

L'astronomie dans le monde



Schéma de la Voie lactée entourée de son halo d'étoiles et d'amas globulaires. (NASA, ESA, A. Feild/STScI)

Combien pèse la Galaxie ?

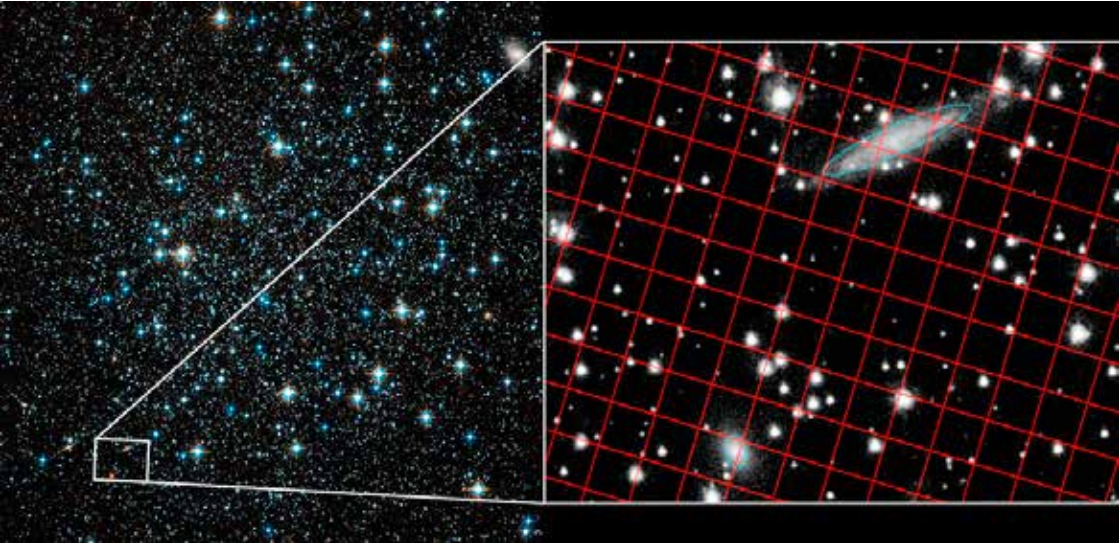
La Voie lactée groupe entre deux et quatre cents milliards d'étoiles et pas mal de gaz et de poussières, mais ce n'est que la partie émergée de l'iceberg. Elle contient une grande quantité de matière noire, invisible, qui ne se manifeste que par son interaction gravifique.

Les estimations de la masse totale variaient grandement, allant de 800 à 4 500 milliards de masses solaires. Les télescopes spatiaux Hubble et Gaia ont permis de préciser cette masse totale en étudiant les mouvements des amas globulaires qui évoluent autour de la Voie lactée comme des abeilles auprès d'une ruche. Leurs grandes distances et leur répartition tout autour de la Galaxie en font les traceurs idéaux pour cette étude. Leur vitesse est déterminée par les lois de Newton. Plus la masse de la galaxie est grande, plus les amas

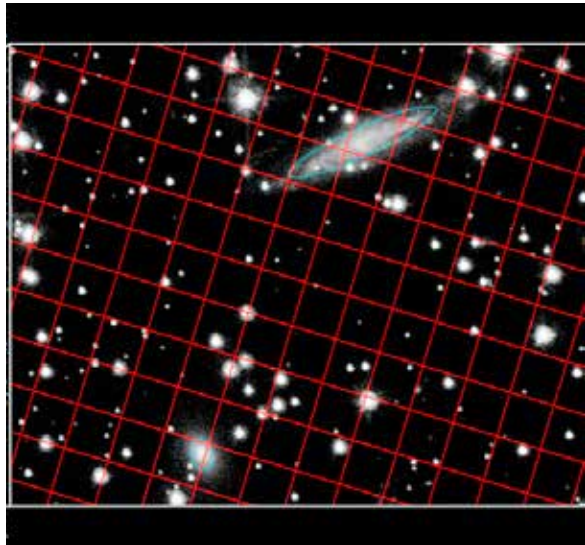
doivent tourner vite pour ne pas tomber vers elle.

L'estimation résultant de ces mesures est de 1 500 milliards de fois la masse du Soleil, dont la majorité doit être de la matière noire. Cette valeur met la Voie lactée dans une bonne moyenne parmi ses consœurs.

La plupart des mesures antérieures ne donnaient que la vitesse radiale des amas globulaires, ce qui est insuffisant pour en décrire la cinématique. On a besoin d'une troisième dimension, les mouvements latéraux. C'est ce que peuvent fournir les deux télescopes spatiaux. Gaia donne les mouvements propres des amas pas trop éloignés, et ce, sur tout le ciel. Le télescope Hubble, avec son champ très petit et une base de temps d'une dizaine d'années fournit des mouvements propres d'un petit nombre d'amas plus éloignés. Les astronomes ont ainsi pu exploiter les observations par Gaia



*L'image ci-dessus, prise par le télescope spatial Hubble, montre une portion de l'amas globulaire NGC 5466. Les deux agrandissements de droite proviennent d'images prises à dix ans d'intervalle. Un examen attentif permet de voir un déplacement général des étoiles de l'amas par rapport à la grille de coordonnées. Les galaxies ne bougent pas étant donné leur grande distance, des dizaines de millions d'années-lumière à comparer aux 52 000 années-lumière de l'amas.
(NASA, ESA, S.T. Sohn, J. DePasquale/STScI)*



de 34 amas distants de moins de 65 000 années-lumière et celles obtenues avec Hubble de 12 amas jusqu'à 130 000 années-lumière.

Une modélisation de la distribution de la matière dans la Voie lactée basée sur celle observée dans d'autres galaxies a alors permis de déterminer la masse de notre galaxie.

Image composite, optique et X de SDSS J1430+1339. (Chandra X-ray Center)

rayonne beaucoup plus que ne le laissaient croire les observations optiques. Le quasar a bien faibli durant les dernières dizaines de milliers d'années mais tout au plus d'un facteur 25.

Les observations de Chandra mettent en évidence du gaz chaud à l'intérieur de la bulle ce qui peut signifier que le vent généré par le rayonnement du quasar, et qui a probablement créé les bulles, continue de souffler.

On connaît de nombreux exemples de bulles galactiques de toutes dimensions, engendrées par les jets de particules relativistes émanant de trous noirs. La puissance de ces jets domine celle du rayonnement, contrairement au cas de « Teacup ».

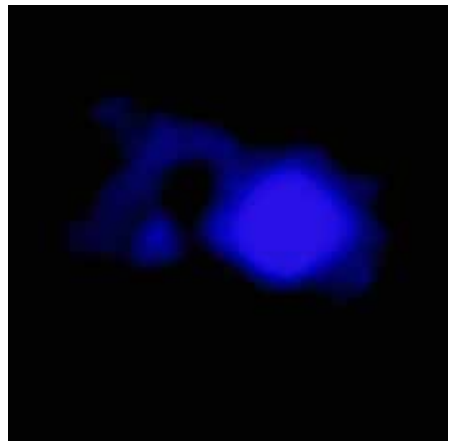
SDSS J1430+1339

Le quasar SDSS 1430+1339 a reçu le sobriquet de « Teacup » en raison de son anse caractéristique. Celle-ci est un anneau visible en rayons X et dans le domaine optique qui entoure une bulle géante située à environ 30 000 années-lumière du trou noir supermassif central de la galaxie. Des observations radio montrent une bulle semblable de l'autre côté du quasar.

En confrontant la luminosité du quasar avec l'état d'ionisation du gaz de l'anse, les astronomes concluent que le quasar avait dû faiblir considérablement – d'un facteur compris entre 50 et 600 – au cours des 40 à 50 000 dernières années, autant dire qu'il était mourant.

De nouvelles observations réalisées avec les télescopes spatiaux XMM-Newton et Chandra relativisent ces conclusions. Le spectre X montre que la lumière du quasar est fortement obscurcie par un nuage de gaz. Il

Image X de SDSS J1430+1339. (Chandra X-ray Center)



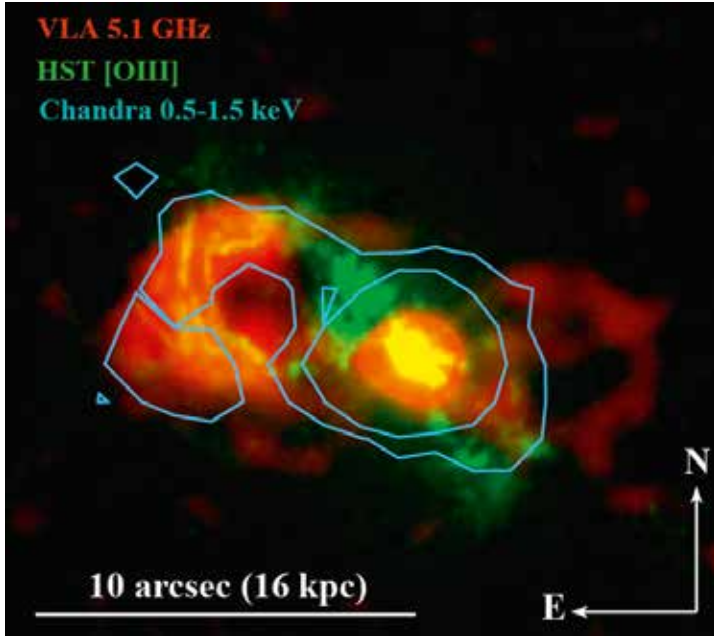


Image composite de Teacup assemblant les données radio (rouge) et visible ([O III] en vert). Les contours en cyan donnent la distribution de l'émission X. (Lansbury et al., 2018)

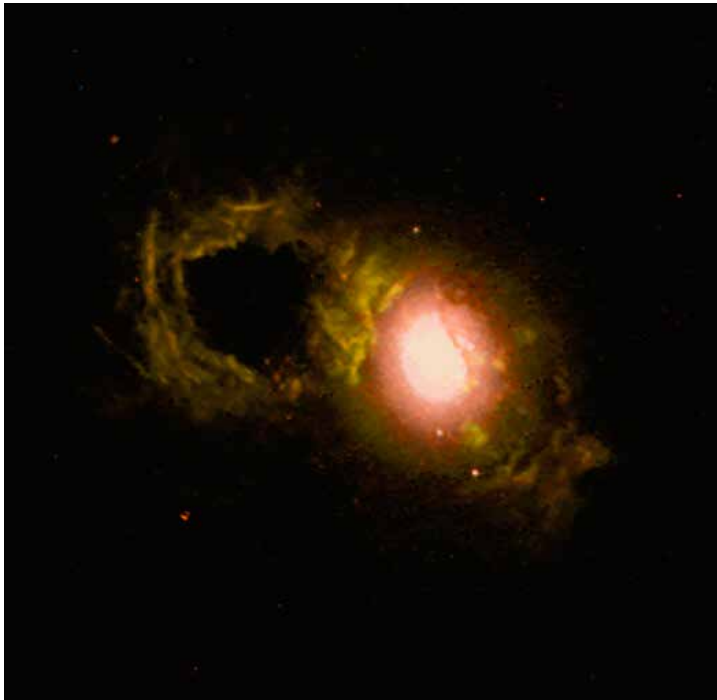


Image optique de SDSS J1430+1339. (Chandra X-ray Center)

Les comètes bilobées

Basé sur un communiqué CNRS/INSU

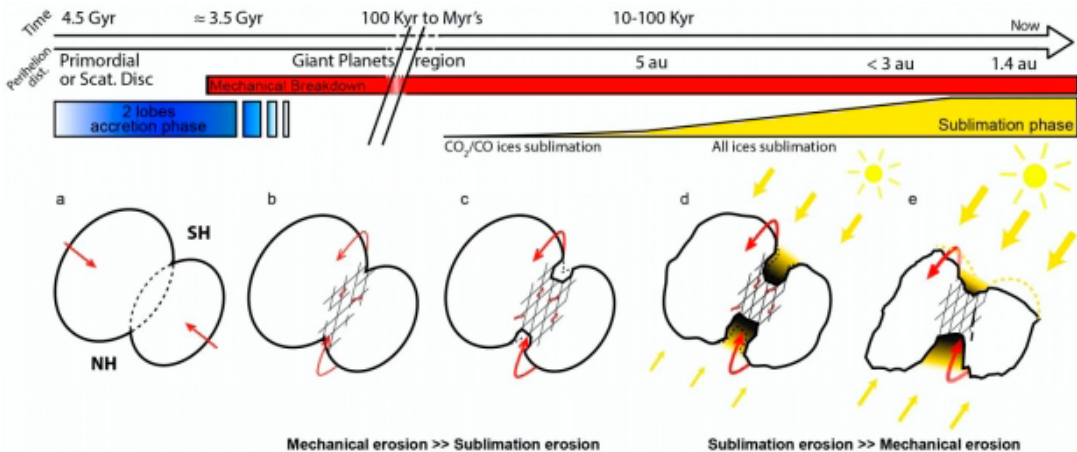
En étudiant la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko, cible de la mission Rosetta, les chercheurs ont montré que les comètes de forme bilobée évoluent principalement par érosion mécanique due aux mouvements de cisaillement d'un lobe par rapport à l'autre.

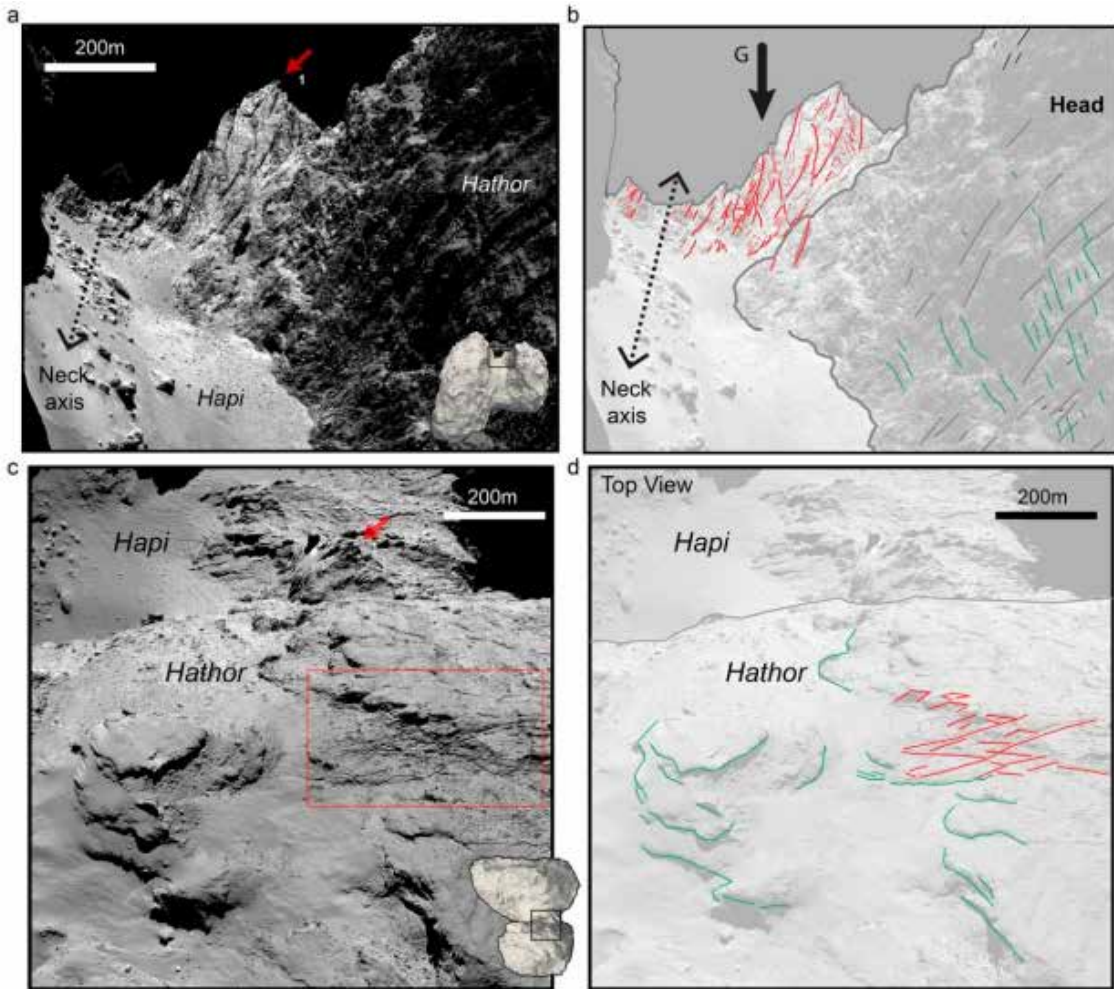
Les planètes du Système solaire se sont formées il y a environ 4,5 milliards d'années, par accréation progressive de corps plus petits, d'une taille variant de 1 km à plus de 1 000 km. Les comètes sont des petits corps glacés de taille kilométrique, qui ont survécu à cette période d'accréation. Les comètes ont depuis été conservées loin du Soleil, au-delà de Neptune, où la température ne dépasse pas quelques dizaines de degrés Kelvin. Dans cet environnement glacé, elles ont pu conserver les propriétés physiques et chimiques du Système solaire primordial. Elles contiennent donc des informations essentielles pour comprendre les origines du Système solaire et étudier les mécanismes de formation et la composition des planètes. Par ailleurs, les molécules organiques que renferment les comètes sont importantes pour comprendre le rôle qu'elles ont pu jouer dans le développement de la vie sur Terre.

La comète 67P/Churyumov-Gerasimenko, cible de la mission Rosetta et objet de cette étude, provient de la ceinture de Kuiper, située au-delà de Neptune, où elle est restée depuis sa formation dans un environnement très froid. La forme bilobée du noyau de 67P résulte de l'accréation de deux objets, qui a probablement eu lieu pendant le premier milliard d'années suivant la formation du Système solaire. Les formes bilobées sont courantes pour les comètes et se retrouvent sur plus de la moitié de celles qui ont été visitées par des sondes spatiales. Les images récentes de Ultima Thulé prises par la sonde New Horizons montrent que cette forme bilobée

Chronologie de l'évolution de la forme de 67P, après l'accréation de ses deux lobes, montrant l'importance des deux processus complémentaires d'érosion mécanique et d'érosion par sublimation des glaces. Loin du Soleil, l'érosion mécanique structure et fragilise le cou, avec l'apparition d'un réseau de fractures par cisaillement et de failles. Près du Soleil, l'érosion par sublimation creuse préférentiellement cette zone du cou, déjà fragilisée.

(Matonti et al. 2019; Nature Geoscience)





pourrait aussi être commune pour de nombreux objets de la ceinture de Kuiper.

Les comètes sont des corps glacés, qui s'érodent et perdent de la matière lorsqu'elles s'approchent du Soleil. L'étude des processus d'érosion est fondamentale pour comprendre comment ils modifient la forme globale du noyau, et ainsi séparer l'inné de l'acquis pour déterminer dans quelle mesure les comètes contiennent encore des indices du Système solaire primordial. L'érosion du noyau cométaire par sublimation des glaces à sa surface est étudiée depuis les années 1950, mais le lien entre érosion et forme globale du

Images de la caméra OSIRIS montrant des fractures et des failles formées par cisaillement (en rouge) se propageant à la surface et dans l'intérieur du noyau, au niveau du cou (a-b : vue en coupe ; c-d : vue en plan).

(Matonti et al. 2019; Nature Geoscience)

noyau n'est toujours pas bien compris. Quant à l'importance des processus et des structures géologiques dans l'érosion du noyau, c'est un sujet nouveau, très peu étudié.

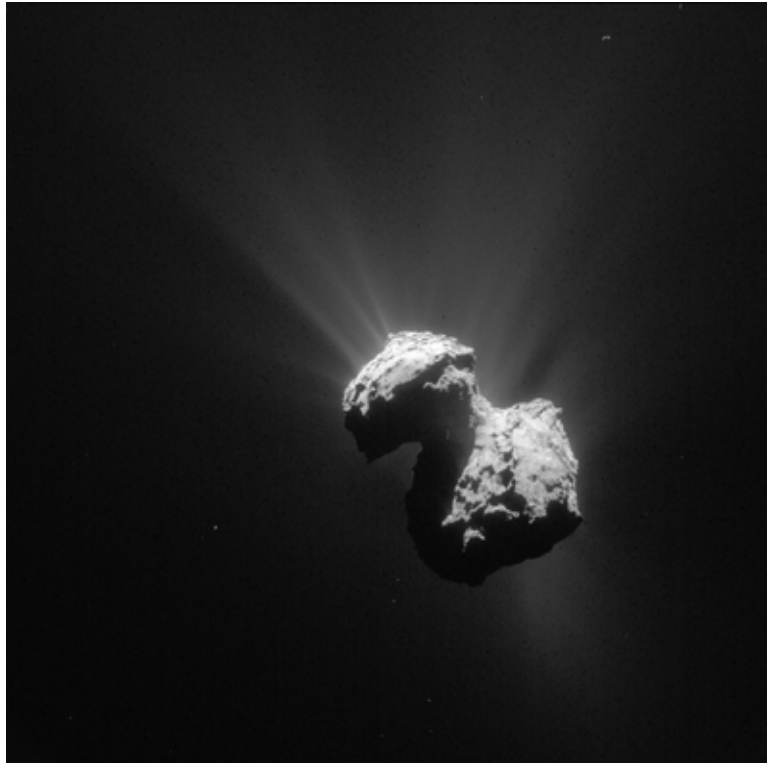
La nouvelle étude s'appuie sur les images de la comète 67P, prises par les caméras OSIRIS de la sonde spatiale Rosetta qui est restée deux ans en orbite autour d'elle. Ces images démontrent l'importance de l'érosion mécanique pour les noyaux cométaires de forme bilobée. Cette érosion résulte de leur forme particulière, qui entraîne des déformations par cisaillement au niveau du cou, la partie joignant les deux lobes. L'étude montre la présence d'un réseau de fractures et de failles formées par cisaillement, sur des échelles décamétriques à hectométriques. Ce réseau se propage à l'intérieur du noyau, à plus de 500 mètres de profondeur, dans un milieu mécaniquement homogène et cassant.

Ce nouveau mécanisme d'érosion mécanique est quasi indépendant de la distance au Soleil, puisque lié à la géométrie particulière des comètes bilobées, et a pu ainsi se poursuivre pendant plusieurs milliards d'années, lorsque 67P était dans la ceinture

de Kuiper, au-delà de Neptune. Ce processus pourrait affecter les autres comètes bilobées, ainsi que tous les petits corps glacés de forme bilobée de la ceinture de Kuiper. C'est un processus important, qui modèle la forme globale du noyau et sa structure interne, même loin du Soleil, lorsque la sublimation de la glace d'eau est négligeable.

Les implications sont importantes puisque l'érosion mécanique pourrait expliquer la fragmentation de certains noyaux cométaires, dont le cou aurait été fragilisé par les fractures, ou encore certains sursauts d'activité à grande distance du Soleil, résultant de l'ouverture de nouvelles fractures et le glissement de failles dans le noyau. Ces découvertes montrent aussi que, contrairement à ce que nous pensions, les petits corps bilobés peuvent être géologiquement actifs, même s'ils résident aux confins du Système solaire.

***La comète 67P/
Churyumov-
Gerasimenko vue par
Rosetta le 7 juillet
2015 d'une distance
de 154 km.
(ESA/Rosetta/
NAVCAM, CC BY-SA
IGO 3.0)***



Gl411

Basé sur un communiqué CNRS/INSU

Scruter les atmosphères des planètes extra-solaires, en particulier des planètes ressemblant à la Terre, est un objectif crucial de l'astronomie des prochaines décennies. Cela permettra notamment de comprendre leurs points communs et leurs différences avec les planètes du Système solaire. Cependant, des observations directes permettant de caractériser les planètes extraterrestres de type terrestre ne seront possibles dans les années à venir que si la cible est une des exoplanètes les plus proches de nous. Il est donc crucial aujourd'hui de découvrir nos plus proches voisins.

Les astronomes s'intéressent en particulier aux planètes en orbite autour des étoiles naines rouges, de petites étoiles dont la masse est moins de la moitié de celle du Soleil. Pourquoi chercher des planètes autour de ce type d'étoiles ? Les naines rouges représentent 80% des étoiles de notre galaxie, et sont donc majoritaires parmi les étoiles entourant le Système solaire. De plus, la moindre masse de ce type d'étoiles facilite la détection de planètes à la fois plus petites (et donc potentiellement de type terrestre), et situées dans la zone habitable de leur étoile (où les conditions seraient favo-

rables à l'apparition de la vie), c'est-à-dire des planètes qui auraient donc des points communs avec la Terre.

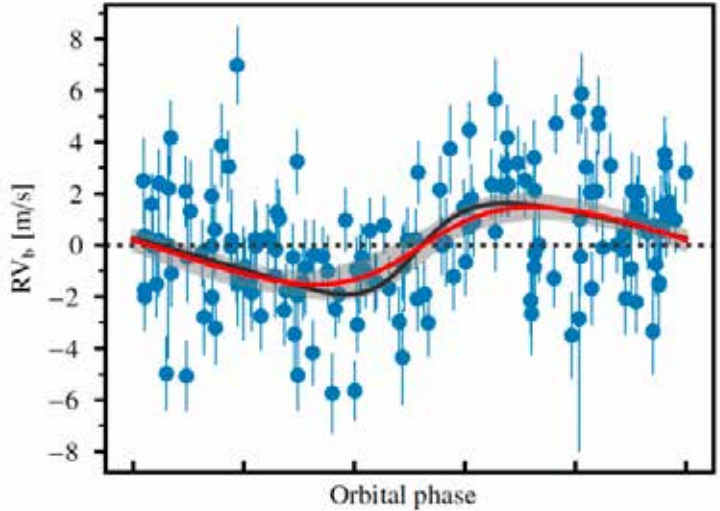
Pour cela des chercheurs utilisent depuis 12 années le spectrographe SOPHIE, installé sur le télescope de 193 cm de l'observatoire de Haute-Provence. C'est ce même télescope qui a permis la découverte de la toute première planète extra-solaire en 1995. Parmi les étoiles observées, 155 mesures ont été accumulées sur Gl411, le quatrième système stellaire le plus proche de nous, situé à seulement 8 années-lumière. En analysant les données, il se révèle clairement qu'une planète est en orbite autour de cette étoile.

En mesurant très précisément les vitesses de l'étoile, SOPHIE a détecté de très petits mouvements provoqués par la masse de la planète sur son étoile au cours de son orbite. Les chercheurs ont ainsi pu conclure à l'existence d'une planète autour de Gl411. Nommée Gl411b, cette planète a une masse trois fois supérieure à celle de la Terre, et tourne autour de l'étoile en 13 jours. Elle est également très proche de cette dernière, puisque la distance qui sépare les deux astres est de 0,08 UA : Gl411b est cinq fois plus proche de son étoile que Mercure ne l'est du Soleil.

Le télescope de 1,93 m de l'observatoire de Haute-Provence, sur lequel est monté le spectrographe SOPHIE qui a permis la découverte de l'exoplanète Gl411b. (CNRS/OHP)



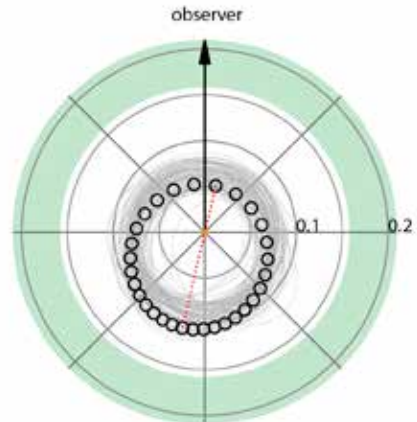
Figure montrant les variations périodiques de la vitesse radiale de Gl411, indiquant la présence d'une planète en orbite autour de l'étoile.



Comme l'étoile Gl411 est plus froide que le Soleil (sa température de surface est de 3 300°C, contre 5 500°C pour le Soleil), Gl411b ne reçoit de l'étoile que 3,5 fois plus d'énergie que la Terre n'en reçoit du Soleil. Cela la place en deçà de la zone habitable, et il est probable que cette planète ait davantage de points communs avec Vénus qu'avec notre planète.

Environ 200 exoplanètes ont déjà été détectées et caractérisées à l'observatoire de Haute-Provence. Gl411b est la plus proche (et la moins massive) de ces planètes. Sa proximité et sa luminosité en font une cible idéale pour de futures études destinées notamment à étudier son atmosphère. De telles études semblent être à la portée de l'instrumentation qui sera installée sur l'ELT (Extremely Large Telescope), le prochain télescope géant de l'ESO, en cours de construction au Chili et opérationnel d'ici 2025. Gl411b constituera alors (avec Proxima Centauri b, découverte en 2016) l'une des deux cibles les mieux adaptées à une caractérisation par imagerie directe. Elle permettra notamment d'aider à comprendre le comportement des planètes juste en deçà de la zone habitable, et de mieux saisir les limites de celle-ci.

L'orbite de Gl411b est représentée par des petits cercles. Le grand axe est en rouge, la zone habitable en vert. (Diaz et al., 2019)





Hippocampe

Basé sur un communiqué NASA

La plus petite lune connue de Neptune, Hippocampe, n'a été découverte qu'en 2013. Initialement dénommée S/2004 N1 puis Neptune XIV, elle tire son nom officiel d'une créature marine des mythologies grecque et romaine, mi-cheval, mi-poisson et utilisée par Neptune ou Poséidon comme bête d'attelage.

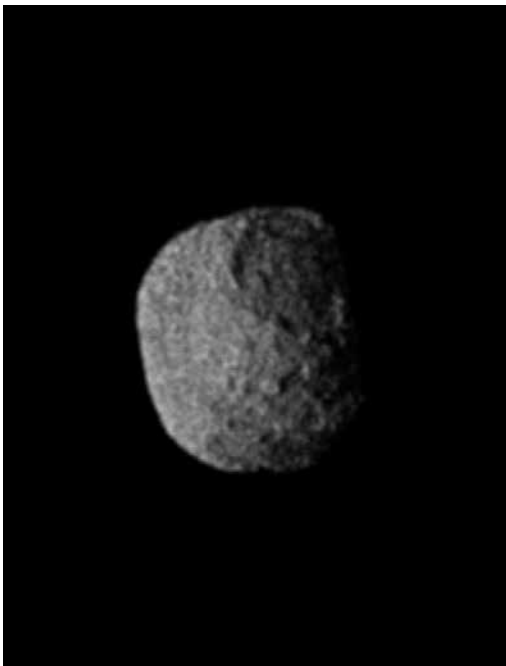
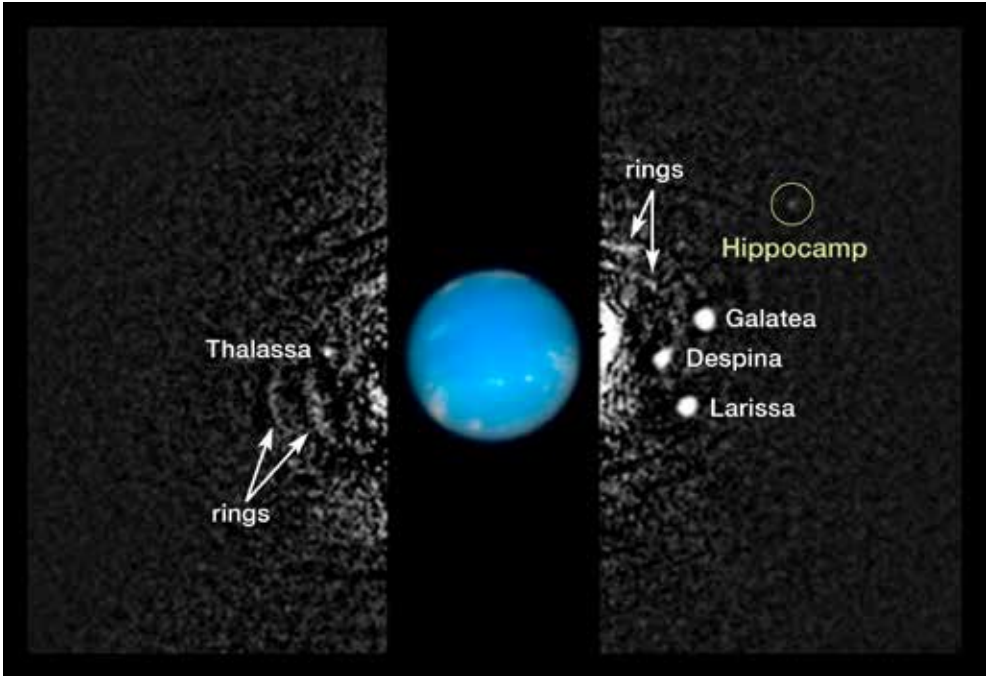
L'orbite, très proche de celle de Protée, a beaucoup intrigué les astronomes. Protée est la plus grosse lune après Triton et n'aurait pas dû permettre la présence d'un petit objet à 12000 kilomètres d'elle. Hippocampe aurait dû se faire éjecter ou entrer en collision avec Protée dans les premiers temps du Système solaire.

On pense qu'il y a eu effectivement une collision, et qu'Hippocampe est le résultat de

Impression d'artiste montrant Hippocampe devant Neptune. En réalité les images de Hubble ne permettent pas de déceler le moindre détail sur le petit satellite. (ESA/Hubble, NASA, L. Calçada)

cette collision, un petit fragment de Protée de 34 kilomètres de diamètre.

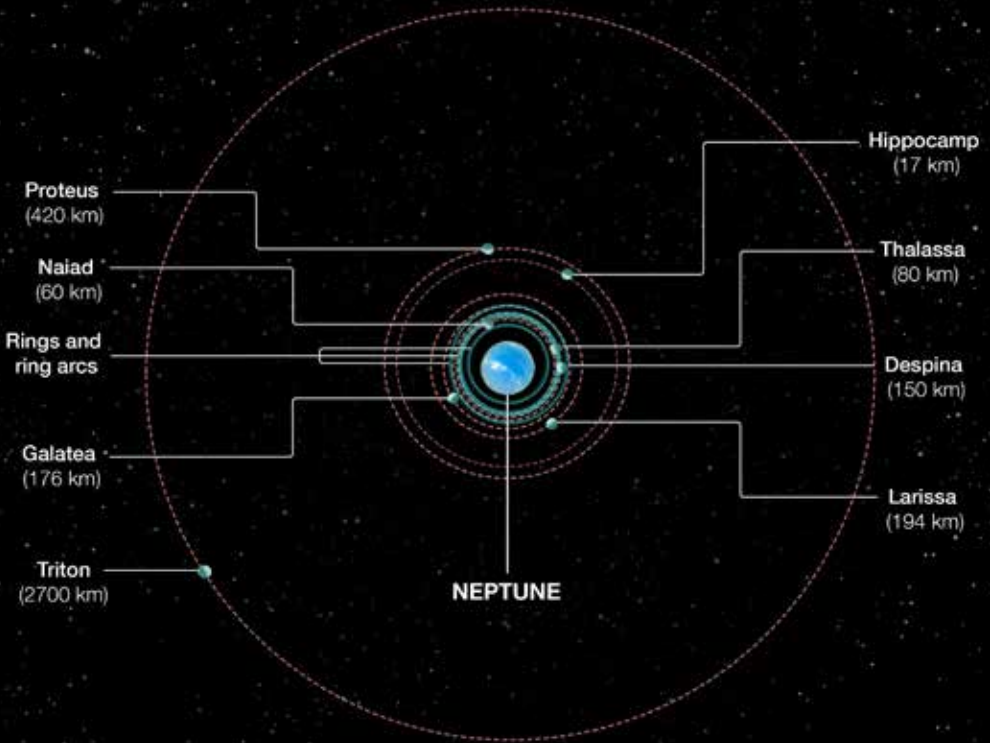
Les lunes « intérieures » de Neptune comme Protée ne se sont pas formées en même temps qu'elle et sont probablement le résultat de la coalescence de matériaux postérieure à la capture de Triton. Ce dernier a dû se trouver sur une orbite très excentrique, créer des perturbations chaotiques parmi les lunes plus basses, les faire s'entrechoquer et les réduire en miettes. Après circularisation de l'orbite de Triton, le disque de débris s'est recomposé en



▲ L'image noir et blanc prise par Hubble en 2009 montre les anneaux et de petits satellites de Neptune, dont Hippocampe (avant sa découverte). La photo couleur a également été prise par Hubble la même année.

(NASA, ESA, M. Showalter/SETI Institute)

◀ Protée, la deuxième plus grosse lune de Neptune après Triton a été découverte en 1989 par Voyager 2. Curieusement on connaissait déjà une deuxième lune, Néréïde. Protée avait échappé aux observations car elle est plus proche de Neptune et plus sombre que Néréïde.
(Voyager 2/NASA)



Orbite des satellites intérieurs de Neptune. Leurs diamètres vont de 17 à 420 kilomètres. Les dimensions ne sont pas à l'échelle réelle. (NASA, ESA, A. Feild/STScI)

formant une deuxième génération de satellites, les satellites actuels, dont Protée. On estime que l'orbite de celui-ci était plus basse de 8 000 kilomètres qu'actuellement. Les interactions de marée l'ont fait s'éloigner et, en cours de route, il a subi de multiples impacts qui ont créé des cratères et éjecté des fragments en orbite autour de Neptune. L'un de ces fragments ne serait autre que Protée.

La présence d'un gros cratère, révélée par Voyager 2 en 1989, semble confirmer cette théorie. L'impact qui aurait pu désagréger Protée est peut-être à l'origine d'Hippo-

campe, un satellite de troisième génération de Neptune.

Les estimations de population des comètes suggèrent que d'autres lunes du Système solaire ont été heurtées, désintégrées et réaccrétées plusieurs fois. Le couple Protée-Hippocampe en est l'illustration.

Chaos dans le Système solaire

Basé sur un communiqué CNRS/INSU

À cause de la nature chaotique du Système solaire, les astronomes estimaient jusqu'à maintenant qu'il était impossible de calculer la position et l'orbite des planètes au-delà de 60 millions d'années dans le passé. Une équipe internationale vient de faire sauter cette barrière en montrant que l'analyse de données géologiques permet de remonter à l'état du Système solaire plus loin dans le passé.

Contrairement à l'image que l'on peut s'en faire, les planètes ne tournent pas autour du Soleil sur des orbites fixes, réglées précisément comme sur un planétaire mécanique. Tous les objets du Système solaire influencent le mouvement des autres, un peu comme s'ils étaient connectés par des ressorts : une petite perturbation en un point du système se répercute sur l'ensemble des planètes, qui tendent à revenir à leur position initiale. Ainsi, les orbites des planètes sont animées d'un mouvement de lente rotation autour du Soleil, et oscillent autour de leur valeur moyenne.

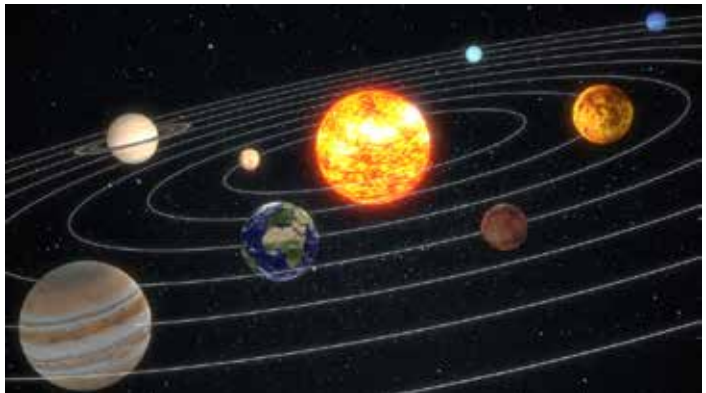
Depuis 1989, les astronomes savent que ces oscillations sont irrégulières, ou chaotiques, et que leurs calculs ne peuvent pas permettre de remonter au-delà de 60 millions d'années (Ma) pour comprendre l'état passé du Système solaire. Les incertitudes dues à la nature chaotique du Système solaire sont en effet multipliées par 10 tous les 10 Ma. Néanmoins, cette limite vient d'être levée grâce à des

données géologiques qui ont permis de repousser l'horizon de prédictibilité du Système solaire jusqu'à 200 Ma.

Comment la géologie peut-elle nous renseigner sur l'astronomie ? Grâce aux célèbres paramètres de Milankovitch : une partie des modifications climatiques du passé sont dues aux variations de l'insolation à la surface terrestre résultant des modifications de son orbite. Or, ces changements climatiques passés ont laissé des traces sur Terre, dans les strates géologiques. À partir des observations stratigraphiques, il est donc possible de déterminer les paramètres de l'orbite terrestre, et d'en déduire l'état des autres planètes.

Les chercheurs ont ainsi pu extraire des données quantitatives sur l'état passé du Système solaire grâce à deux importants forages dans des couches géologiques du continent nord-américain. Leurs résultats montrent par exemple qu'il y a 200 Ma l'excentricité de la Terre oscillait avec une période de 1,7 Ma, contre une période de 2,4 Ma aujourd'hui. Ceci constitue aussi une preuve géologique de la nature chaotique du Système solaire : s'il était régulier, on retrouverait la même période que celle observée actuellement.

L'équipe de recherche espère maintenant affiner ces résultats grâce à l'étude d'autres dépôts géologiques en haute latitude qui permettraient de donner une information complémentaire sur les variations de l'orientation des orbites planétaires.



*Le Système solaire.
(Y. Gominet/
IMCCE/NASA)*

Opportunity

Les images des pages 310-311 montrent un panorama de 360 degrés pris par la caméra Pancam d'Opportunity du 13 mai au 10 juin 2018. Ce paysage désertique de la Vallée de la Persévérance est celui où s'est arrêté définitivement le rover martien, sur les flancs de la muraille du cratère Endeavour (voir *Le Ciel*, mars 2018, 261).

L'une des images est en fausses couleurs pour faire mieux ressortir les différences de terrain.

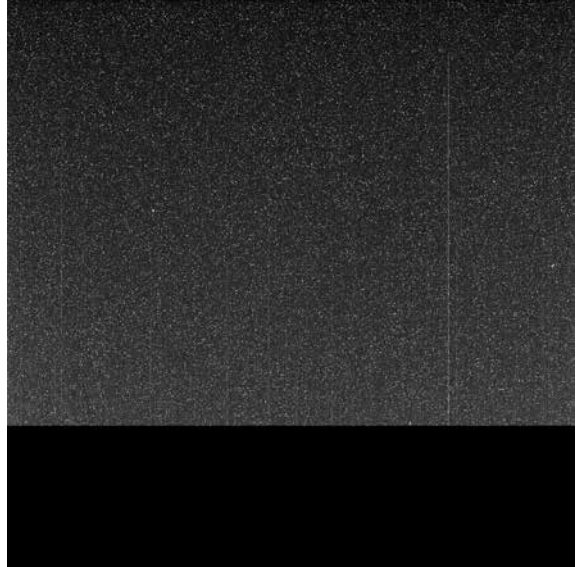
À droite du centre on peut voir au loin le bord du cratère Endeavour. Plus à gauche les traces de roues du rover serpentent depuis l'horizon jusqu'aux formations géologiques qu'il avait pour cibles. Aux extrémités droite et gauche on voit le fond de la vallée et du cratère.

Le panorama est composé de 354 images prises au travers de trois filtres différents centrés à 753 nanomètres (infrarouge proche), 535 nanomètres (vert) et 432 nanomètres (violet). Quelques pièces de la mosaïque sont en noir et blanc car le rover a été pris de court par la tempête de poussière et n'a pas eu le temps de terminer les séries laborieuses de prises de vue.

Après huit mois d'efforts pour reprendre contact avec Opportunity, la mission a été déclarée officiellement terminée le 13 février.

Deux autres images ont pu encore être prises par Opportunity mais seules les vignettes (ou « thumbnails »), ci-contre ont eu le temps d'être transmises. Elles étaient destinées à estimer la transparence du ciel (le paramètre « tau ») en photographiant le Soleil avec des filtres de longueurs d'onde de 440 et 750 nanomètres. En temps normal ces images auraient été surexposées mais, avec un tau de 10,8, le Soleil est à peine visible.

(NASA/JPL-Caltech/Cornell/ASU) ►



▲ *Cette image incomplète prise le 10 juin 2018 (« sol » 5111 de la mission) est la dernière transmise par Opportunity de la vallée de la Persévérance vers le satellite MRO (Mars Reconnaissance Orbiter) afin d'être relayée vers la Terre. Cette image venant de l'œil gauche de Pancam est noire car la tempête de poussière bloquait la lumière solaire. Les points blancs ne sont que du bruit. La transmission a été interrompue, laissant une bande totalement noire.*

(NASA/JPL-Caltech/Cornell/ASU)

