



L'astronomie dans le monde

50 planètes

Basé sur un communiqué ESO

Les planètes dont la masse est comprise entre une et dix fois celle de la Terre sont appelées des super-terres. Il n'y en a pas dans le système solaire, mais elles semblent très courantes autour d'autres étoiles. Les découvertes de telles planètes dans les zones habitables autour de leurs étoiles sont extrêmement intéressantes puisqu'elles réunissent quelques conditions nécessaires à la vie.

HARPS, l'instrument des « chasseurs de planètes » de l'ESO a permis la découverte d'une cinquantaine de nouvelles exoplanètes et, parmi elles, 16 super-terres, dont l'une est en orbite à la lisière de la zone habitable de son système.

HARPS mesure la vitesse radiale d'une étoile avec une précision extraordinaire. Une planète en orbite autour d'une étoile entraîne des mouvements réguliers et périodiques de celle-ci qui s'approche et s'éloigne d'un observateur situé sur Terre. À cause de l'effet Doppler, ce changement de vitesse radiale induit un décalage du spectre de l'étoile vers des longueurs d'onde plus grandes (redshift) lors de l'éloignement et un décalage vers le bleu (blueshift) lors de l'approche. Ce changement

infime dans la signature spectrale de l'étoile ne peut être mesuré qu'avec un spectrographe de très haute précision.

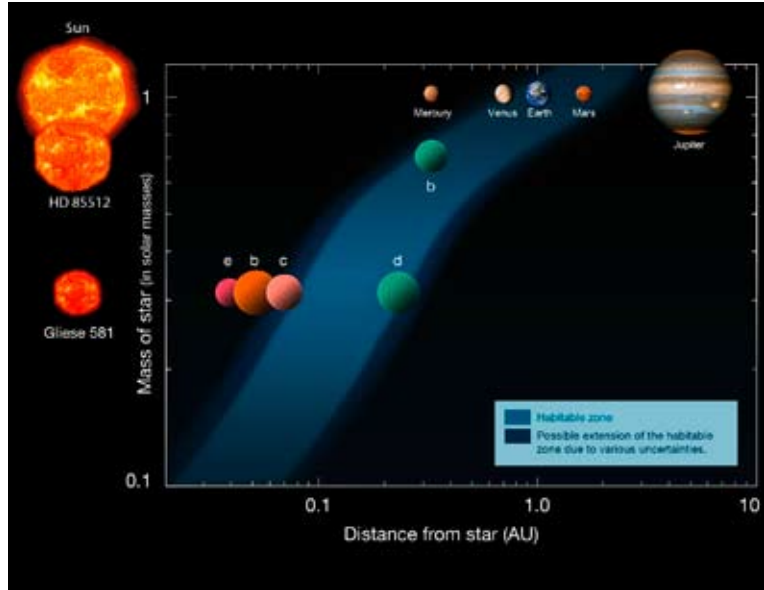
Actuellement, on connaît environ 600 exoplanètes. En plus de celles trouvées en utilisant la méthode des vitesses radiales, plus de 1 200 candidates exoplanètes ont été découvertes par la mission Kepler de la NASA en utilisant une méthode différente – la recherche de la légère baisse de luminosité d'une étoile lorsqu'une planète passe devant elle (transit) et bloque une partie de sa lumière. La majorité des planètes détectées par la méthode des transits sont très éloignées de la Terre. En revanche, les planètes découvertes par HARPS sont situées autour d'étoiles proches. Cela fait d'elles de meilleures cibles pour de nombreux types d'observations complémentaires.

Depuis qu'HARPS a commencé à être utilisé pour observer les étoiles semblables au Soleil par la méthode des vitesses radiales, il y a huit ans, il a permis de découvrir plus de 150 nouvelles planètes. Environ les deux tiers de toutes les exoplanètes connues, dont la masse est inférieure à celle de Neptune, ont été découvertes par HARPS. Ces résultats exceptionnels sont le fruit de plusieurs centaines de nuits d'observation avec HARPS.

En travaillant avec les observations effectuées avec HARPS de 376 étoiles semblables au Soleil, les astronomes ont maintenant considérablement amélioré l'estimation de la probabilité qu'une étoile comme le Soleil héberge des planètes de faible masse (par opposition aux planètes géantes gazeuses). Ainsi, on a pu mettre en évidence qu'environ 40% des étoiles semblables au Soleil ont au moins une planète plus légère que Saturne (cf *Le Ciel*, octobre 2011, p. 314).

Une autre trouvaille est que la majorité des exoplanètes de la masse de Neptune ou moins semblent être dans des systèmes à plusieurs planètes.

Des améliorations du matériel et du logiciel conduiront bientôt au niveau de stabilité et de sensibilité indispensable pour la recherche de planètes rocheuses qui pourraient abriter la vie. La précision croissante des observations permet désormais la détection de planètes avec des masses inférieures à deux fois celle de la Terre. HARPS est maintenant si sensible qu'il peut détecter des amplitudes de vitesse radiale sensiblement en dessous de 4 km/h – la vitesse d'un promeneur. Ces résultats confortent les astronomes dans l'idée qu'ils sont proches de découvrir d'autres petites planètes rocheuses habitables autour d'étoiles semblables au Soleil. De nouveaux instruments sont prévus pour poursuivre cette quête. Il s'agit notamment d'une copie de HARPS qui va être installée sur le télescope national Galileo (Italie) dans les îles Canaries, et qui fera des relevés systématiques d'étoiles dans le ciel de l'hémisphère Nord, ainsi qu'un nouveau et plus puissant « chasseur de planètes »



Position de la zone habitable pour des masses comprises entre celle du Soleil, et un dixième de celle-ci. Les étoiles et planètes de trois systèmes sont représentées : en haut, le système solaire, en bas celui de Gliese 581 et, entre les deux, un nouveau venu, celui de HD 85512. (ESO, selon un dessin de Franck Selsis, université de Bordeaux)

appelé ESPRESSO, qui sera installé sur le VLT de l'ESO en 2016. ESPRESSO atteindra une précision de vitesse radiale meilleure que 0,35 km/h. En comparaison, la Terre génère une vitesse radiale de 0,32 km/h sur le Soleil. Cette résolution devrait ainsi permettre à ESPRESSO de découvrir des planètes de masse proche de celle de la Terre dans la zone habitable des étoiles de faible masse.

Dans un avenir plus lointain, l'instrument CODEX sur le télescope extrêmement grand européen (E-ELT) va encore pousser plus loin cette technique.

Naissance des étoiles

Basé sur un communiqué ESA

Les observations effectuées au moyen du télescope spatial Herschel de l'ESA montrent que les collisions entre galaxies ne jouent qu'un rôle secondaire dans le processus de formation des étoiles. À l'époque où la plupart des étoiles se sont formées, les quantités de gaz en jeu dans les galaxies étaient suffisantes pour engendrer spontanément une production nourrie d'étoiles. Ces résultats, obtenus dans le cadre du programme international GOODS-Herschel, décrivent un scénario de l'évolution des galaxies moins tourmenté que ne le pensaient les scientifiques.

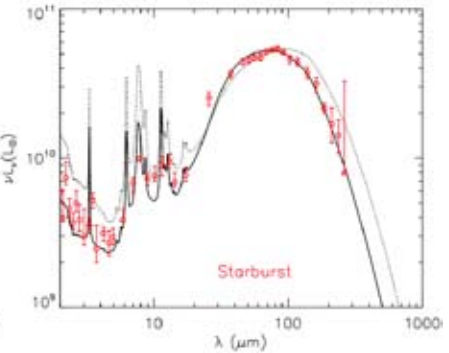
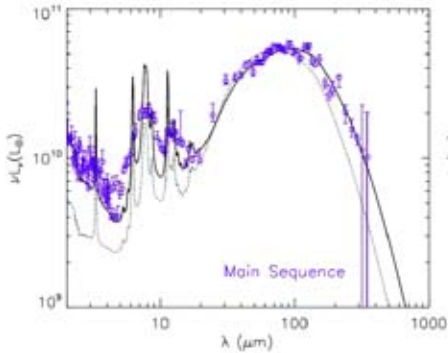
On sait depuis de nombreuses années que le pic de formation des étoiles s'est pro-

Vue d'artiste d'une galaxie alimentée par des filaments de gaz pouvant expliquer le mode « normal » de formation d'étoiles.
(© ESA/AOES Medialab)

duit dans l'univers il y a environ 10 milliards d'années. Certaines galaxies étaient alors très prolifiques et pouvaient donner naissance à 10, voire 100 fois plus d'étoiles que ce que l'on observe dans l'univers proche où seules les galaxies ayant subi des collisions sont capables d'engendrer un taux de production élevé d'étoiles. Dans l'univers lointain, en présence de galaxies très lumineuses, les astronomes privilégiaient également ce scénario de collisions entre galaxies provoquant des flambées (« starbursts »), mais les images obtenues dans l'infrarouge lointain grâce au télescope spatial Herschel viennent contredire ce double scénario.

Les étoiles naissent dans des nuages de poussière qui absorbent leur lumière. Pour les observer on doit faire appel au domaine thermique, et mesurer la chaleur de ces nuages via leur rayonnement infrarouge. Les astrophysiciens ont pointé le télescope spatial Herschel vers deux régions du ciel, GOODS nord et





Distribution d'énergie typique dans deux types de galaxies : à gauche celles qui forment des étoiles de façon tranquille (galaxies dites de la séquence principale) ; à droite celles qui ont une activité plus forte par suite de collisions avec d'autres galaxies.

La différence principale se voit aux alentours de la longueur d'onde de 8 microns. Lors d'une fusion de galaxies la formation stellaire s'emballe dans des zones compactes et suscite un intense rayonnement ionisant qui détruit les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Ces molécules ont un spectre caractéristique vers 8 microns, spectre qui est donc affaibli en cas de fusion.

Les galaxies de la séquence principale émettent une radiation ionisante plus diluée qui préserve les HAP et l'on voit donc mieux l'émission à 8 microns.

(© Elbaz, CEA Saclay, service d'astrophysique)

sud, puis ils ont pris dans cette direction les images les plus profondes du ciel jamais réalisées en infrarouge. Ils ont ainsi pu observer 2 000 galaxies et couvrir 80% de l'âge du cosmos. En comparant la quantité de lumière infrarouge libérée dans différentes longueurs d'onde par ces galaxies, ils ont pu montrer que les galaxies ayant un taux de formation d'étoiles très élevé n'avaient pas pour autant subi de collision.

La violence des collisions intergalactiques engendre une production d'étoiles

massives, soudaine et très concentrée, ce qui provoque la destruction de certaines molécules plus fragiles et engendre une large part du rayonnement infrarouge moyen émis par la galaxie. En étudiant le rapport entre ce rayonnement infrarouge moyen et le rayonnement infrarouge lointain, les chercheurs ont constaté que ce rapport était proportionnel à la taille des régions de formation d'étoiles. Bien que très lumineuses, les galaxies présentent le même rapport universel que les galaxies proches « normales » : elles n'ont donc pas subi de destruction de ces particules plus fragiles sous l'effet d'une collision. En superposant ces résultats obtenus dans l'infrarouge avec les observations faites dans d'autres longueurs d'ondes (dans l'ultraviolet pour les galaxies lointaines grâce au télescope spatial Hubble et dans le domaine radio pour les galaxies proches), les chercheurs ont étudié plus précisément la distribution des étoiles dans ces galaxies de forte luminosité. Alors que dans le cas des starbursts, la production d'étoiles se concentre en une région de la galaxie assez circonscrite, il s'avère que ces galaxies de forte luminosité ont une distribution régulière dans l'espace. Le processus de collision entre galaxies serait donc un phénomène minoritaire.

Ces observations permettent de dégager un mode de formation stellaire universel et une relation finalement très simple : plus une galaxie contient du gaz, plus elle donne naissance à des étoiles. Les collisions sont nécessaires

à la production de taux élevés d'étoiles seulement dans les galaxies qui n'ont plus assez de gaz. Cela s'applique aux galaxies actuelles qui, après avoir formé des étoiles pendant plus de 10 milliards d'années, ont utilisé la majorité de la matière première gazeuse. Les starbursts tiennent donc un rôle assez anecdotique dans le processus de formation des étoiles à l'échelle de l'histoire de l'univers. Ces phénomènes violents sont l'exception qui confirme la règle, et non un scénario concurrent au processus de formation normal, beaucoup moins chaotique.

Galaxies naines et matière sombre

Les théories actuelles favorisent un univers fait pour 4 pour cent de matière normale – celle dont sont constitués les gens et les étoiles – et 21 pour cent de matière sombre. Le reste est encore plus mystérieux, et les théoriciens parlent d'énergie sombre qui aurait comme vertu d'accélérer l'expansion de l'univers.

Le modèle cosmologique standard (dit « lambda-CDM ») postule que la matière sombre existe sous la forme de particules élémentaires « lentes », autrement dit « froides ». Ces hypothétiques particules CDM (Cold Dark Matter) ont dû se former dans le premier milliardième de seconde du Big Bang. Elles seraient très difficiles à détecter car elles n'interagiraient que très faiblement avec la matière normale. Diverses expériences tentent de les révéler, dans des mines du Yorkshire, avec le télescope spatial Fermi et, surtout, au CERN avec le Large Hadron Collider (LHC), tout cela en vain jusqu'à présent. Les résultats négatifs du LHC sont particulièrement ennuyeux car l'accélérateur géant reproduit justement les conditions du premier milliardième de seconde du Big Bang et on comptait sur lui pour régler la question.

Cela veut-il dire que le modèle cosmologique standard est faux ? Peut-être pas si l'on accepte un argument apporté par l'étude des galaxies naines satellites de notre galaxie. Ces galaxies sont probablement composées essentiellement de matière sombre, avec juste quelques étoiles. Elles sont donc très peu lu-

mineuses, ce qui explique la difficulté de leur étude.

Les théoriciens ont créé des simulations numériques de leur formation en se basant sur les hypothèses actuelles concernant la matière sombre. Il apparaît que les galaxies naines devraient être bien plus nombreuses et plus petites que ce que l'on observe.

De deux choses l'une : soit les galaxies naines se sont bien formées comme l'indiquent les simulations, mais de violentes explosions de supernovæ les ont bouleversées – les quatre petits pour cent de matière normale auraient alors une importance surprenante sur la structure de la matière sombre ; soit la matière sombre froide n'existe pas et les prédictions du modèle standard ne tiennent pas.

Une solution à ce dilemme serait que la matière sombre froide créée durant le premier milliardième de seconde de l'univers n'existe pas, et qu'il s'est formé au contraire de la matière sombre chaude dans les minutes qui ont suivi. La WDM (Warm Dark Matter) remplace ainsi la CDM.

Les particules de WDM sont plus légères et plus rapides que celles de CDM. Reprenant les simulations avec cette hypothèse, on trouve un halo de galaxies naines correspondant à ce que l'on observe dans la réalité. Moyennant cette nouvelle hypothèse, le modèle standard peut être maintenu.

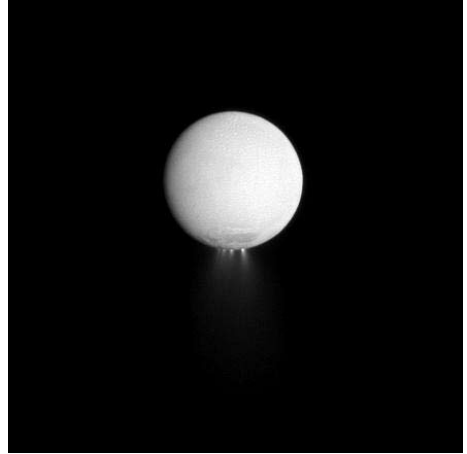
Le problème de la détection de ces particules légères se pose avec acuité. Le LHC qui recrée les conditions de l'univers dans la première fraction de seconde est totalement inadapté pour cela. La particule la plus probable comme constituant la WDM est le « neutrino stérile ». Sa détection demanderait des détecteurs de rayons X beaucoup plus sensibles que ceux dont on dispose actuellement. Les observations des étoiles dans les premiers temps de l'univers par un télescope spatial comme le James Webb Space Telescope seraient un test efficace. Si la WDM est bien la matière sombre qui lie les galaxies, il ne devrait rien y avoir car les galaxies ne se seraient pas encore formées.

Encelade et l'eau de Saturne

*Basé sur un communiqué de
l'Observatoire de Paris-Meudon*

L'eau dans l'atmosphère supérieure des planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune) et du satellite Titan a été découverte en 1997 par l'observatoire infrarouge ISO de l'ESA, puis étudiée par le satellite submillimétrique SWAS de la Nasa. Son origine était jusqu'ici particulièrement énigmatique. En effet, les atmosphères des planètes extérieures contiennent bien des traces d'eau dans leurs couches profondes, suffisamment tièdes, mais l'eau se condense en nuages dans les couches moyennes et ne peut migrer dans les couches supérieures. La présence d'eau dans ces couches supérieures doit donc provenir d'une source extérieure.

Les nouvelles observations, obtenues avec le spectromètre submillimétrique HIFI d'Herschel, sont fondamentalement différentes de celles pratiquées dans le passé. Alors que les spectres obtenus par SWAS et ISO ne présentaient que des raies en émission de l'eau dans l'atmosphère de Saturne, Herschel a montré des raies d'absorption, ce qui révèle la présence de molécules d'eau placées devant la planète par rapport à la Terre, dans un environnement plus froid. La première indication de cette absorption a été obtenue durant l'été 2009 puis elle a été confirmée en 2010 à plusieurs longueurs d'onde différentes.



***Les panaches de vapeur d'eau au pôle sud d'Encelade, observés par la sonde Cassini.
(NASA/JPL/Space Science Institute)***

L'explication est que l'eau détectée par Herschel réside au sein d'un anneau de matière tenu alimenté par les panaches du pôle sud du satellite Encelade. Ces panaches et geysers dont on estime la production à 250 kilos d'eau par seconde avaient été découverts en 2005 sur les images transmises par la sonde Cassini-Huygens. La structure s'étend à une distance du centre de Saturne équivalente à environ quatre fois son rayon.

Une faible partie (seulement 3 à 5 %) de l'eau éjectée plonge dans les hautes couches de l'atmosphère de la planète, alors qu'une proportion plus grande atteint les satellites et les anneaux. La quantité d'eau qui arrive jusqu'à Saturne est cependant suffisante pour expliquer l'abondance de cette molécule observée



***Encelade au sein de son vaste anneau de gaz, observés en lumière visible par la sonde Cassini.
(NASA/JPL/Space Science Institute)***

dans sa haute atmosphère. Encelade apparaît donc comme le principal pourvoyeur d'eau dans la haute atmosphère de Saturne, ce qui constitue le premier exemple connu d'un satellite modifiant la composition chimique de sa planète-mère.

En revanche, l'eau émise par Encelade ne semble pas être en mesure d'expliquer les quantités d'eau dans l'atmosphère de Titan, la plus grosse lune brumeuse et glacée de Saturne, où une autre source d'eau semble donc requise. L'investigation continue...

Hartley 2 et l'eau terrestre

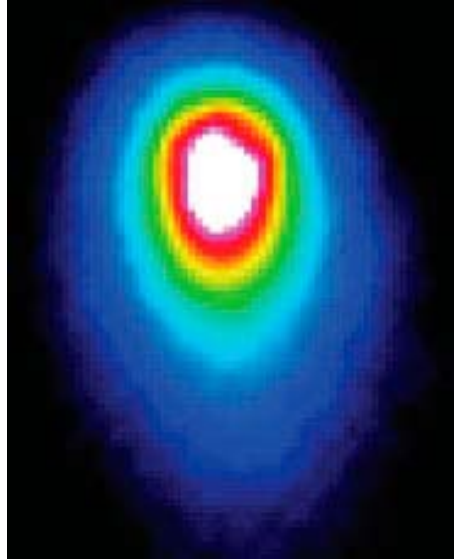
Basé sur un communiqué Observatoire de Paris-Meudon

D'où vient l'eau des océans ? La Terre était sèche et chaude à l'origine et l'eau aurait été apportée par le bombardement de corps célestes. Comment ? Et par quel type d'objets : météorites, astéroïdes, comètes ? C'est tout l'enjeu du débat que viennent enrichir les dernières données d'observation de la comète Hartley 2 obtenues par le télescope spatial infrarouge européen Herschel.

Un bon outil de diagnostic physico-chimique est le rapport relatif entre les abondances de deux molécules : l'eau ordinaire H₂O (deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène) et l'eau mi-lourde HDO où un atome de deutérium (deux fois plus lourd) remplace un d'hydrogène. Dans les océans, le rapport deutérium à hydrogène D/H vaut environ 0,0156 % : un chiffre similaire à celui trouvé dans les météorites issues de la ceinture des astéroïdes entre Mars et Jupiter. Dans les six comètes étudiées jusque-là, dont les célèbres Halley et Hale-Bopp, le rapport semble deux fois supérieur à celui trouvé sur Terre. Ceci tend à identifier les astéroïdes comme la principale source de l'eau terrestre. Les comètes n'auraient pas contribué pour plus de 10 %.

La nouvelle étude ramène pourtant ces dernières sur le devant de la scène : les comètes auraient bel et bien pu contribuer à l'eau terrestre.

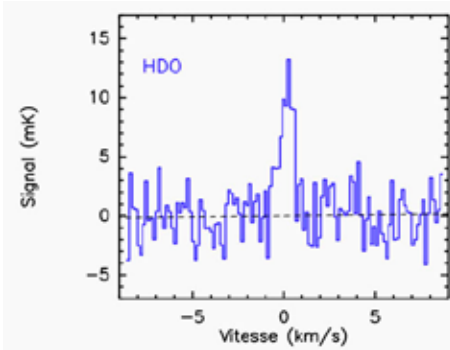
Hartley 2, découverte en 1986 est ensuite réapparue dans le ciel à quatre reprises. Sa



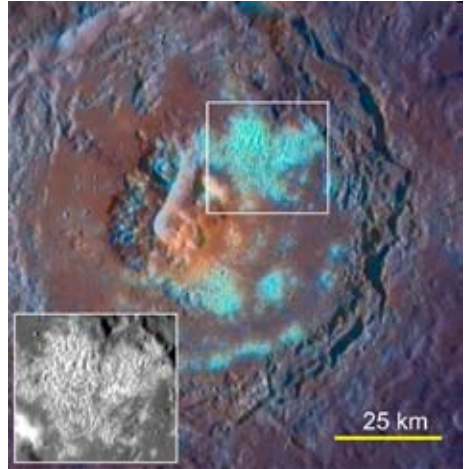
La comète Hartley 2 vue le 25 octobre 2010 à 17,5 millions de kilomètres de distance et à 70 micromètres de longueur d'onde, par l'observatoire spatial Herschel. (PACS / Herschel / ESA / Observatoire de Paris)

dernière incursion est intervenue en 2010. Le 20 octobre, elle est passée au plus près de la Terre, à 16 millions de kilomètres. Le télescope Herschel a ainsi pu la scruter le 17 novembre à l'aide du spectromètre HIFI (Heterodyne Instrument for Far Infrared), le meilleur instrument actuellement disponible pour détecter l'eau dans l'espace. Le rapport deutérium/hydrogène relevé est de 0,016 %. Une valeur semblable à celle des océans.

Ce résultat inattendu reflète sans doute la provenance spécifique de la comète Hartley 2 qui revient aujourd'hui tous les six ans près du Soleil : très probablement née au sein de la ceinture de Kuiper, au-delà de Neptune, elle a pu en être éjectée il y a quelques dizaines ou centaines de milliers d'années. D'où sa composition différente. De leur côté, les six comètes précédemment étudiées se seraient formées près des planètes géantes du système solaire. Leurs orbites perturbées les ont ensuite



Spectre de l'eau mi-lourde HDO, forme particulière de l'eau, détectée dans la comète Hartley 2 le 17 novembre 2010, à environ 0,59 mm de longueur d'onde avec l'instrument HIFI de l'observatoire spatial Herschel. (HIFI / Herschel / ESA / LESIA / Observatoire de Paris)



Sur Mercure, le fond du grand cratère Tyagaraja (97 km) montre des rassemblements de « creux ». (NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington)

conduites à rejoindre le nuage d'Oort à plusieurs dizaines de milliers de fois la distance Terre-Soleil, ou plusieurs centaines de milliards de kilomètres du Soleil.

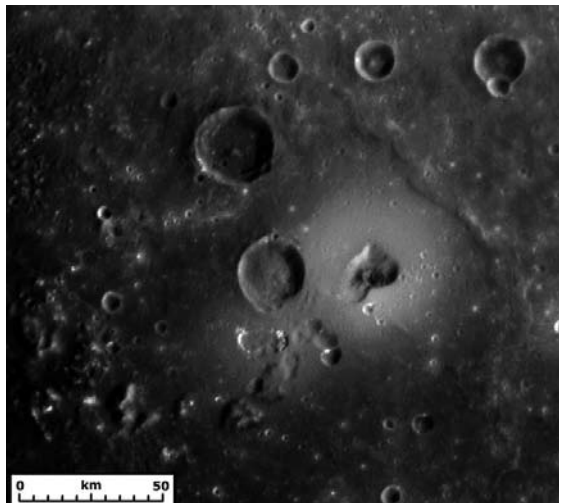
Le réservoir de petits corps présentant une eau semblable à celle de la Terre s'avère, en définitive, plus grand que prévu : il s'étend bien au-delà de la ceinture des astéroïdes, entre Mars et Jupiter, et irait jusqu'à la ceinture cométaire de Kuiper, au-delà de Neptune.

L'eau des océans pourrait donc avoir été apportée jadis par une pluie d'icebergs cosmiques.

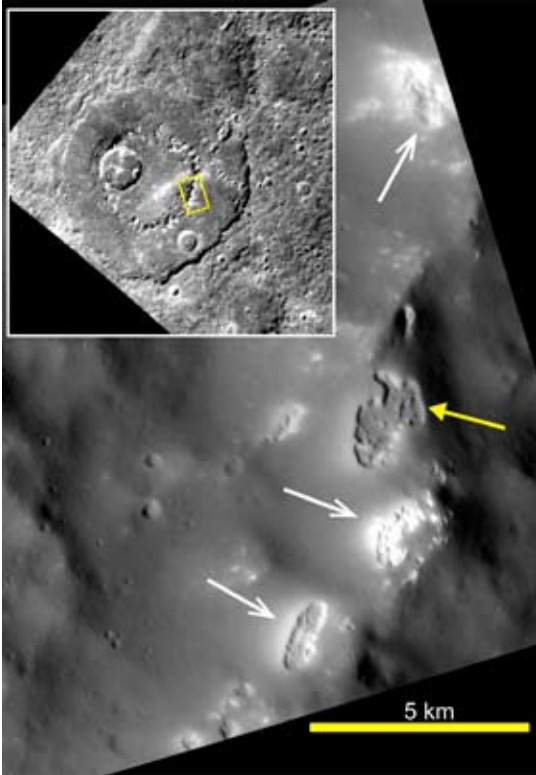
Surprenant Mercure

Les scientifiques traitent les données envoyées par la sonde Messenger (MErcury Surface, Space Environment, GEochemistry, and Ranging) ont présenté une série de résultats obtenus au cours des premières orbites.

Depuis longtemps, les scientifiques se demandaient s'il y avait des dépôts volca-



Le plus grand volcan identifié sur Mercure. Dans son cratère de forme irrégulière on peut voir des bouches volcaniques. (NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington)

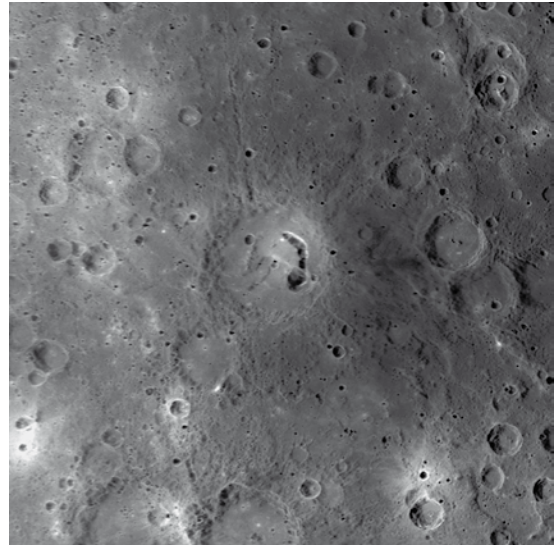


**« Creux » sur une chaîne de montagne de Mercure dans un cratère anonyme de 170 km de diamètre
(NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington)**

niques à la surface de la planète. Messenger montre effectivement la présence de vastes plaines volcaniques couvrant 6% de la surface de la planète autour des régions polaires. Ces dépôts sont typiques des coulées de lave.

Les images prises par Messenger montrent des bouches volcaniques mesurant jusqu'à 25 kilomètres de diamètre et qui sont peut-être à l'origine de gigantesques coulées de lave très chaude qui ont creusé des vallées que l'on peut voir à la surface de la planète.

D'étonnantes petites dépressions peu profondes et de forme irrégulière défient les théo-



**Chaîne de puits d'effondrement dans le cratère Picasso de Mercure
(NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington)**

ries géologiques. On les désigne comme de simples « creux », par opposition aux « puits » que l'on peut également voir sur Mercure. Ces creux semblent très communs sur la planète. L'estimation de leur vitesse d'apparition suggère qu'il pourrait s'en former actuellement.

La mesure des abondances chimiques devrait permettre de tester les modèles de formation de la planète et les interactions entre la surface et l'atmosphère très ténue. On a déjà trouvé qu'il y a plus de potassium que prévu et que la composition chimique de Mercure est plus proche qu'on ne le croyait de celle de Vénus, de la Terre et de Mars.

Les résultats de l'analyse de la magnétosphère de Mercure, un plasma dont le principal composant est le sodium, montre qu'elle ne constitue pas un obstacle sérieux aux bourrasques du vent solaire et laisse la planète sujette à des épisodes extrêmes de « météo spatiale ».