire chaque année ou presque. Toutefois, leur faible luminosité les rend difficiles à détecter. À l'heure actuelle, seuls les télescopes de sondage tel Pan-STARRS s'avèrent suffisamment puissants pour les détecter.

*L'astéroïde interstellaire Oumuamua. Cette image résulte de la combinaison de plusieurs images acquises par le Very Large Telescope de l'ESO ainsi que par le Gemini South Telescope. L'objet est entouré d'un cercle de couleur bleue. Il a un aspect ponctuel, dénué de toute poussière environnante. (ESO/K. Meech et al.)*





*Trajectoire empruntée par l'astéroïde 'Oumuamua lors de sa traversée du Système solaire. À la différence des autres astéroïdes et comètes observés jusqu'à présent, ce corps n'est pas piégé par l'attraction gravitationnelle du Soleil. Il provient de l'espace interstellaire et y retournera après sa brève rencontre avec notre système stellaire. Son orbite hyperbolique est particulièrement inclinée et il ne semble pas s'être approché d'un autre corps du Système solaire lors de sa traversée. (ESO/K. Meech et al.)*

Les astronomes continuent d'observer cet objet particulier dans l'espoir de déterminer avec une précision accrue sa provenance ainsi que sa destination prochaine au sein de la Galaxie.

## **Comète 45P/ Honda-Mrkos-Pajdušáková**

La comète 45P, découverte en 1948, tourne autour du Soleil en un peu plus de cinq ans. Son faible éclat ne la rend bien observable que rarement, lorsqu'elle vient près de notre planète. C'était le cas en février 2017, avec une distance minimale de 0,083 unité astronomique, soit 12,4 millions de kilomètres. Même dans ces conditions, elle restait invisible à l'œil nu, avec une magnitude 7 et une brillance superficielle faible, mais les amateurs ont pu la mitrailler (voir *Le Ciel*, 78 (2017) 161 et 375).

45P est une comète dite de la famille de Jupiter dont les membres ont des orbites fortement influencées par la planète géante, avec une période de quelques années seulement, généralement de 5 à 7, mais jusqu'à 20 ans.

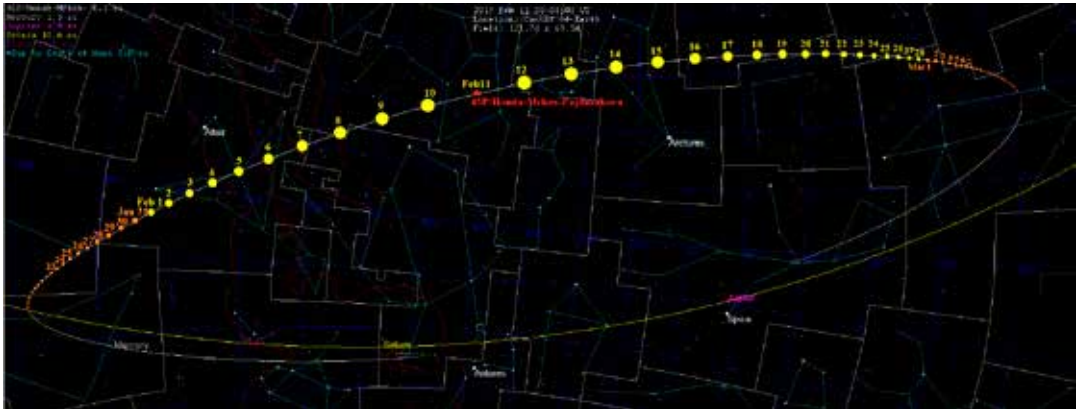
**La comète 45P photographiée le 24 février par Gaston Dessy.**

On en connaît maintenant des centaines. Leur destin est sombre puisque, une fois capturées au cœur du Système solaire, elles finissent rapidement par s'éteindre, tous les matériaux volatils ayant été cuits, ou bien elles se fragmentent, s'abîment dans Jupiter ou dans la fournaise du Soleil. On estime le sursis de ces astres à quelques dizaines ou centaines de milliers d'années, ce qui est très court à l'échelle astronomique. Il doit donc exister un réservoir pour repeupler constamment la famille. On pense à une provenance de la ceinture de Kuiper via un passage dans la périphérie de la ceinture principale des astéroïdes.

Malgré leur nombre et leur proximité, on connaît moins bien la composition de ces comètes que celle de leurs consœurs à longue période provenant du nuage d'Oort. Les astronomes ont profité du passage de 45P



**Trajectoire apparente de la comète 45P lors de son passage près de la Terre en 2017. (Tomruen)**





pour étudier les gaz qui s'en échappaient avec le spectrographe infrarouge à haute résolution iSHELL nouvellement installé sur le télescope IRTF (InfraRed Telescope Facility) de la NASA, au sommet du Maunakea à Hawaii. Dans ce domaine de longueur d'onde on a accès aux émissions de molécules provenant de la vaporisation de glaces primordiales témoignant des premiers instants du Système solaire. Certaines de ces molécules sont cruciales pour la formation d'acides aminés, de sucres et d'autres molécules d'intérêt biologique. En particulier, on a pu analyser le monoxyde de carbone et le méthane, des molécules très difficiles à détecter dans les comètes de la famille de Jupiter.

Le domaine couvert par iSHELL s'étend de 1,1 à 5,3 microns, ce qui permet d'enregistrer simultanément beaucoup de molécules différentes et donc de pouvoir comparer directement leur abondance. La haute résolution permet aussi de débrouiller l'écheveau des bandes moléculaires cométaires qui se superposent aux mêmes bandes de notre atmosphère. Finalement un intérêt non négligeable de ces longueurs d'onde pour les comètes est

*Le télescope IRTF.  
(Karan Teramura; NASA/  
University of Hawaii)*

de pouvoir les observer en plein jour et donc près du Soleil lorsque leur éclat intrinsèque est maximal.

45P a été observée pendant deux jours peu après son passage au périhélie en janvier 2017. Les astronomes ont mesuré de façon précise l'eau, le monoxyde de carbone ainsi que six autres vapeurs primordiales. Pour cinq de ces gaz, dont le monoxyde de carbone et le méthane, ils ont pu comparer les valeurs des côtés nuit et jour. Ces observations ont répondu à certaines questions posées par les astronomes mais elles en ont soulevé d'autres.

L'abondance du monoxyde de carbone est très faible ce qui permet de ranger 45P parmi les comètes déficientes en cette molécule. Cela ne surprend pas tellement car c'est un gaz qui s'échappe très facilement sous la chaleur solaire. Mais le méthane s'échappe tout aussi rapidement et il n'est pas sous-abondant. 45P est l'une des rares comètes plus riches en

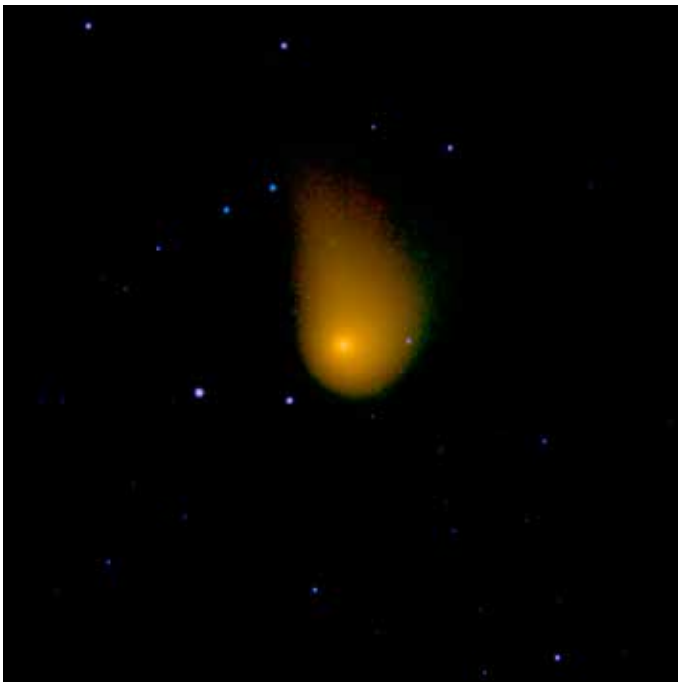
méthane qu'en monoxyde de carbone. Une hypothèse envisagée est que le monoxyde de carbone ait réagi avec l'hydrogène pour former du méthanol et, effectivement, 45P contient beaucoup de méthanol. Mais ce méthanol s'est-il formé dès l'origine ou la réaction s'est-elle déroulée progressivement depuis que la comète s'est échappée du nuage d'Oort pour se réchauffer près du Soleil ?

Il faut maintenant étudier d'autres comètes de la famille de Jupiter pour voir si ces résultats sont typiques ou une exception. Deux d'entre elles se sont déjà présentées aux astronomes cette année, 2P/Encke et 41P/Tuttle-Giacobini-Kresak. L'année prochaine ce sera le tour de 21P/Giacobini-Zinner et de 46P/Wirtanen. Celle-ci restera à moins de 16 millions de kilomètres de la Terre pendant la plus grande partie du mois de décembre et offrira une très belle occasion à iSHELL de se distinguer.

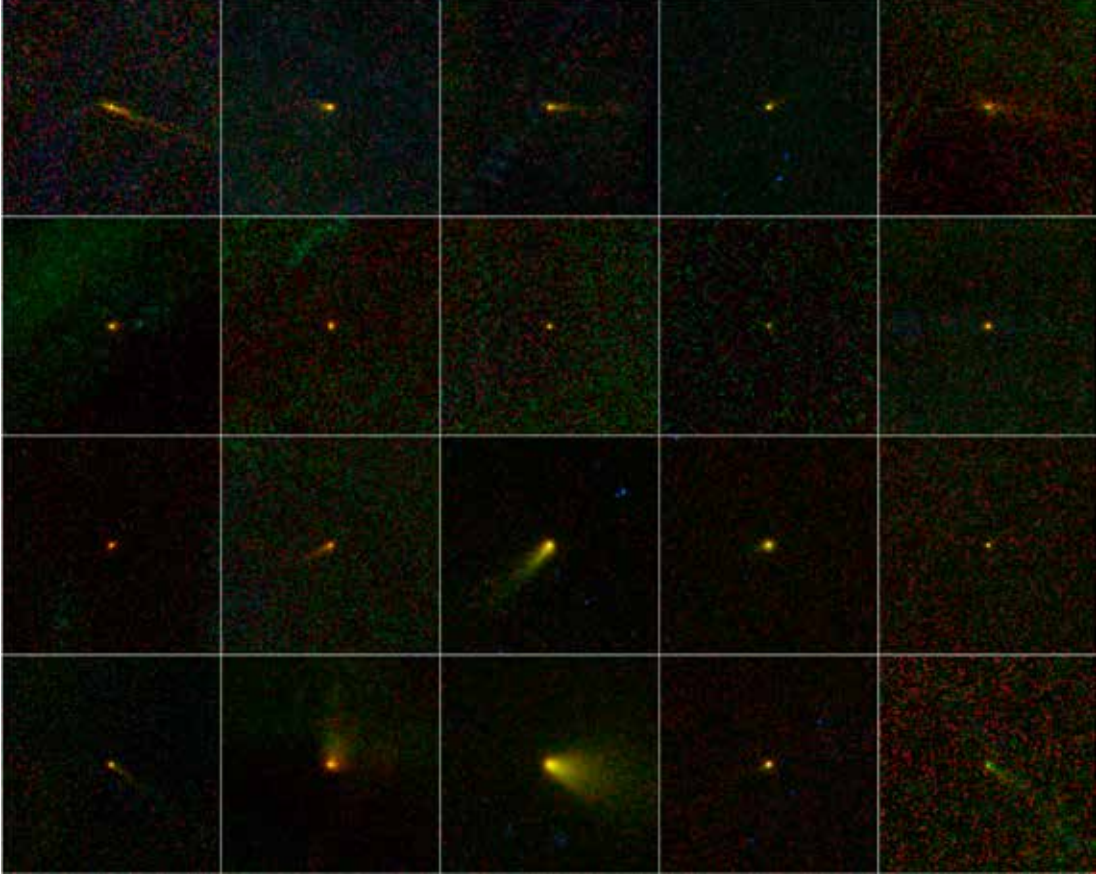
## ***Oxydes carboniques cométaires***

Le monoxyde et le dioxyde de carbone sont parmi les moteurs de l'activité cométaire à grande distance du Soleil, là où le rayonnement de celui-ci ne suffit pas à sublimer la glace d'eau. Ces oxydes sont difficiles à étudier depuis le sol, comme on vient de le voir avec les travaux sur la comète 45P au télescope IRTF. Mais plutôt que d'observer depuis un site d'altitude comme le volcan Mauna Kea, à 4168 mètres au-dessus du niveau de la mer, afin d'éviter les absorptions atmosphériques, il est encore plus radical de s'élever au-dessus de l'atmosphère et d'utiliser un satellite.

C'est ainsi que la mission NEOWISE a été mise à profit pour observer pas moins de 163 comètes, ce qui constitue à ce jour le plus grand survey infrarouge cométaire. La taille forcément réduite du télescope embarqué (40 centimètres de diamètre) ne peut rivaliser avec les trois mètres du télescope IRTF mais l'absence de contamination spectrale fait plus que compenser ce handicap. Par contre, il ne dispose pas de spectrographe et effectue ses observations dans les bandes infrarouges de 3,3 - 4,7 - 12 et 23 microns. Durant les premiers mois de la mission, en 2010, un cryostat permettait de maintenir la température du détecteur aux alentours de 12 K (mission WISE proprement dite). Après épuisement du réfrigérant (16 kg d'hydrogène



*Une comète observée par WISE en avril 2010, C/2006 W3 (Christensen). (NASA/JPL-Caltech)*



solide) seules les deux première bandes du proche infrarouge restaient utilisables et la mission fut étendue jusqu'en février 2011 sous le nom de NEOWISE.

Les résultats du survey lèvent partiellement le voile sur les propriétés physiques de ce large échantillon de comètes : taux de production de poussière, taille des noyaux et taux de production des oxydes de carbone.

En montrant que les comètes éjectent essentiellement du monoxyde de carbone au-delà de

*NEOWISE a à son actif la découverte de pas moins de 20 comètes. De gauche à droite, et de haut en bas: 237P/LINEAR (2002 LN13), 233P/La Sagra (2009 WJ50), P/2009 WX51 (Catalina), P/2010 B2 (WISE), P/2010 D1 (WISE), P/2010 D2 (WISE), C/2010 D3 (WISE), C/2010 D4 (WISE), C/2010 DG56 (WISE), C/2010 E3 (WISE), C/2010 FB87 (WISE-Garradd), C/2010 G3 (WISE), C/2010 J4 (WISE), P/2010 K2 (WISE), C/2010 KW7 (WISE), 245P/WISE (2010 L1), C/2010 L4 (WISE), C/2010 L5 (WISE), P/2010 N1 (WISE), P/2010 P4 (WISE).*

*Les trois qui ne portent pas la désignation WISE avaient d'abord été découvertes comme astéroïdes. WISE a montré leur caractère cométaire. (NASA/JPL)*

4 unités astronomiques (600 millions de kilomètres), le survey confirme que les comètes ont agrégé la plupart de leurs éléments volatils lorsqu'elles se sont formées et qu'elles ont réussi à les garder durant des milliards d'années tant qu'elles ne se sont pas approchées du Soleil.

La plupart de ces comètes lointaines sont forcément des comètes à longue période (plus de deux siècles), très différentes de celles de la famille de Jupiter dont nous parlions dans le sujet précédent, et elles passent le plus clair de leur temps au-delà de l'orbite de Neptune. Lorsqu'elles approchent du Soleil elles éjectent proportionnellement de plus en plus d'oxydes de carbone par rapport aux poussières mais de moins en moins par rapport aux autres gaz. L'eau est alors le principal moteur de leur activité.

## ***RSL***

Des marques sombres sur Mars avaient été interprétées comme le signe d'eau liquide souterraine percolant jusqu'à la surface. De nouvelles recherches y voient plutôt des écoulements de grains de sable et de poussières. Un examen attentif de ce phénomène saisonnier au moyen de la caméra HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) de la sonde MRO (Mars Reconnaissance Orbiter) révèle que les marques n'apparaissent que sur des pentes assez fortes permettant aux particules sèches d'y dévaler librement.

***Des écoulements RSL sont visibles sur le bord interne d'un cratère martien.  
(NASA/JPL-Caltech/UA/USGS)***



C'en serait donc fini de cet espoir de trouver une vie microbienne active sous la surface de la Planète Rouge.

Des milliers de ces écoulements, dénommés RSC (« recurring slope lineae ») ont été recensés sur une cinquantaine de pentes rocheuses de l'équateur aux latitudes moyennes depuis leur découverte en 2011. Ils apparaissent et se développent à la saison chaude pour disparaître à l'hiver. Sur Terre, seule l'eau montre ce comportement.

Des modèles tridimensionnels bâtis sur base d'images stéréo de 151 RSL démontrent que la déclivité y est toujours supérieure à 27 degrés. Les écoulements se terminent toujours sur une pente dont l'angle est celui « de talus » (ou « de repos ») des dunes de Mars ou de la Terre. De l'eau liquide s'étendrait sur des pentes plus faibles.

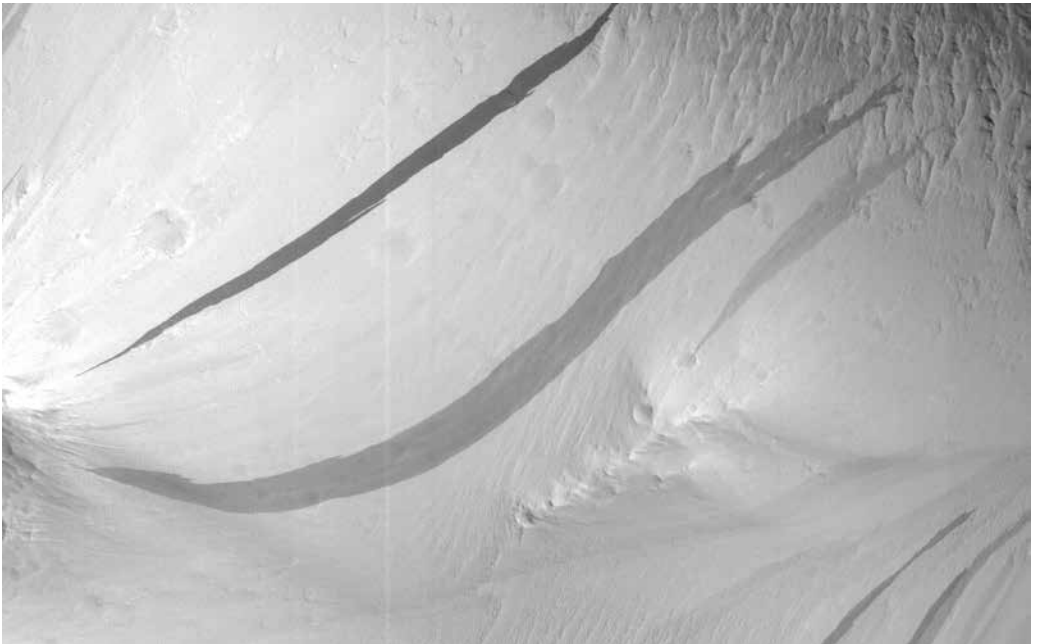
Expliquer la présence de beaucoup d'eau liquide à la surface de Mars était très difficile. On pense qu'elle se limite au mieux à quelques traces de condensation de la vapeur de l'air. L'explication granulaire pour les RSL convient

beaucoup mieux pour cette planète à peine protégée par une atmosphère froide et ténue.

L'explication des RSL n'est cependant pas encore totalement satisfaisante. Leur évolution saisonnière avec une apparition progressive et une disparition rapide est intrigante, de même que la présence concomitante de sels hydratés. Certains scientifiques pensent que ces sels s'hydratent en absorbant l'humidité plus ou moins forte de l'air et forment des gouttes de saumure au rythme des saisons. Ce phénomène pourrait déclencher les avalanches de sable.

L'eau, même en quantité minimale, aurait donc malgré tout un rôle dans les RSL et, si elle ne suffit pas à permettre la persistance d'une vie microbienne, il faudra en tenir compte pour que les explorations futures ne contaminent pas les sites de RSL.

***RSL dans la région équatoriale de Mars.  
(NASA/JPL-Caltech/UA/USGS)***



## Énergie et matière noires ?

En 1933 l'astronome suisse Fritz Zwicky constatait qu'il devait y avoir beaucoup plus de matière dans l'Univers que celle que l'on observait. Le concept de matière « noire », c'est-à-dire invisible, fut renforcé par les observations de Vera Rubin à partir des années 70 : les vitesses des étoiles conduiraient à la dispersion des galaxies si leur attraction, et donc leur masse, n'étaient pas plus grandes qu'on le pensait.

En 1988 on découvrait l'accélération de l'expansion de l'Univers. Une énergie « noire » était donc inventée pour expliquer comment la force d'attraction pouvait être contrebalancée.

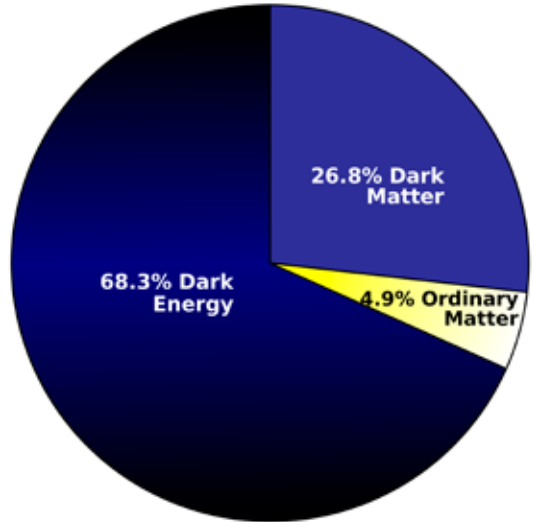
Malgré tous les efforts des scientifiques, ni la matière noire ni l'énergie noire n'ont révélé leurs secrets.

C'est peut-être un savant suisse, André Maeder, professeur honoraire au département d'Astronomie de la Faculté des sciences de l'Université de Genève, qui nous donne la solution : ces deux choses sont invisibles car elles n'existent tout simplement pas. Un modèle théorique basé sur l'« invariance d'échelle de l'espace vide » permet de s'en débarrasser.

Ce modèle explique bien les observations : l'expansion accélérée de l'Univers, la grande vitesse des galaxies dans les amas, la grande vitesse des étoiles à la périphérie des galaxies ainsi que la dispersion des vitesses d'oscillation des étoiles de part et d'autre du plan de la Voie lactée selon leur âge.

Cette théorie révolutionnaire sera scrutée en détail par les spécialistes mais elle confirme qu'en science, rien n'est gravé dans le marbre et que l'ouverture d'esprit est essentielle.

*La distribution de l'énergie dans l'Univers selon le satellite Planck. (Szczureq, Wikipedia)*





## ***Pollution lumineuse***

Nous avons discuté récemment de la pollution lumineuse inhérente à la généralisation de l'éclairage public au moyen de lampes LED (*Le Ciel* 76 (2015) 400-410) et fait écho aux craintes que suscite cette révolution technique. Au lieu d'en profiter pour réaliser d'importantes économies on allait peut-être assister à un déluge de photons. Les données satellitaires indiquent sans ambages que c'est malheureusement ce scénario pessimiste qui est en train de se réaliser et que nous n'avons jamais été soumis à autant de pollution lumineuse.

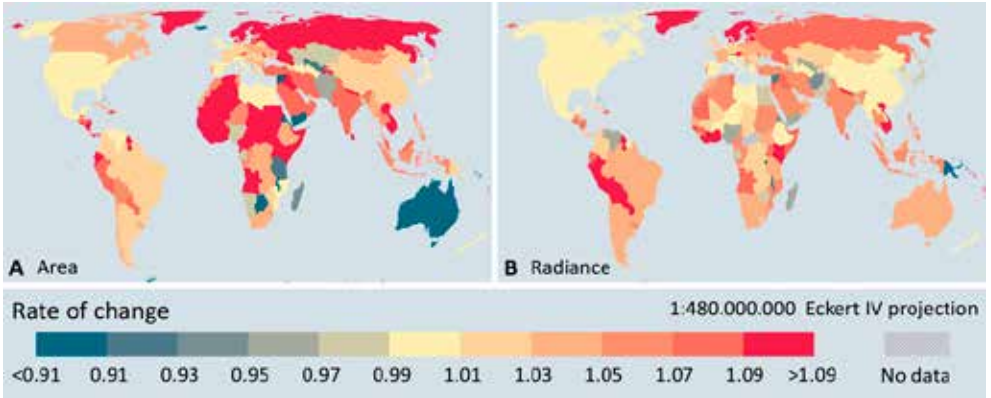
Jusqu'à présent l'intensité des éclairages était souvent estimée à partir de données non calibrées de satellites militaires. Les nouvelles mesures proviennent de l'instrument VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) du satellite météorologique Suomi NPP (Suomi National Polar-orbiting Partnership) et elles ont permis d'estimer les modifications globales de l'éclairage entre octobre 2012 et octobre 2016. VIIRS observe une bande de longueurs d'onde du visible au proche infrarouge (dite band DNB, « Day/Night band »).

***La péninsule ibérique photographiée de nuit depuis la Station Spatiale Internationale en 2014. (NASA)***

Chaque pixel couvre un demi kilomètre carré, une résolution inédite qui permet d'investiguer pour la première fois l'éclairage au niveau du pâté de maison plutôt qu'à l'échelle des villes ou des pays.

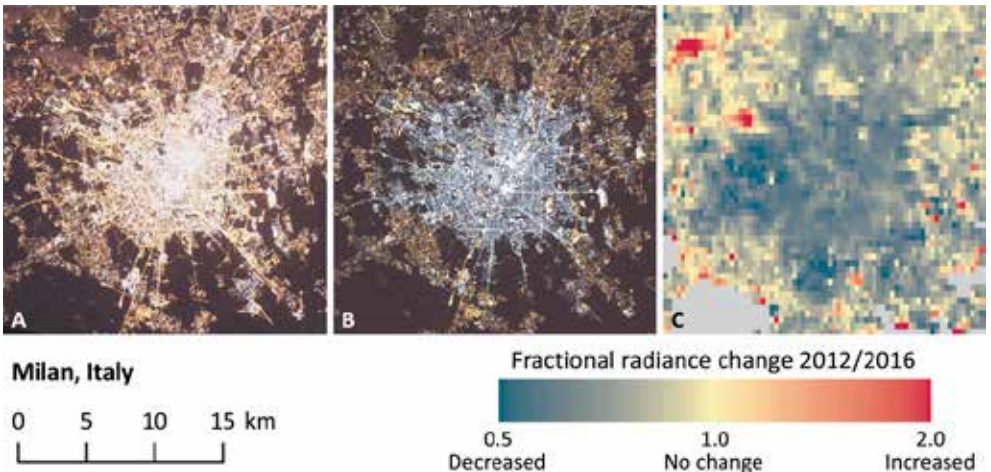
Sur ces quatre années, la surface totale éclairée artificiellement a gonflé de 9,1%, soit une moyenne de 2,2% par an. En même temps, l'intensité des surfaces éclairées a elle aussi augmenté de 2,2% par an, à de rares exceptions près, comme certaines zones de conflit. Quelques-unes des régions les plus violemment éclairées sont restées stables, comme l'Italie, l'Espagne et les États-Unis. En Asie, Afrique et Amérique du Sud, l'accroissement est quasiment général.

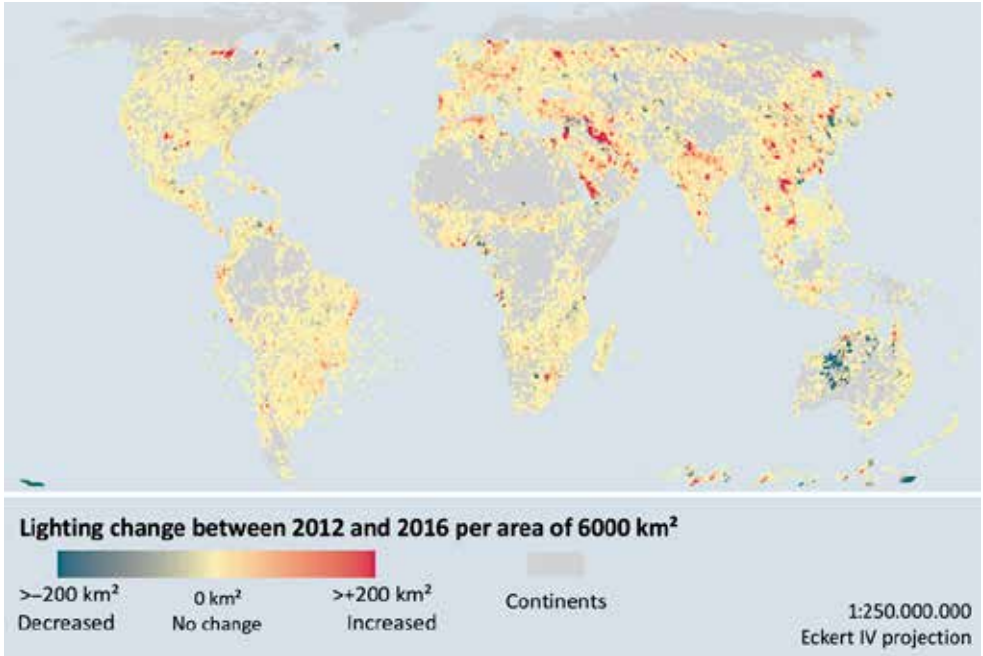
Le problème est probablement encore plus grave que ce que suggèrent les données VIIRS. La bande spectrale DNB exclut les



*Modifications de l'éclairage sur la planète de 2012 à 2016. À gauche les superficies concernées, à droite l'intensité lumineuse. Le rouge indique les augmentations les plus rapides. Le cas de l'Australie est particulier en raison d'incendies très étendus qui ont accru la surface éclairée, mais dont l'effet a été écarté de l'analyse de la radiance. (Kyba et al. / Science Advances)*

*Milan vu depuis l'espace en 2012 (A) et 2015 (B). En B on voit les changements dans la bande DNB. (Earth Science and Remote Sensing Unit, NASA Johnson Space Center, ESA, IAU, Cities at Night, Kyba et al. / Science Advances)*





longueurs d'onde inférieures à 0,5 micron, et c'est là que la plupart des LED émettent le plus. On sous-estime donc la pollution lumineuse des LED.

Une telle augmentation pourrait sembler normale et suivre simplement le développement démographique et une amélioration générale des sociétés. Ce qui est anormal est son ampleur qui reflète la transition vers les LED. Plutôt qu'économiser à la faveur d'une amélioration du rendement énergétique, on préfère gaspiller. Un éclairage moins cher donne lieu à plus d'éclairage et non à une réduction de la facture.

Il n'y a pas que les astronomes qui sont affectés. On commence seulement à découvrir les effets néfastes de l'éclairage extérieur sur l'homme. Le monde biologique est adapté aux cycles naturels des variations de la luminosité et les lumières artificielles introduisent une nouvelle source de stress au point de vue de l'évolution. Beaucoup d'organismes ne peuvent s'adapter à ce qu'on leur inflige. Ils n'ont pas comme nous la possibilité de fer-

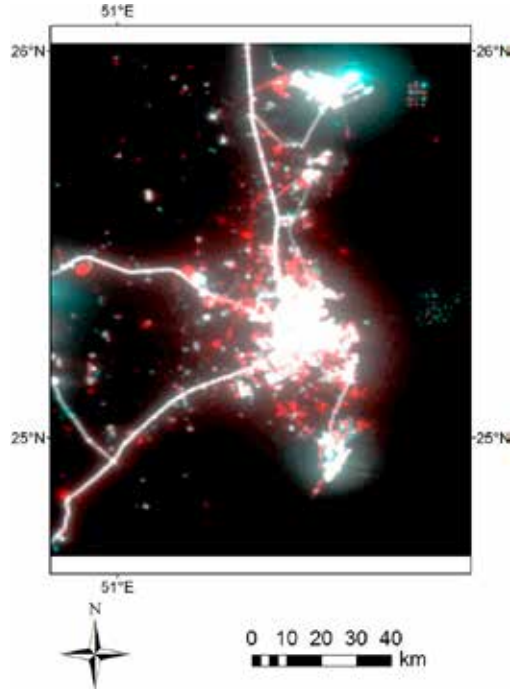
*Variation des surfaces illuminées entre 2002 et 2006. Les augmentations sont en rouge, les diminutions en bleu. Le jaune indique un statu quo. Chaque pixel fait environ 6 000 kilomètres carrés. L'échelle s'arrête à 200 kilomètres carrés, mais certains pixels atteignent des valeurs de l'ordre de 2 000. (Kyba et al. / Science Advances)*

mer des volets ou de tirer des rideaux et sont condamnés à subir toute cette lumière. Environ 30% des vertébrés et 60% des invertébrés sont nocturnes et donc potentiellement vulnérables. Les plantes et les micro-organismes sont également affectés par l'éclairage extérieur.

On ne peut qu'espérer que les cités seront un peu plus raisonnables sur la puissance des luminaires qu'elles installent, mais la partie semble mal engagée. Et pourtant, contrairement à la pollution atmosphérique, la question de la pollution lumineuse peut être réglée rapidement. Si l'on pouvait stopper instantanément et définitivement tout rejet de dioxyde de car-

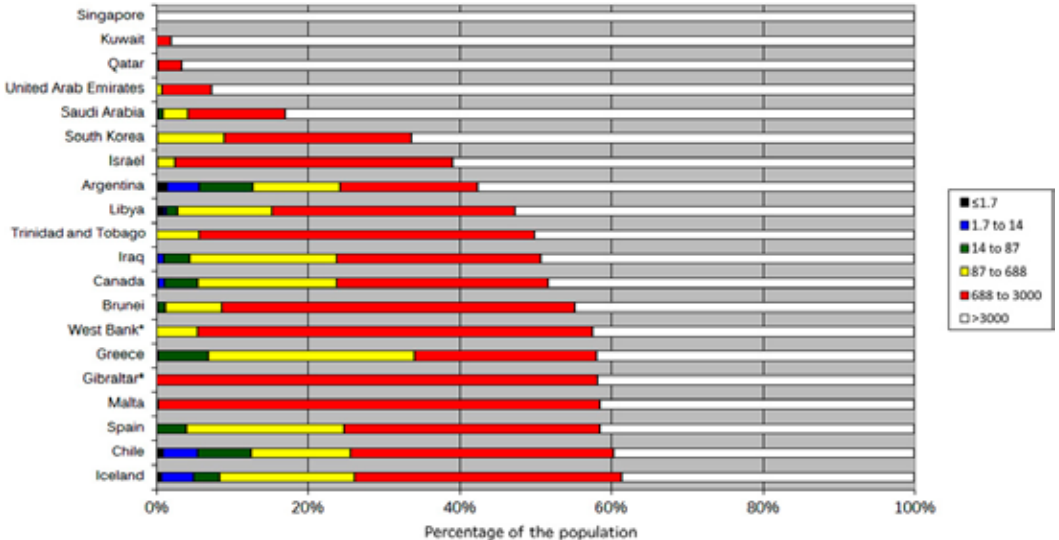
bone, de méthane, de métaux lourds, etc., il faudrait quand même des siècles pour que leurs effets pervers disparaissent et que tout rentre dans l'ordre. Par contre la pollution lumineuse ne tient qu'à la volonté des gens, au basculement d'un interrupteur.

*Expansion de l'éclairage à Doha, Qatar entre 2012 (bleu-gris) et 2016 (rouge). (Kyba et al. / Science Advance)*



*Les pays les plus exposés à la pollution lumineuse, en fonction de la population. Les unités sont des microcd par mètre carré. On peut trouver curieux d'y voir le Chili, siège des plus grands observatoires, mais ce diagramme reflète la concentration urbaine de la population. Les grands déserts peuvent avoir un ciel parfait. (Kyba et al. / Science Advances)*

Most polluted countries by population

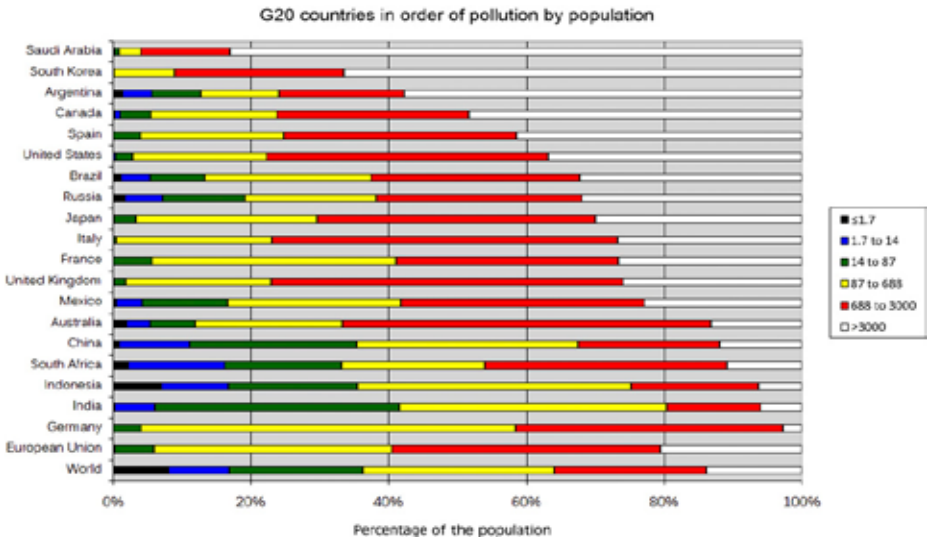


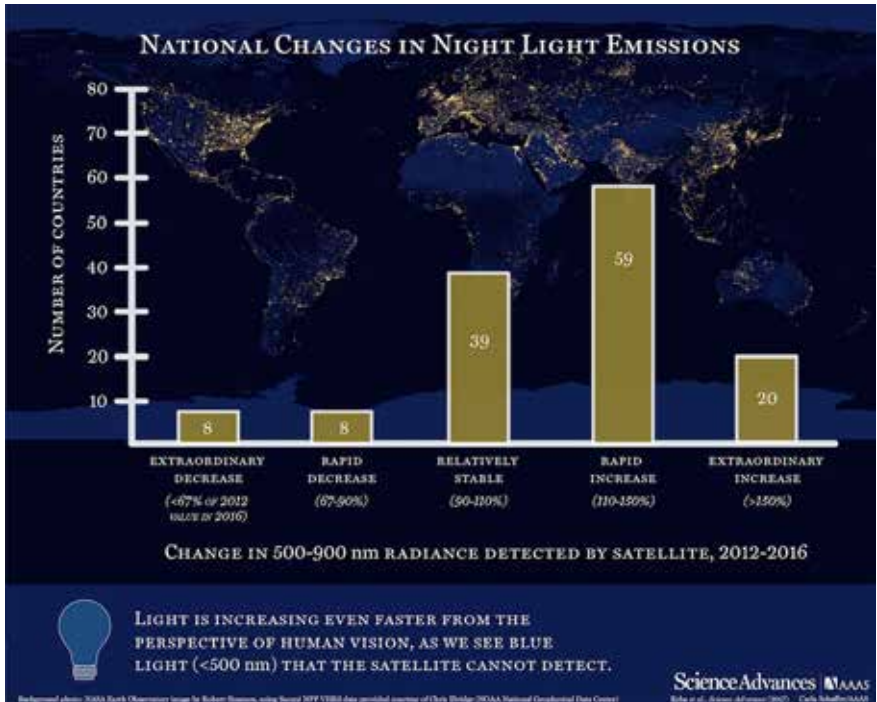


*Ci-dessus, images composites montrant des hémisphères de la Terre durant la nuit. Les nuages et les liserés de lumière solaire ont été ajoutés pour l'esthétique et proviennent de l'instrument MODIS du satellite TERRA. (NASA Earth Observatory, Joshua Stevens, Suomi NPP VIIRS, Miguel Román, NASA's Goddard Space Flight Center)*

*Page de droite : histogramme montrant combien de pays ont accru ou diminué leur éclairage nocturne dans la période 2012-2016. (Kyba et al. / Science Advances)*

*Ci-dessous, pourcentage des populations affectées dans les pays du G20. (Falchy et al, Science Advances, 2016)*





(suite page 33)



## Échos lumineux

Les images prises par le télescope spatial Hubble montrent l'écho lumineux d'une supernova réfléchi par la poussière d'un immense nuage interstellaire.

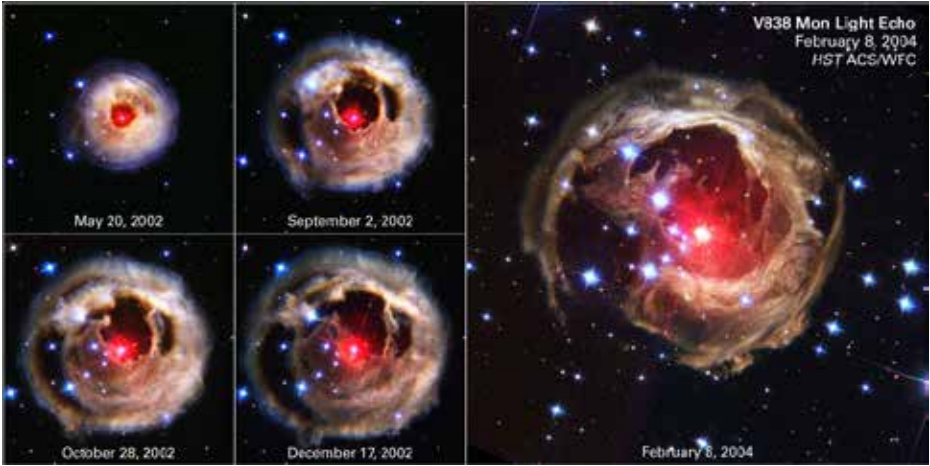
Le lieu géométrique des échos d'une explosion visibles à un moment donné est un ellipsoïde en expansion dont les foyers sont le site de l'explosion et l'observateur. On observe donc l'intersection de cet ellipsoïde avec la matière interstellaire.

La supernova en question est SN2014J qui a explosé dans la célèbre galaxie M82 (le « Cigare ») en janvier 2014. L'événement est le résultat de l'accumulation sur une naine blanche de matière provenant d'un compagnon. Une fois atteint un seuil critique, il se produit une réaction thermonucléaire en chaîne.

*Les images de l'écho ont été prises de novembre 2014 à octobre 2016 avec la caméra ACS (Advanced Camera for Surveys).*

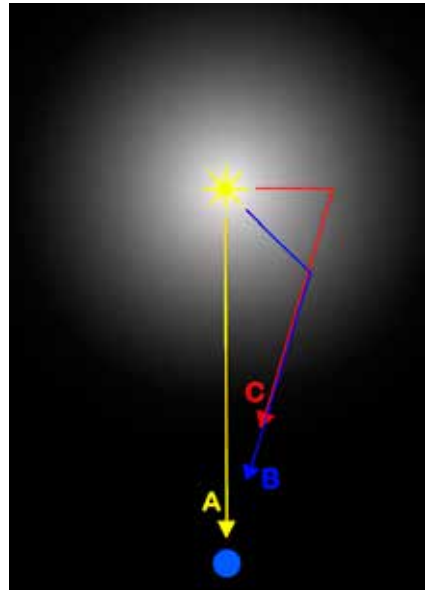
*(NASA, ESA, and Y. Yang (Texas A&M University and Weizmann Institute of Science, Israel); M. Mountain (AURA); The Hubble Heritage Team (STScI/AURA))*

Le plus célèbre écho lumineux concerne la nova V838 Monocerotis qui a explosé en 2002. L'expansion apparente de l'enveloppe était de plusieurs années-lumière en quelques mois, ce qui est physiquement impossible. On n'assistait pas à l'expansion d'une couche matérielle mais à l'illumination de la matière interstellaire par la vague de photons émis lors de l'explosion.



*Expansion des échos lumineux de la nova V838 Monocerotis. (NASA)*

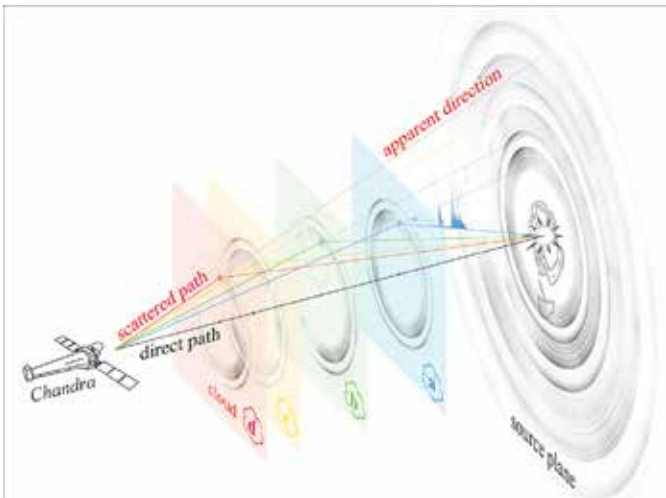
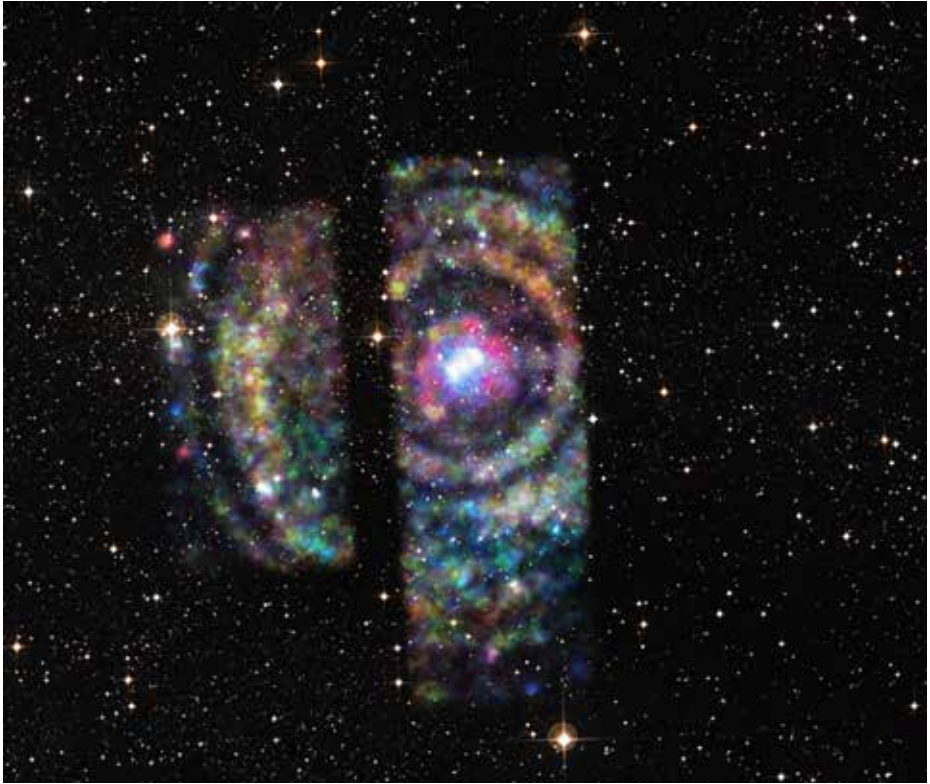
*Principe d'un écho lumineux. La lumière de l'explosion parvient directement à l'observateur A selon le chemin jaune. La lumière réfléchié selon le chemin B (bleu) arrive plus tard, mais avant la lumière qui suit le chemin C (rouge). Les échos B et C apparaissent donc à la même distance angulaire de l'objet mais à des moments différents. (Arkyan, Wikipedia)*



Un autre cas spectaculaire est celui de la supernova de 1987 du Grand Nuage de Magellan (cf. page 37).

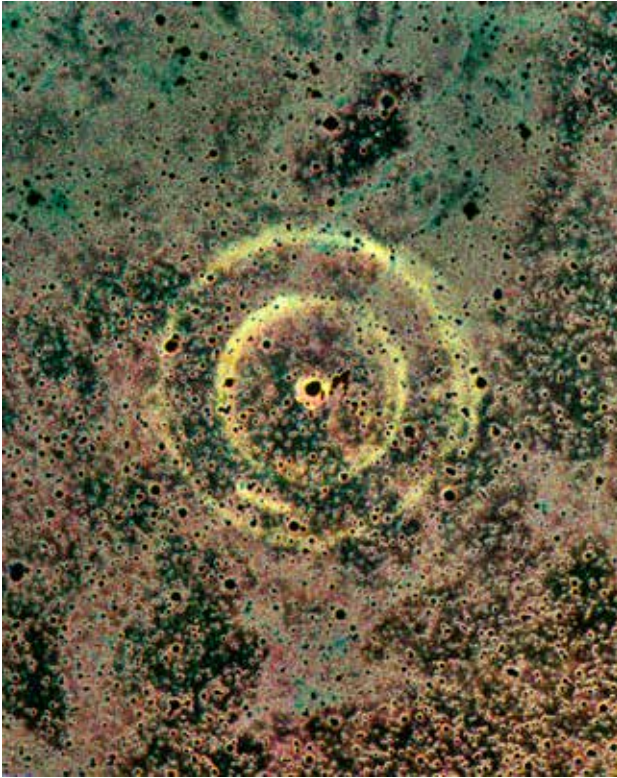
Un écho très tardif peut permettre d'observer avec les techniques modernes la lumière émise par une supernova « historique ». Ainsi la supernova de 1572 a laissé voir de faibles échos en 2008. De même Cassiopeia A, qui résulte d'une supernova ayant explosé inconnu autour de l'an 1660, a pu être étudiée grâce à des échos de 2010 qui ont révélé son asymétrie.

Les échos lumineux ne se limitent pas au domaine optique. En 2013 la source Circinus X-1, un système double constitué d'une étoile massive et d'une étoile à neutrons, a émis un sursaut de rayons X. Leur écho a été observé quelques mois plus tard (cf. page 36), offrant aux astronomes l'occasion de mesurer la distance de la source, 30 700 années-lumière, double de la distance admise jusque-là.

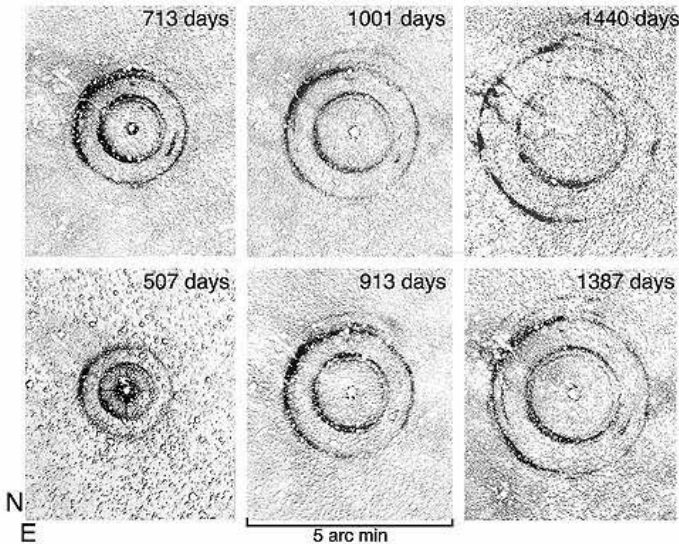


*Échos en rayons X d'un sursaut émis par l'étoile à neutrons de Circinus X-1. Quatre anneaux sont visibles qui correspondent chacun à un nuage interstellaire différent. (NASA/CXC/Univ. of Wisconsin-Madison/S.Heinz et al.)*

*Plus le nuage est proche de nous et plus l'anneau d'échos semble grand. (Univ. of Wisconsin-Madison/S.Heinz)*



**Échos de la supernova  
SN1987A du Grand Nuage  
de Magellan. Soustraction  
d'images argentiques  
prises en 1989 et 1984 avec  
le télescope AAT (Anglo  
Australian Telescope) de  
3 m 90 de Siding Spring.  
La soustraction n'est pas  
parfaite mais les images  
des étoiles sont malgré tout  
considérablement affaiblies,  
laissant apparaître les  
anneaux.  
Le champ fait 5,5 minutes  
d'arc de large.  
(© 1989-2010, Australian  
Astronomical Observatory;  
David Malin)**



**Évolution des échos  
de la supernova du  
Grand Nuage de  
Magellan, SN1987A.  
Le nombre de jours  
après l'explosion est  
indiqué dans chaque  
vignette.  
(A. Rest et al, Nature  
2005)**

## ***Sondage spectroscopique profond***

*Basé sur un communiqué ESO*

Les astronomes utilisant l'instrument MUSE sur le Very Large Telescope de l'ESO au Chili ont mené le sondage spectroscopique le plus profond jamais réalisé. Ils se sont concentrés sur le champ ultra-profond de Hubble (HUDF), une zone très étudiée du sud dans la constellation du Fourneau, notamment par le télescope spatial Hubble<sup>1</sup>. Cela a abouti aux observations spectroscopiques les plus profondes jamais réalisées, avec la récolte de données précises pour 1 600 galaxies, dix fois plus que ce qui avait été laborieusement obtenu dans ce domaine au cours de la dernière décennie par les grands télescopes au sol.

Les images de l'HUDF, publiées en 2004, et prises par le télescope spatial Hubble de la NASA / ESA ont été pionnières dans les observations de l'Univers lointain. Elles ont révélé un bestiaire de galaxies datant de moins d'un milliard d'années après le Big Bang. La même zone a ensuite été observée à plusieurs reprises par Hubble et d'autres télescopes. Aujourd'hui, et ce malgré la profondeur des observations de Hubble, MUSE a – outre de nombreux autres résultats – révélé 72 galaxies inconnues dans cette toute petite zone du ciel.

MUSE peut faire quelque chose que Hubble ne peut pas faire – il disperse la lumière de chaque point de l'image en toutes ses couleurs pour créer un spectre. Cela permet de mesurer la distance, les couleurs et les autres propriétés de toutes les galaxies que l'on peut détecter – y compris celles qui sont invisibles au télescope Hubble lui-même !

Les données de MUSE fournissent une nouvelle vision des galaxies très lointaines, observées peu après le début de l'Univers, environ 13 milliards d'années dans le passé. L'instrument peut détecter des galaxies 100

fois plus faibles que lors des précédentes campagnes d'observation. Ces données s'ajoutent à un champ déjà richement étudié.

Les 72 nouvelles galaxies sont dites des « émettrices Lyman-alpha » car elles brillent très intensément à la longueur d'onde de la lumière Lyman-alpha<sup>2</sup>. Les modèles actuels de formation stellaire ne permettent pas d'expliquer entièrement ces galaxies, qui semblent essentiellement briller dans cette couleur. C'est parce que MUSE disperse la lumière dans ses différentes couleurs que ces objets deviennent apparents, mais ils restent invisibles dans les images directes et profondes telles que celles de Hubble. Nous apprenons des choses sur ces galaxies qui ne sont possibles qu'avec la spectroscopie, comme le contenu chimique et les mouvements internes – et cela non pas en observant les galaxies individuellement mais simultanément.

Une autre découverte majeure de cette étude est la détection systématique des halos géants d'hydrogène lumineux autour des galaxies dans l'Univers primitif, donnant aux astronomes un moyen nouveau et prometteur pour étudier les interactions des galaxies avec leur milieu environnant.

Parmi les autres applications potentielles de cet ensemble unique de données, citons le rôle des galaxies faibles durant la ré-ionisation cosmique (commençant juste 380 000 ans après le Big Bang), l'évolution du taux de fusion des galaxies avec le temps, l'étude des vents galactiques et la formation des étoiles dans l'Univers jeune.

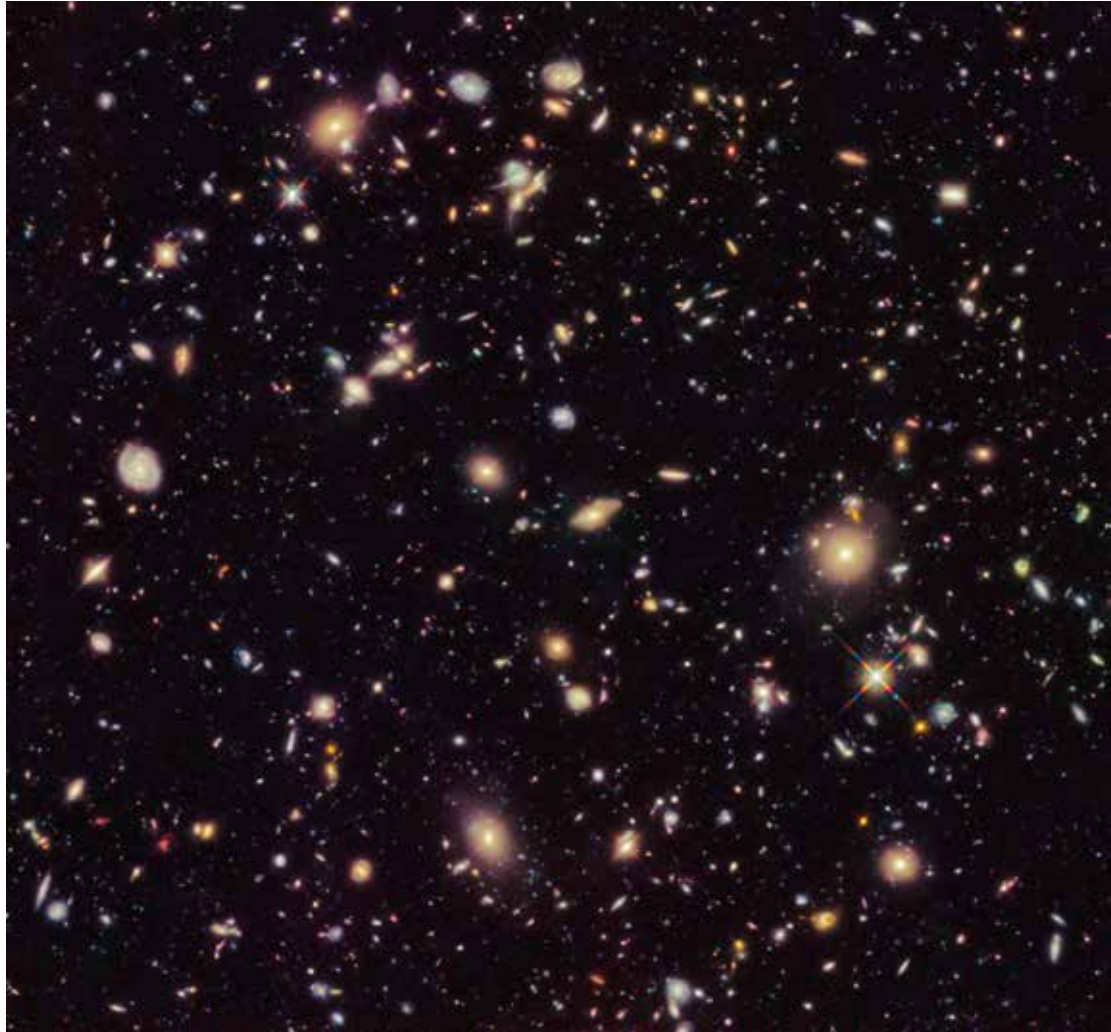
Étonnamment, ces données ont toutes été prises sans le système d'optique adaptative (AOF) qui vient tout juste d'être couplé

---

2 Le rayonnement Lyman-alpha est produit lorsque les électrons dans les atomes d'hydrogène tombent du deuxième au plus bas niveau d'énergie. La quantité précise d'énergie perdue est libérée sous forme de lumière dans une longueur d'onde particulière, dans la partie ultraviolette du spectre, que les astronomes peuvent détecter avec des télescopes spatiaux ou sur Terre dans le cas d'objets qui sont décalés vers le rouge. Pour ces données, à un décalage vers le rouge de  $z \approx 3-6.6$ , la lumière Lyman-alpha est vue comme une lumière visible ou proche infrarouge.

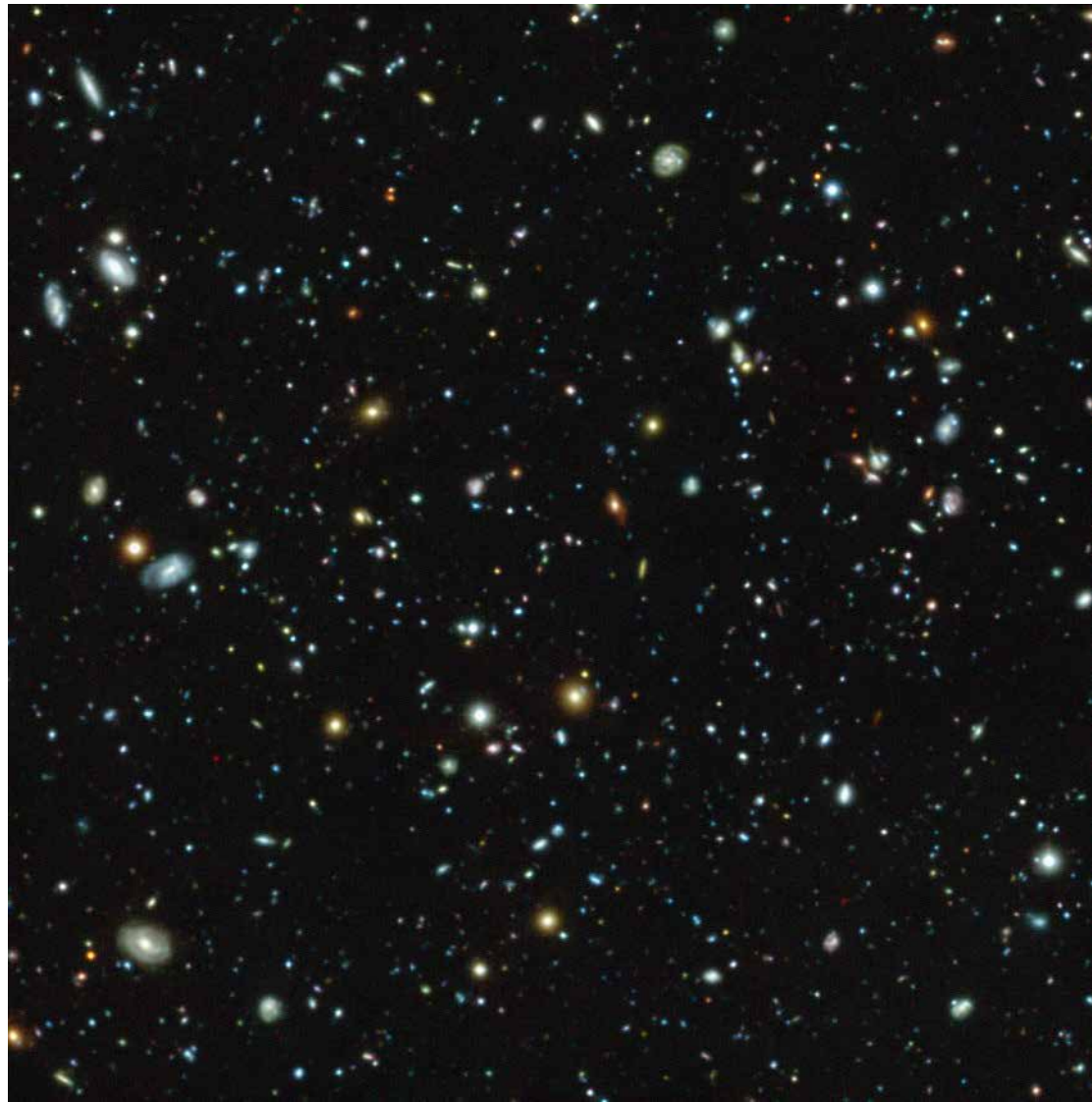
---

1 Le Hubble Ultra Deep Field est l'un des champs les plus étudiés de l'espace. À ce jour, 13 instruments sur huit télescopes, dont ALMA ESO (eso1633), ont observé ce champ dans tous les domaines de longueurs d'onde possibles, depuis les rayons X jusqu'aux longueurs d'onde radio.



à MUSE. La mise en service de l'AOF après une décennie de travail intensif par les astronomes et les ingénieurs de l'ESO ouvre la perspective d'encore plus de données révolutionnaires à l'avenir.

*Image composite obtenue par le télescope spatial Hubble du champ ultra-profond 2012. Les nouvelles données révèlent une population de galaxies distantes à des redshifts compris entre 9 et 12, incluant l'objet le plus distant jamais observé. Ce résultat demande à être confirmé par la spectroscopie au moyen du futur télescope spatial NASA/ESA/CSA, le James Webb Space Telescope. (NASA, ESA, R. Ellis (Caltech), the HUDF 2012 Team)*



*Image en couleur du champ ultra-profond de Hubble, une région toute petite mais très étudiée de la constellation du Fourneau, vue par l'instrument MUSE du VLT de l'ESO. Cette image ne donne qu'une vue très partielle de la richesse des données obtenues par MUSE, qui fournit également un spectre pour chaque pixel de l'image.  
(ESO/MUSE HUDF collaboration)*



*Image composite du champ HUDF mettant en évidence les halos Lyman-alpha découverts par MUSE.  
(ESO/MUSE HUDF team)*



## ***Petit Nuage de Magellan***

Le nouveau radiotélescope ASKAP (Australian Square Kilometre Array Pathfinder) a permis de créer la meilleure image radio du Petit Nuage de Magellan. Pour cela, ASKAP était équipé d'une technologie innovante, dite « phased array feeds ».

ASKAP est l'un des « précurseurs »<sup>1</sup> du SKA. Ses 36 antennes sont installées au MRO (Murchison Radio Observatory) en Australie occidentale.

La galaxie naine du Petit Nuage est l'une de nos plus proches voisines. Située dans le Toucan, à 200 000 années-lumière, elle est visible à l'œil nu depuis l'hémisphère austral.

La nouvelle image permet de voir des détails trois fois plus petits qu'auparavant. Elle

*Image radio du Petit Nuage de Magellan prise avec ASKAP dans le cadre d'un survey destiné à étudier l'évolution des galaxies. (Australian National University / CSIRO)*

montre qu'il y a plus de gaz qu'on le pensait à la périphérie du Petit Nuage, ce qui suggère un passé très dynamique. L'avenir de cette galaxie naine n'est pas tranquille. Tôt ou tard elle devrait être gobée par la Voie lactée. Le Petit Nuage est, comme son frère le Grand Nuage, caractérisé par une structure complexe et des distorsions résultant en partie des interactions entre eux et avec notre Galaxie, et aussi des explosions de supernovæ qui expulsent le gaz vers l'extérieur. Les deux Nuages sont reliés par un pont de matière et, tels des comètes, ils sont suivis sur leur orbite d'une gigantesque queue faite principalement d'hydrogène

Le Petit Nuage a beaucoup été étudié en infrarouge par les télescopes spatiaux comme Spitzer et Herschel. La nouvelle image radio atteint le même niveau de détails que les infrarouges, mais elle montre une composante différente des galaxies, le gaz au lieu des poussières. L'hydrogène est le constituant majeur de toutes les galaxies et il s'étend au-delà des étoiles et des poussières.

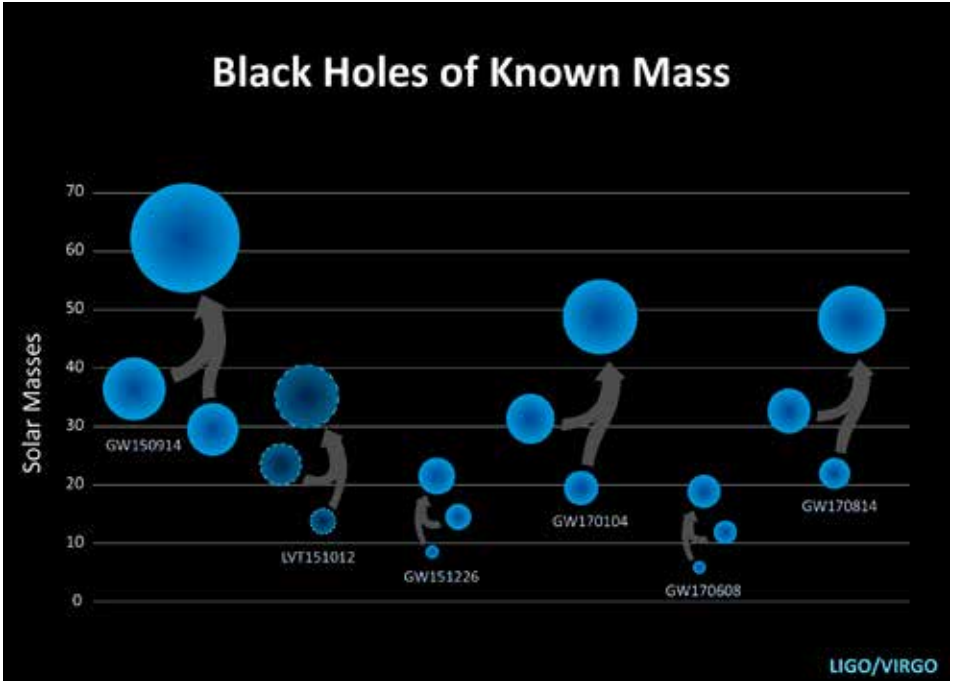
<sup>1</sup> Les « pathfinders » (« éclaireurs ») sont des instruments qui permettent de développer et de tester les techniques du SKA (Square Kilometer Array) et d'effectuer des observations liées aux activités de celui-ci. Les éclaireurs situés sur l'un des sites du SKA sont appelés « précurseurs ». Il s'agit de MeerKAT et HERA en Afrique du Sud et de MWA (Murchison Widefield Array) situé au MRO (Murchinson Radio Observatory). Parmi les nombreux autres éclaireurs, citons le radiotélescope d'Arecibo (Puerto Rico), et le Allen Telescope Array aux USA.



*Une région du Petit Nuage de Magellan dans le domaine visible. (NASA, ESA and the Hubble Heritage Team, STScI / AURA)*

*Le Pathfinder australien, ASKAP, à l'observatoire MRO. (CSIRO)*





### Une fusion de plus

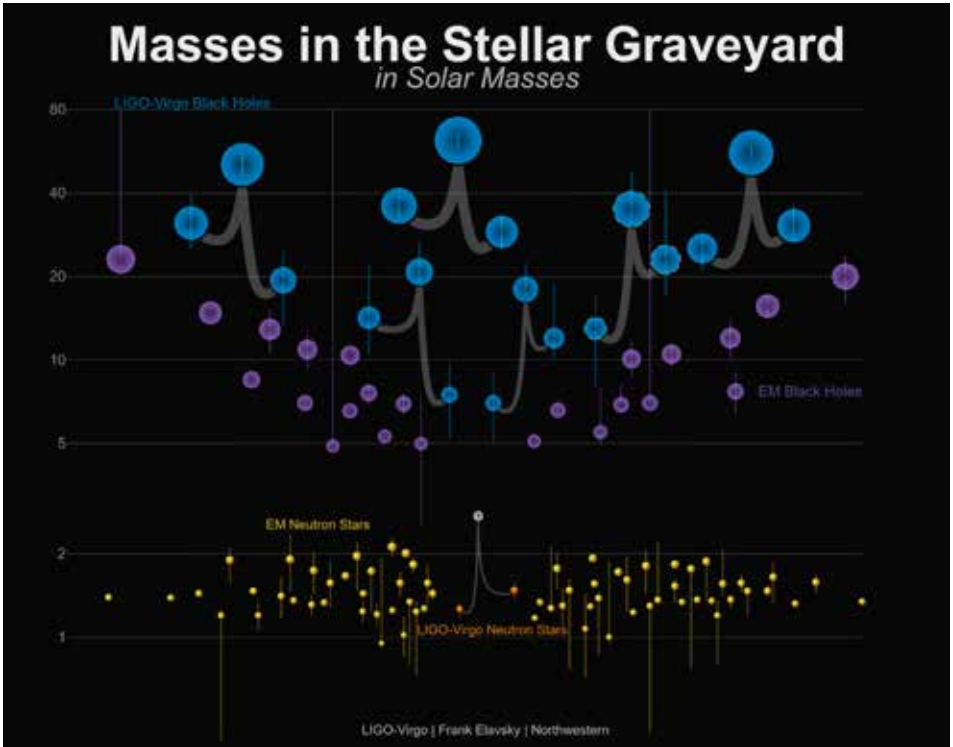
L'astronomie des ondes gravitationnelles confirme son entrée en force dans l'étude du cosmos. Le 15 novembre, on annonçait la découverte d'une sixième détection. L'événement, baptisé GW170608, est le cinquième provenant de la fusion de deux trous noirs, les plus petits détectés jusqu'à présent.

Cette fois, le signal a été observé par les interféromètres LIGO de Livingston (Louisiane) et de Hanford (Washington). Virgo près de Pise en Italie n'était pas encore opérationnel. Le hasard avait bien fait les choses pour les astronomes. Les interféromètres LIGO sortaient à peine d'une maintenance de routine. Alors que celui de Livingston avait repris ses observations depuis quelques jours, les techniciens de Hanford étaient encore en train de faire des tests sur les miroirs lorsque les ondes sont passées. La détection automatique n'était pas enclenchée, mais le signal avait bien été enregistré. Seules manquaient quelques fréquences.

*Les trous noirs binaires découverts par LIGO et Virgo représentés avec leur masse. Les derniers découverts, GW170608 et GW151226, ont des masses comparables à celles des trous noirs des binaires X. Les autres sont plus lourds et pourraient constituer une population inconnue auparavant. (LIGO/Caltech/Sonoma State; Aurore Simonnet)*

Ces résultats ne sortent que maintenant car les équipes étaient trop occupées à analyser la triple observation LIGO-Virgo de la fusion de trous noirs du 14 août (GW170814) et la première – et encore unique – détection de la fusion de deux étoiles à neutrons le 17 août (GW170817).

Les trous noirs de 7 et 12 masses solaires ont fusionné le 8 juin 2017 à 2 h 01 TU pour former un trou unique de 18 masses solaires. L'équivalent d'une masse solaire s'est instantanément dissipée en énergie dans des ondes



gravitationnelles selon la loi bien connue  $E=mc^2$ . Cette puissance prodigieuse explique pourquoi les ondes sont décelables à plus d'un milliard d'années-lumière.

Comme il n'y avait que deux détecteurs, l'incertitude sur la position de la source est grande : une région du ciel de plus de 500 degrés carrés.

Une fois encore, il apparaît que la vitesse de rotation du trou noir résultant est pratiquement celle prévue par les théoriciens, soit 69% de la valeur maximale (au lieu de 70%). Il semble que les axes de rotation des trous noirs avant la fusion n'étaient pas très inclinés sur leur orbite.

GW170608 implique la fusion des deux trous noirs les plus légers observés jusqu'à présent. Ceux de GW151126, un peu plus massifs, « pesaient » 8 et 14 masses solaires. Ce sont des masses analogues à celles de trous

*Comparaison des masses des trous noirs et des étoiles à neutrons.*

*En violet : les trous noirs détectés par leurs émissions électromagnétiques.*

*En bleu : les trous noirs détectés par ondes gravitationnelles.*

*En jaune : les étoiles à neutrons détectées dans le domaine électromagnétique.*

*En orange : les étoiles à neutrons ayant fusionné lors de l'événement GW170817.*

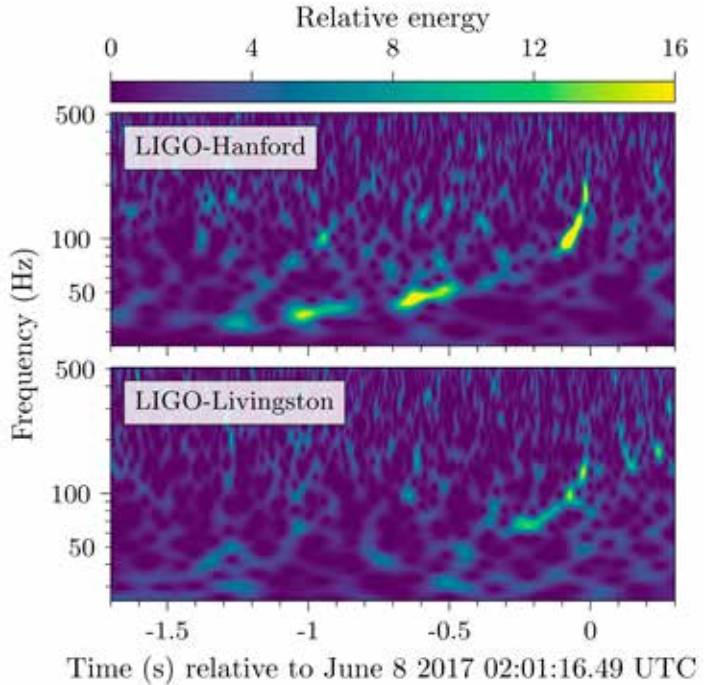
*Les barres verticales représentent les marges d'erreur.*

*(LIGO-Virgo/Frank Elavsky/Northwestern)*

noirs associés à une étoile dans des systèmes doubles que l'on peut observer en rayons X.

Ces observations semblent faire le lien entre ces deux genres de trous noirs. L'avenir dira s'il faut quand même distinguer deux classes de trous noirs, et si elles correspondent

*Intensité des signaux détectés par les deux interféromètres LIGO en fonction du temps (abscisses) et de la fréquence (ordonnées). L'intensité est codée du bleu (faible) au jaune (forte). (LIGO/ Caltech/Sonoma State)*



à des modes de formation différents.

En attendant, les interféromètres subissent des améliorations destinées à augmenter encore leurs performances. Ils ne devraient entrer en service qu'à l'automne 2018 pour la saison « O3 », mais d'ici là quelques périodes de test pourraient permettre de nouvelles découvertes. Et il reste à analyser les données acquises jusqu'à maintenant et, qui sait, peut-être dénicher quelques fusions non encore repérées.

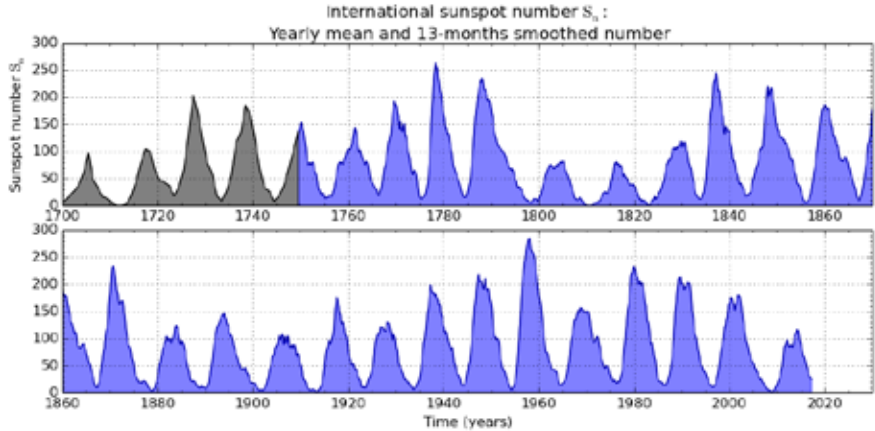
### **Minimums solaires**

En étudiant plus d'un demi-siècle d'observations, les astronomes japonais ont constaté que l'émission micro-onde du Soleil était étonnamment égale lors de chaque minimum d'activité et ce malgré de grosses différences dans les spectres et les niveaux atteints lors des cinq maximums.

L'observation continue des micro-ondes du Soleil se poursuit au Japon depuis 1957 à

l'Université de Nagoya (Toyokawa Branch, the Research Institute of Atmospheric). En 1994, les télescopes ont été déplacés au Campus Nobeyama du NAOJ (National Astronomical Observatory of Japan).

Quatre fréquences ont été utilisées (1, 2, 3,75 et 9,4 GHz) sur quatre antennes différentes (voir figure page suivante) pour exercer ce suivi. À part les observations de routine des taches solaires, de telles séries uniformes consacrées au Soleil sont très rares. Découvrir une tendance s'étendant au-delà d'un seul cycle solaire est important pour comprendre la création et l'amplification des champs magnétiques solaires responsables des taches et de l'activité générale de l'étoile. Les micro-ondes présentent l'avantage de pouvoir être observées au travers des nuages et, en couvrant tout un domaine de fréquences, de fournir des spectres.



SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2017 November 1

*Ci-dessus, l'évolution des taches solaires depuis 1700. (WDC-SILSO)*

*Ci-dessous, les fluctuations de l'émission micro-onde du Soleil en quatre fréquences depuis 60 ans (graphique de droite). À gauche, les télescopes utilisés en 1957 et maintenant. En fond, des images X du Soleil obtenues avec le satellite Hinode. (NAOJ/Nagoya University/JAXA)*

