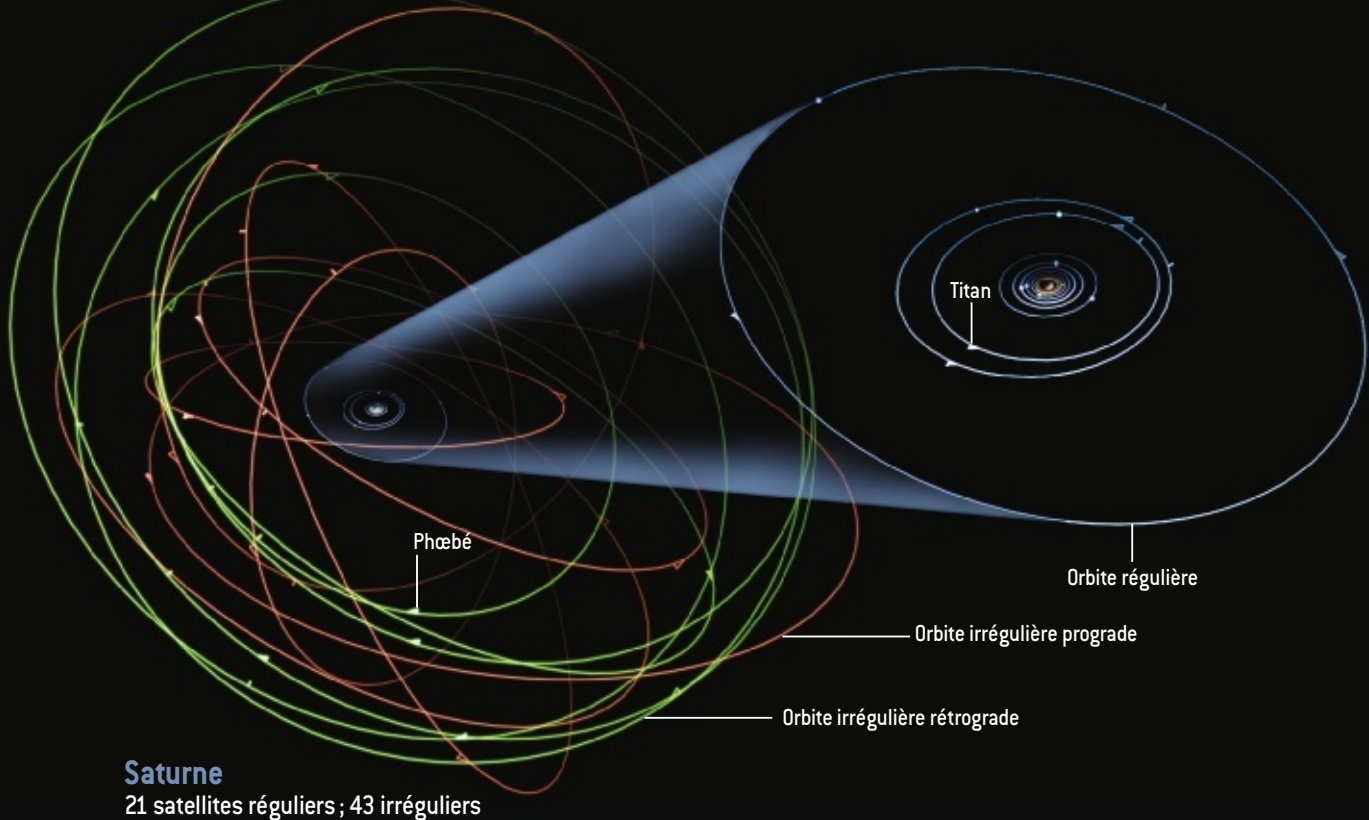


L'étendue du cortège de satellites de Saturne était encore mal connue il y a quelques années. Ses membres se répartissent en deux catégories. Les lunes régulières (*en bleu*), comme Titan et Japet, sont relativement proches de la planète et évoluent quasiment dans son plan équatorial. Les lunes irrégulières, comme Phœbé et nombre de petits corps dépourvus de

nom, sont bien plus éloignées et ont des orbites orientées de diverses façons. Certaines tournent dans le même sens que Saturne sur elle-même (*progrades, en rouge*), d'autres tournent dans le sens inverse (*rétrogrades, en vert*). Des systèmes similaires entourent chacune des planètes géantes (*seule une partie de l'ensemble des lunes est représentée ici*).



initial. De fait, lorsqu'on simule en remontant le temps les orbites des membres d'une famille, celles-ci se fondent en une seule. Ainsi, une fraction importante des satellites observés serait en fait des lunes de seconde génération.

Semblables à des résidus de comètes

David Nesvorný, de l'Institut de recherche du Sud-Ouest à Boulder, dans le Colorado, et ses collègues ont modélisé la destruction des lunes par des collisions. Ils ont montré qu'aujourd'hui, il est rare qu'une lune entre en collision avec une autre (ou avec une comète). C'est pourquoi l'existence de familles suggère une époque ancienne où les populations de satellites irréguliers ou de comètes étaient bien plus importantes que maintenant, et les collisions plus fréquentes.

Au-delà des orbites, les connaissances des astronomes ont progressé sur d'autres aspects des satellites irréguliers. La plupart de ces lunes sont si petites qu'on ne peut pas apprendre grand-chose sur leur composition. Ni leur masse ni leur spectre de lumière réfléchie, ou couleur, ne peuvent être déterminés avec précision. Tommy Grav, du Centre d'astrophysique Smithsonian à Harvard, et des collègues ont cependant découvert que les lunes d'une même famille tendent à avoir la même couleur. Cela suggère une parenté de composition entre les membres d'une famille, et appuie l'hypothèse de la fragmentation d'un corps parent.

L'un des rares satellites irréguliers que les astronomes connaissent en détail est Phœbé, une lune de Saturne observée par la sonde *Cassini* en juin 2004. *Cassini* a obtenu des images de haute résolution montrant une grande densité de cratères à la

surface de Phœbé; la sonde y a aussi détecté par spectroscopie la présence de glaces d'eau et de dioxyde de carbone. Les deux lunes de Neptune observées par la sonde *Voyager 2* en 1989, Néréide et Triton, ont elles aussi des surfaces gelées. Cela indique que ces corps se sont formés relativement loin du Soleil, comme les comètes.

Les satellites irréguliers de Jupiter sont noirs comme de la suie et semblent dépourvus de glace, probablement parce qu'ils sont plus proches du Soleil. Ils ressemblent à des résidus de comètes qui auraient perdu leurs composés volatils au fil du temps.

Les propriétés des satellites irréguliers – en particulier leurs orbites rétrogrades – suggèrent que ces corps ne se sont pas formés *in situ*. Il s'agirait plutôt de matériaux de construction planétaire inutilisés, comme les astéroïdes ou les comètes, qui gravitaient à l'origine autour du Soleil et

ont été d'une façon ou d'une autre capturés par les planètes. Le mécanisme de capture est encore mal compris. Dans les interactions complexes de la gravité du Soleil et des planètes, les astéroïdes et les comètes sont attirés sur d'éphémères orbites autour des planètes géantes. Ils sont alors comme des feuilles dans un tourbillon du vent d'automne : ils entrent dans la danse, font quelques dizaines de tours et sont éjectés de façon imprévisible.

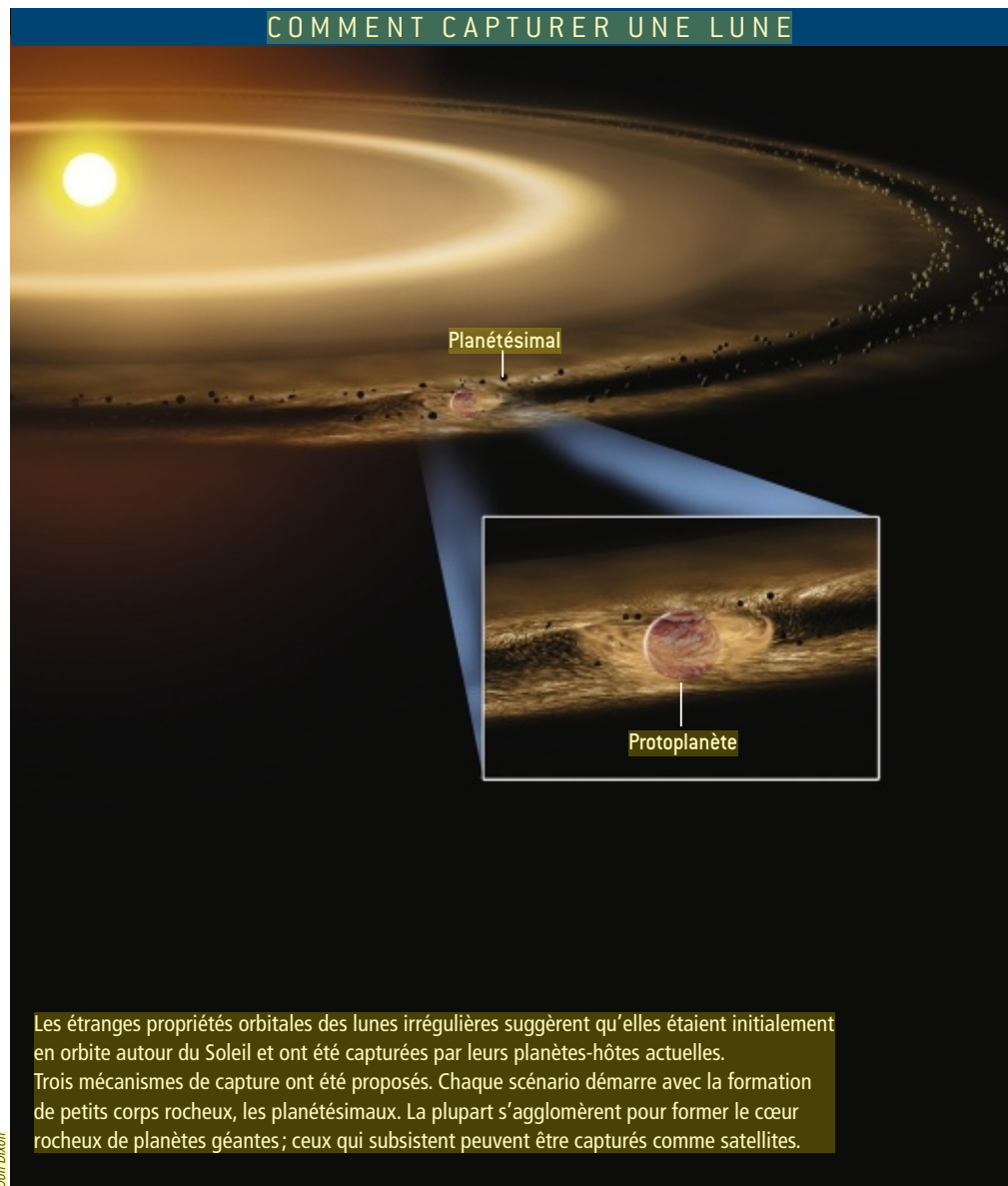
Des corps capturés par aérofreinage ?

La célèbre comète D/Shoemaker-Levy 9 (le D signifie « défunte ») en est un exemple. Après s'être placée sur une orbite temporaire autour de Jupiter au long du XX^e siècle, elle s'est écrasée la géante gazeuse en 1994. Si elle n'avait pas connu cette fin prématurée, elle aurait été éjectée sur une orbite héliocentrique en quelques centaines d'années. On connaît ainsi plusieurs corps qui ont survécu à une capture temporaire par Jupiter et qui sont retournés tourner autour du Soleil.

Mais pour qu'un corps soit définitivement capturé d'une orbite héliocentrique jusqu'à une orbite fixe et stable autour d'une planète, il doit perdre une partie de son énergie initiale, faute de quoi il s'échappera à nouveau. Or il n'existe à l'heure actuelle aucun mécanisme efficace de dissipation d'énergie dans le Système solaire. La capture des satellites a donc dû avoir lieu il y a longtemps, à une époque où le Système solaire avait des propriétés différentes.

Dans les années 1970, les théoriciens ont proposé trois mécanismes possibles de capture, intervenus pendant ou peu après la formation des planètes.

D'après le premier mécanisme, proposé par les Américains James Polack, Joseph Burns et Michael Tauber, les lunes ont perdu de l'énergie par friction en traversant les gigantesques atmosphères qu'avaient alors les géantes gazeuses embryonnaires. Jupiter et Saturne, contrairement à la Terre et aux autres planètes telluriques, sont constituées principalement d'hydrogène et d'hélium. Elles se sont sans doute formées à partir d'un noyau de roche et de glace de plusieurs dizaines de masses terrestres, qui a drainé de grandes quantités de gaz du disque protoplanétaire. Avant de prendre leur forme compacte actuelle, ces planètes ont pu passer par



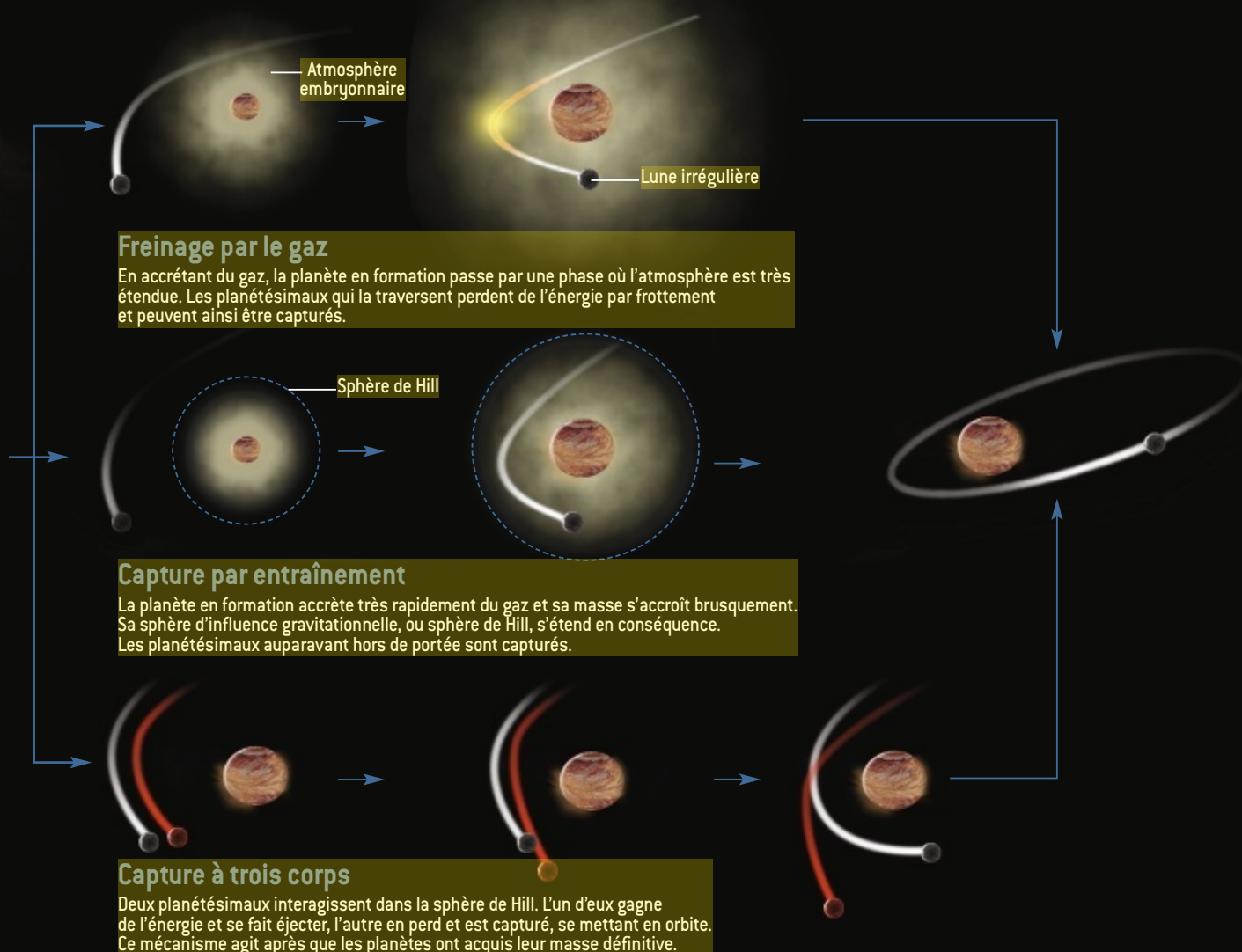
une phase durant laquelle leurs atmosphères étaient des centaines de fois plus étendues qu'aujourd'hui.

Trop grand, trop petit ou juste bien : comme Boucle d'Or, un astéroïde ou une comète de passage aurait eu trois destins possibles. Trop petit, il se serait consumé dans l'atmosphère ; trop grand, il aurait traversé sans entrave ; de la bonne taille, il aurait été ralenti, puis capturé. Cet effet d'« aérofreinage » est aujourd'hui utilisé par de nombreuses sondes planétaires pour se placer en orbite.

Un problème posé par le modèle du freinage atmosphérique est qu'il n'explique pas la présence de satellites irréguliers autour d'Uranus et de Neptune. Ces planètes ne sont pas des géantes

gazeuses, mais plutôt des géantes glacées, dominées par la roche et la glace avec un modeste vernis d'hydrogène et d'hélium. En raison de leur éloignement et de la plus faible densité de matériaux dans les régions externes du disque protoplanétaire, leurs cœurs ont grossi plus lentement et ont atteint la masse critique nécessaire à la captation du gaz alors que la nébuleuse solaire avait déjà été largement dissipée : Neptune et Uranus n'ont jamais eu d'atmosphères étendues. Dès lors, comment pourrait-il y avoir eu freinage par le gaz ?

Le deuxième mécanisme de capture proposé se déroule aussi pendant la croissance planétaire. L'accrétion du gaz sur le cœur rocheux des géantes gazeuses



aurait entraîné un accroissement rapide et spectaculaire de leur masse dans un processus auto-amplifié, d'où une croissance soudaine de la sphère de Hill de chaque planète. Les astéroïdes et autres objets se trouvant dans le voisinage au moment de cette croissance brutale se sont trouvés piégés dans le champ de gravité de la planète. Ce mécanisme de capture a été proposé pour la première fois par Thomas Heppenheimer et Carolyn Porco, à l'Institut de technologie de Californie. Ils l'ont appelé, un peu maladroitement, capture par entraînement (*pull down*).

Cependant, comme le freinage gazeux, ce mécanisme a des difficultés à rendre compte des lunes d'Uranus et Neptune, puisqu'aucune des deux planètes n'est

passée par une phase de croissance brutale. La plupart des modèles suggèrent que ces deux planètes ont grandi progressivement, en accumulant des planétésimaux de la taille d'astéroïdes et de comètes durant des dizaines ou des centaines de millions d'années. Même Jupiter et Saturne auraient dû croître en seulement quelques siècles pour que la capture par entraînement y soit effective ; une durée trop brève pour être plausible.

Un modèle alternatif pour expliquer la formation d'Uranus et Neptune a été proposé par Alan Boss, de l'Institut Carnegie de Washington. Il suggère qu'elles étaient au départ aussi massives que Jupiter et Saturne, mais qu'elles ont été dépouillées de leur enveloppe par le rayonnement

LES AUTEURS



David JEWITT est professeur d'astronomie à l'Université de Hawaï.
Scott SHEPPARD est chercheur à l'Université Carnegie de Washington.
Jan KLEYNNA travaille à l'Université de Hawaï.

d'étoiles massives voisines. Mais la présence des satellites irréguliers est encore plus difficile à expliquer dans le cadre de ce modèle, car une planète qui perd de la masse aurait tendance à perdre des lunes plutôt qu'à en gagner.

Capture à trois corps

Dans les scénarios de freinage gazeux ou de capture par entraînement, les satellites irréguliers ont sans doute été capturés dans les 10 à 20 premiers millions d'années du Système solaire, longtemps avant que la Terre ne prenne sa forme actuelle. Un troisième scénario très différent a été avancé en 1971 par Bepi Colombo et Fred Franklin, alors tous deux au Centre d'astrophysique de Harvard. Selon eux, la collision entre deux corps dans la sphère de Hill d'une planète dissiperait suffisamment d'énergie pour que l'un des deux soit capturé. Cette idée de « capture à trois corps » a reçu assez peu d'attention depuis, peut-être parce que ce type de collision est extrêmement rare aujourd'hui.

Cependant, des travaux récents montrent qu'aucune collision n'est nécessaire. Les trois corps ont juste besoin d'inter-

agir par le biais de la gravitation. L'un d'entre eux peut gagner de l'énergie au détriment des deux autres. Ce processus est l'équivalent à grande échelle de l'effet de fronde gravitationnelle utilisé pour propulser les sondes spatiales vers les planètes lointaines. En 2006, Craig Agnor, de l'Université de Californie à Santa Cruz, et Doug Hamilton, de l'Université du Maryland, ont proposé une nouvelle forme de capture à trois corps, où un couple d'objets liés est séparé par la gravité de la planète, ce qui entraîne l'éjection d'une composante du couple tandis que l'autre est satellisée.

Ce mécanisme est intéressant, car les quatre planètes géantes, sans exception, sont dotées de nombreuses lunes irrégulières. Il fonctionne en effet aussi bien pour les géantes gazeuses que les géantes glacées, sans recours à une enveloppe gazeuse étendue ou une croissance brutale. Il ne nécessite qu'un nombre suffisant de collisions ou de passages dans le voisinage des planètes. La période la plus favorable à ce type d'interaction est la fin de la formation des planètes, après que la sphère de Hill a atteint ses proportions actuelles, mais avant que les débris résiduels de la formation planétaire aient été balayés.

LA CHASSE AUX SATELLITES

Éloignés, minuscules, mal éclairés : les satellites irréguliers sont parmi les corps célestes les plus difficiles à observer. Pour les dénicher, il faut utiliser les meilleurs télescopes de relevé, des instruments qui scrutent de larges bandes du ciel au lieu de se focaliser sur une région limitée. La plupart des découvertes des auteurs ont été réalisées à l'aide du télescope Canada-France-Hawaï (CFHT) du Mauna Kea, à Hawaï. Bien que son miroir de 3,6 mètres soit petit

comparé à ceux des télescopes actuels, il est équipé de l'un des plus grands capteurs numériques, *MegaCam*, dont les 268 millions de pixels couvrent une surface de un degré carré sur la voûte céleste.

Le principal problème est de distinguer les petits corps du Système solaire d'objets situés en arrière-plan comme des galaxies ou des étoiles. Pour cela, on utilise deux méthodes. La première consiste à changer d'angle. On compare trois images de la même zone prises à

différents instants. Entre les prises, la Terre a avancé sur son orbite, ce qui change l'angle de vue. Les objets apparaissent décalés, et ce d'autant plus qu'ils sont proches. En pratique, les étoiles ne bougent pas et seuls les objets du Système solaire semblent décalés.

La seconde méthode est une mesure de vitesse. On prend dix images d'une même zone, on les décale en fonction des vitesses orbitales attendues des lunes que l'on cherche, et on les superpose. Dans l'image-somme, les étoiles d'arrière-plan apparaissent comme des traits, et les satellites irréguliers comme des points lumineux. Cette méthode utilisant plus d'images pour une même région du ciel est plus sensible aux objets peu visibles que la première, mais il faut plus de temps pour réaliser un relevé complet.

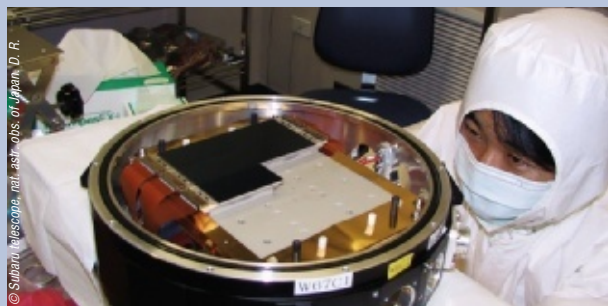
Pour s'assurer que les corps détectés sont bien des lunes et non



David Jewitt, Scott Sheppard et Jan Kleyna

Le satellite de Jupiter S/2003 a été découvert en 2003 sur ces deux images prises à 39 minutes d'intervalle. Les autres objets sont des étoiles d'arrière plan.

des astéroïdes ou des comètes, on les observe plusieurs mois durant pour retracer leurs orbites et vérifier qu'elles tournent bien autour de leurs planètes respectives.



Le détecteur Prime focus Camera du télescope Subaru, à Hawaï.