



L'exploration du système solaire nous l'a appris, et la découverte d'exoplanètes

l'a confirmé : la Terre n'est qu'une planète parmi d'autres. Elles sont toutes nées dans une nébuleuse de gaz et de poussière entourant une jeune étoile. Dès que l'astre central cesse sa contraction initiale, commence un processus complexe, qui voit des éléments de la nébuleuse se condenser en grains puis en corps plus importants, les planétésimaux, puis en embryons. Loin de l'astre, ceux-ci finissent par accumuler une masse de gaz importante et deviennent de ce fait des planètes géantes gazeuses. Ces premières-nées, comme Jupiter dans notre système, commandent alors le ballet des planétésimaux intérieurs. Entre accrétions et collisions, ceux-ci engendreront les planètes telluriques comme la Terre. Rien n'est figé cependant, puisque les proto-planètes peuvent migrer à l'intérieur du disque selon des itinéraires variés. Quand et pourquoi cette migration s'arrête est aujourd'hui activement étudié afin de bien comprendre la formation des systèmes planétaires stables.

Les planètes : un ballet de petits astres virevoltants avant le final de leurs naissances

Comment est né notre monde

L'exploration du système solaire, la découverte de planètes extrasolaires, de nouvelles idées et de puissantes simulations numériques ont permis de mieux comprendre comment se forment les planètes. Il est alors apparu que le résultat aurait pu être tout autre, tant la forme finale d'un système planétaire dépend des conditions initiales.

Jupiter vu par la sonde Cassini. Jupiter a déterminé toute l'histoire du système solaire. Il a joué un rôle au moment de la formation de Saturne et a aidé à celle des autres géantes, et même des planètes telluriques. En particulier, il était juste « au bon endroit » pour favoriser l'apparition de notre Terre.

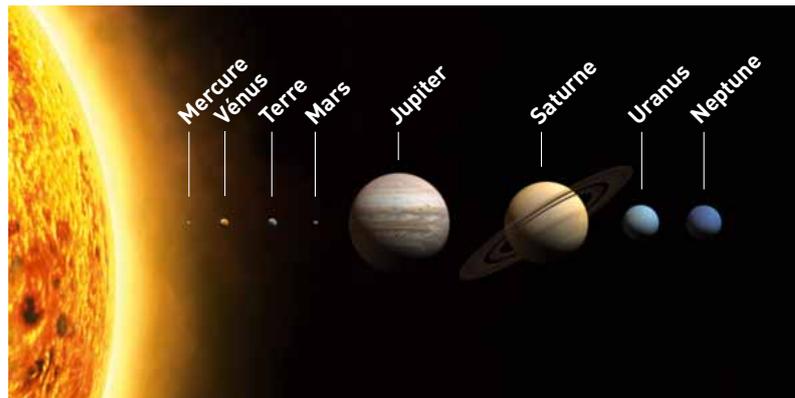


Le siècle qui vient de s'achever restera dans notre histoire comme celui de l'exploration du système solaire. Les hommes ont marché sur notre satellite et rapporté des pierres lunaires pour les analyser dans leurs laboratoires. Des robots ont exploré Mars, étudié sa surface, mesuré ses vents et constaté l'absence de vie. Des sondes automatiques ont atterri sur Vénus, d'autres ont percé ses nuages et révélé les détails de sa surface. La **comète** de Halley, plusieurs autres comètes, des **astéroïdes**, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et leurs environnements ont reçu la visite d'engins fabriqués par les hommes. Les grands moments de cette exploration ont été les missions Apollo vers la Lune à la fin des années 1960, la mission Viking vers Mars au cours des années 1970 et surtout la mission Voyager qui a atteint les confins du système solaire au cours des années 1980. Le début du 21^e siècle coïncide avec le retour vers Mars et vers le monde de Saturne avec la mission Cassini-Huygens, à laquelle participent activement les chercheurs du CEA, qui ont d'ailleurs collaboré à la construction de l'un des détecteurs infrarouges de la sonde.

L'ample moisson de données de ces dernières décennies, qui continue encore aujourd'hui, a bouleversé la pensée scientifique. Des **simulations numériques** sophistiquées ont permis de tester plusieurs **modèles** et d'ouvrir de nouvelles pistes. Les astrophysiciens ont alors réalisé que la Terre est une planète parmi d'autres qu'on peut étudier en la comparant avec ses voisines. Ils ont compris que le système solaire est beaucoup plus riche que prévu, tant par la diversité des corps qui l'habitent que pour la variété des phénomènes physiques qui s'y déroulent. La découverte récente de **planètes** extrasolaires ainsi que l'observation de sites de formation d'**étoiles** ont permis de faire un bond significatif dans la compréhension de nos origines.

Un nuage s'effondre

L'histoire de notre système a commencé il y a environ 4,55 milliards d'années. Quelque part dans la **Galaxie**, un nuage de gaz interstellaire s'est effondré sous son propre poids pour donner naissance à une étoile



International Astronomical Union

– le **Soleil** – entourée d'une nébuleuse gazeuse qui s'est très vite aplatie, formant un disque. Les réactions chimiques étant très sensibles à la température, la composition chimique dépendait de la distance au Soleil : de plus de 2 000 **K** près de l'étoile à quelques dizaines de degrés au-dessus du **zéro absolu** aux confins du système solaire. Des composés réfractaires (oxydes d'aluminium, de calcium et de titane, des silicates de magnésium, du feldspath de sodium et de potassium, des oxydes de fer) et bien d'autres minéraux sont ainsi apparus près du Soleil, alors que des glaces d'eau, de dioxyde de carbone, de méthane ou d'ammoniac se formaient à la périphérie. Mais comment passer d'un disque gazeux entourant une proto-étoile au cortège des planètes que nous connaissons ? Dans les années 1980, les astronomes ont imaginé une succession d'étapes conduisant inexorablement à un état final unique avec des planètes telluriques près du centre et des planètes géantes à la périphérie. Tous les systèmes planétaires devraient donc ressembler au nôtre. La détection des planètes extrasolaires, le développement des modèles théoriques et l'exploration même du système solaire ont permis de réaliser, vingt ans plus tard, que le processus de formation d'un système planétaire autour d'une étoile est en fait beaucoup plus complexe et peut conduire à une grande variété de situations finales.

L'exploration du système solaire, menée de pair avec une recherche vigoureuse et avec l'utilisation de nouvelles techniques d'observation à partir de la Terre, a suscité la naissance d'une nouvelle science essentiellement pluridisciplinaire : la planétologie. L'étude comparée des planètes est un excellent moyen de mieux connaître la Terre.



NASA, ESA, N. Smith (University of California, Berkeley), and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

La nébuleuse de la Carène. Grâce à l'observation des sites de formation d'étoiles, les astrophysiciens peuvent imaginer comment il est possible de passer d'un nuage interstellaire à une nébuleuse proto-stellaire puis à un soleil entouré d'un disque de poussières et de gaz.

Dès que le Soleil a cessé sa contraction, un refroidissement brutal s'est produit en un temps relativement court à l'échelle astronomique. En effet, une étoile tirant son énergie des **réactions thermonucléaires** se déroulant en son sein est bien moins **lumineuse** qu'une proto-étoile en plein effondrement. Une partie importante du nuage de gaz s'est alors solidifiée en grains d'une taille de l'ordre de quelques **microns** à quelques millimètres. En quelques dizaines de millions d'années, la nébuleuse gazeuse s'est donc transformée en un disque de grains dont la composition chimique dépend de la distance au Soleil. Au fur et à mesure du refroidissement, divers minéraux et glaces se sont condensés. Les composés réfractaires du calcium, de l'aluminium, du magnésium et du titane se solidifient en dessous de 2 000 K. Les silicates de magnésium, le feldspath de sodium et de potassium, les oxydes de fer le font vers 1 000 K. Vers 300 degrés au-dessus du zéro absolu, la vapeur d'eau se transforme en glace et vers quelques dizaines de degrés, des grains solides de méthane apparaissent. C'est pourquoi seuls les éléments réfractaires et d'autres minéraux se sont solidifiés près du Soleil. À la périphérie du système, au contraire, les glaces d'eau, de dioxyde de carbone, de méthane et d'ammoniac ont dominé la composition des grains. Les variations de densité et de composition au sein du système actuel proviennent donc des conditions de température régnant dans le disque proto-planétaire.

Des « grains » aux planètes

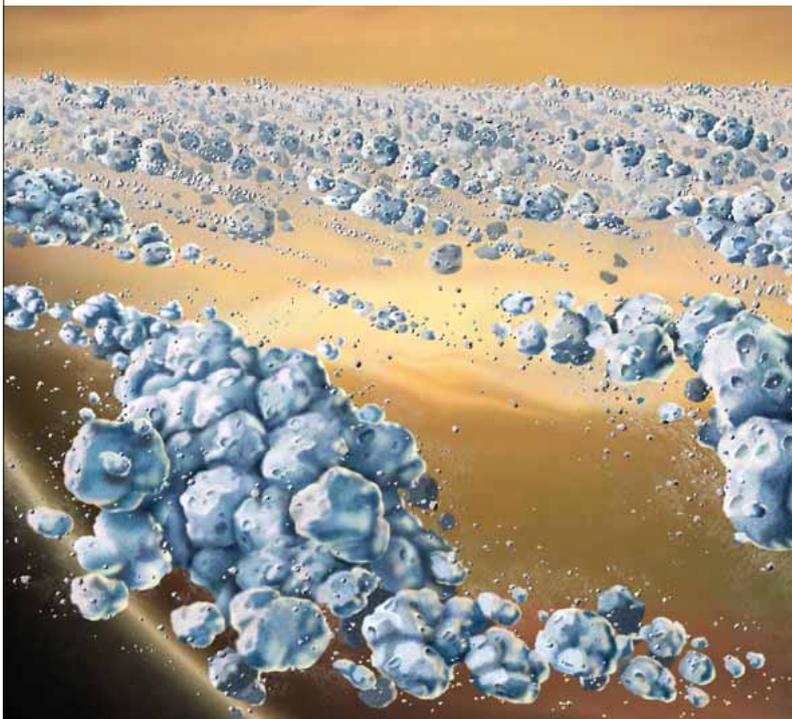
La création de corps tels que les planètes ou les satellites à partir d'aussi petits grains de matière est toutefois restée longtemps mystérieuse. La croissance directe de petits grains en grosses planètes par

agglomérations successives demanderait des durées supérieures à l'âge de l'Univers. La solution de l'énigme n'est apparue que dans les années 1970, lorsque des simulations ont montré que, dans un disque de grains relativement calme, des instabilités **gravitationnelles** locales sont inévitablement créées. Des corps de quelques centaines de mètres se forment alors par effondrement. Si au contraire la nébuleuse primitive est animée de violentes **turbulences**, des condensations naissent au centre des tourbillons. Elles ont elles aussi une taille de quelques centaines de mètres. Bref, dans tous les cas apparaissent ces corps de quelques hectomètres, appelés **planétésimaux**. Le disque de grains a donc cédé la place à un disque de planétésimaux.

Par le simple jeu de leurs collisions, ces planétésimaux s'agglomèrent en des corps d'une taille de l'ordre de cinq cents à mille kilomètres, qui peuvent être considérés comme des embryons de planètes. Là encore, les collisions jouent un rôle essentiel dans le résultat final. Lorsque les vitesses relatives des deux protagonistes sont faibles, ils fusionnent. Si au contraire ils se rencontrent à grande vitesse, ils se fragmentent. Pour que le matériau s'accumule progressivement et donne naissance aux planètes, il faut donc des collisions relativement « douces ». Cela ne peut se produire que si les orbites des planétésimaux sont presque semblables, voire, dans l'idéal, qu'elles forment des ellipses concentriques. Si tel est bien le cas, cependant, un corps ne peut rassembler que le matériau se trouvant dans son voisinage immédiat. Le processus d'**accrétion** s'arrête assez vite. Pour qu'un objet accumule plus de matière, il doit « balayer » une plus grande partie du système, donc parcourir une orbite excentrique. Mais cela mène à une contradiction. En effet, les collisions entre ce corps et les autres planétésimaux se produisent alors à des vitesses relatives très élevées... et aboutissent à la cassure des protagonistes. En d'autres termes, à partir d'un disque de planétésimaux, il est relativement concevable d'obtenir un système formé d'une centaine de petites planètes, mais beaucoup plus improbable d'obtenir quelques grosses planètes, comme les huit qui peuplent notre système.

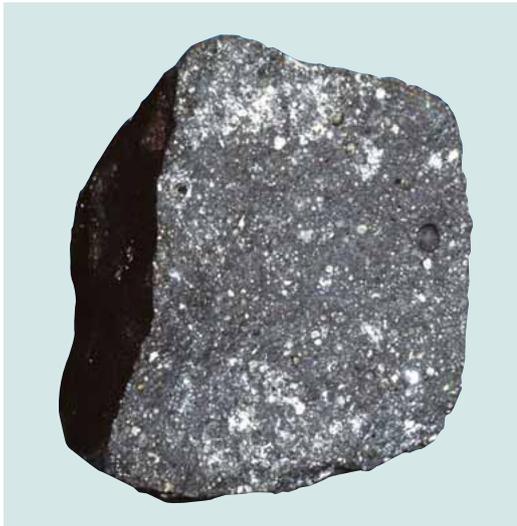
Planètes telluriques et géantes gazeuses

La formation de planètes de plusieurs milliers de kilomètres de rayon à partir d'embryons grands comme la France n'a pu être étudiée et comprise qu'à l'aide de simulations numériques. Un embryon planétaire, de par sa masse, perturbe le mouvement du matériau diffus situé à son voisinage et attire finalement de grandes quantités de matière. Plus l'accrétion est importante, plus la zone d'influence de l'embryon s'étend. Il semble que, dans notre système comme ailleurs, quelques embryons initialement un peu plus gros que les autres aient ainsi « pris le pouvoir » en ramassant tout le matériau situé aux alentours. Peu à peu, toute la matière disponible s'est rapprochée de ces « dominants ». Dans le même temps, plus les corps en orbite autour du Soleil se raréfiaient, plus les probabilités de collision, donc de fragmentation, diminuaient. Tout concourait donc à la survie de ces quelques objets. Les dernières collisions ont déterminé les directions des axes de rotation



Détail d'un modèle des anneaux de Saturne, montrant qu'ils ont la forme d'un disque très fin de cailloux et de poussières glacés similaires aux planétésimaux, ancêtres des planètes. Mise en orbite autour de Saturne en 2004, la sonde Cassini envoie quotidiennement des données uniques permettant aux chercheurs de développer des modèles de pointe pour simuler divers mécanismes importants.

NASA/JPL/University of Colorado



DR

La météorite d'Allende. Grâce aux indices accumulés au sein des météorites et à des simulations numériques sophistiquées, les scientifiques ont compris que le passage d'un disque continu de matière à un disque de planètes a duré quelques dizaines de millions d'années, ce qui est un temps très court à l'échelle astronomique.

des planètes et leur période initiale de rotation. Ce mécanisme est maintenant à peu près universellement admis pour expliquer la formation des planètes telluriques telles que Mercure, Vénus, Mars et la Terre. La naissance des planètes géantes comme Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune a été plus longue à comprendre. Dans les années 1970, les astronomes pensaient que de tels objets se formaient, comme les étoiles, par effondrement local du nuage gazeux. Ce scénario est maintenant rejeté car il faudrait pour cela que le disque de la nébuleuse primitive soit instable et au moins dix fois plus massif que le Soleil, ce qui est peu réaliste. De plus, les géantes gazeuses de notre système ont des compositions nettement différentes de celles du Soleil et de la nébuleuse primitive. Il est apparu plus récemment qu'il fallait également exclure un scénario de type accumulation de planétésimaux,

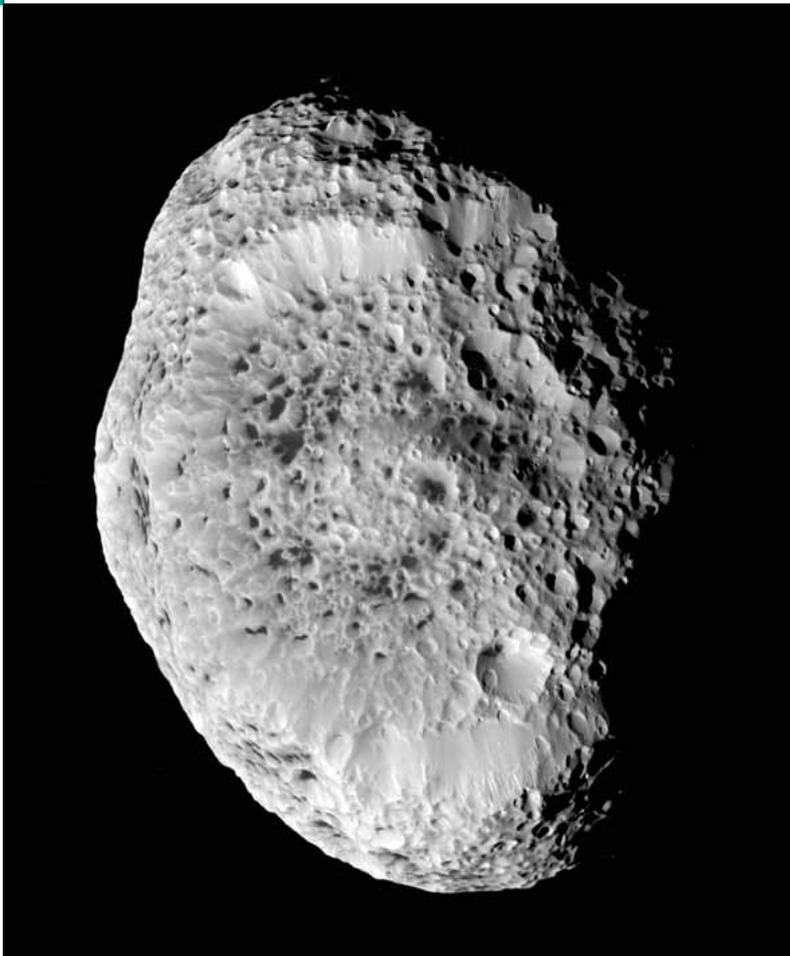
propre aux planètes telluriques. La formation de géantes par cette voie demanderait en effet trop de temps. Il semble finalement que quelques noyaux solides formés par accumulation de planétésimaux aient rassemblé le gaz présent loin du proto-Soleil et que chacun ait donné naissance à une planète géante. Un tel scénario se déroule en plusieurs étapes. Tout d'abord, des planétésimaux s'assemblent en un noyau solide, dense, entouré d'une atmosphère gazeuse de faible masse. Lorsque ce noyau a capturé pratiquement tous les corps solides situés dans sa zone d'influence gravitationnelle, la proto-planète continue de croître en capturant tout le gaz du voisinage. Par un effet « boule de neige », cette capture s'accélère et la planète grossit très rapidement. Ces captures échauffent alors l'ensemble et la température de la nébuleuse qui entoure la proto-planète diminue avec la distance au centre. Cela explique les densités décroissantes avec la distance des satellites (solidifiés ultérieurement) autour des planètes géantes actuelles. Au bout du compte, ayant amassé tout le gaz disponible dans son environnement, la nouvelle planète se trouve isolée dans l'espace, elle finit de se contracter puis se refroidit lentement pour atteindre son état actuel.

Dans ce type de scénario, la formation des planètes géantes a été beaucoup plus rapide que celle des planètes telluriques. Les modèles développés par différentes équipes indiquent que le noyau solide, résultat de l'accumulation de particules plus petites, a été formé en moins d'un million d'années après l'effondrement solaire et que l'accrétion d'une enveloppe gazeuse massive d'**hydrogène** et d'**hélium** a duré moins de dix millions d'années. Jupiter semble avoir été la première planète formée dans le système solaire, et son apparition a façonné la suite de l'histoire. Sa croissance s'est déroulée à un rythme saisissant. Quand le proto-Jupiter a atteint une taille comparable à celle de la Terre, il a capté en moins de mille ans la moitié de sa masse finale (qui vaut environ 300 fois celle de la Terre) ! La chaleur dissipée était alors tellement intense qu'il était presque aussi **brillant** qu'une étoile. La planète est rapidement devenue



NASA/JPL/Space Science Institute

Saturne et ses anneaux vus à contre-jour. La planète a été photographiée par la sonde Cassini alors qu'elle masquait le Soleil. La Terre est visible en haut à gauche. Vous êtes sur la photo !



NASA/JPL/Space Science Institute

Hypérion, un des satellites de Saturne, qui mesure environ 340 km de diamètre. Il est criblé de cratères, indiquant que les satellites et les planètes du système solaire ont fait l'objet d'un bombardement intense d'astéroïdes.

suffisamment massive pour éliminer le gaz restant aux alentours. Elle a en effet « retenu » les **molécules** de gaz comprises entre elle et le Soleil (qui tournaient plus vite qu'elle) et a donc fait tomber ce matériau sur l'étoile. Au contraire, le gaz extérieur étant plus lent qu'elle, elle l'a accéléré, donc éloigné vers la périphérie. La planète a ainsi créé un sillon dans le disque gazeux circumsolaire, ce qui a interrompu l'apport de matière première. Le gaz tend certes à repeupler une telle percée, mais les simulations numériques montrent qu'un Jupiter situé à 750 millions de kilomètres du Soleil (comme c'est le cas actuellement) repousse finalement le gaz. Par ailleurs, plus vite une proto-planète géante est formée, plus grosse elle sera finalement parce qu'il reste encore beaucoup de gaz disponible dans le système. Si Jupiter est plus gros que Saturne, Uranus et Neptune, c'est tout simplement parce qu'il a été formé quelques millions d'années plus tôt.

De l'importance de Jupiter

En condensant du gaz dans des régions extérieures, et en éjectant des planétésimaux aux confins du disque par son action gravitationnelle, le jeune Jupiter a alimenté en matières premières la formation des autres planètes géantes. Grâce à ce rôle de collecteur de matériau, Saturne a pu ainsi être formé plus vite. En l'absence de Jupiter, Uranus et Neptune n'auraient probablement jamais atteint leur taille actuelle. En

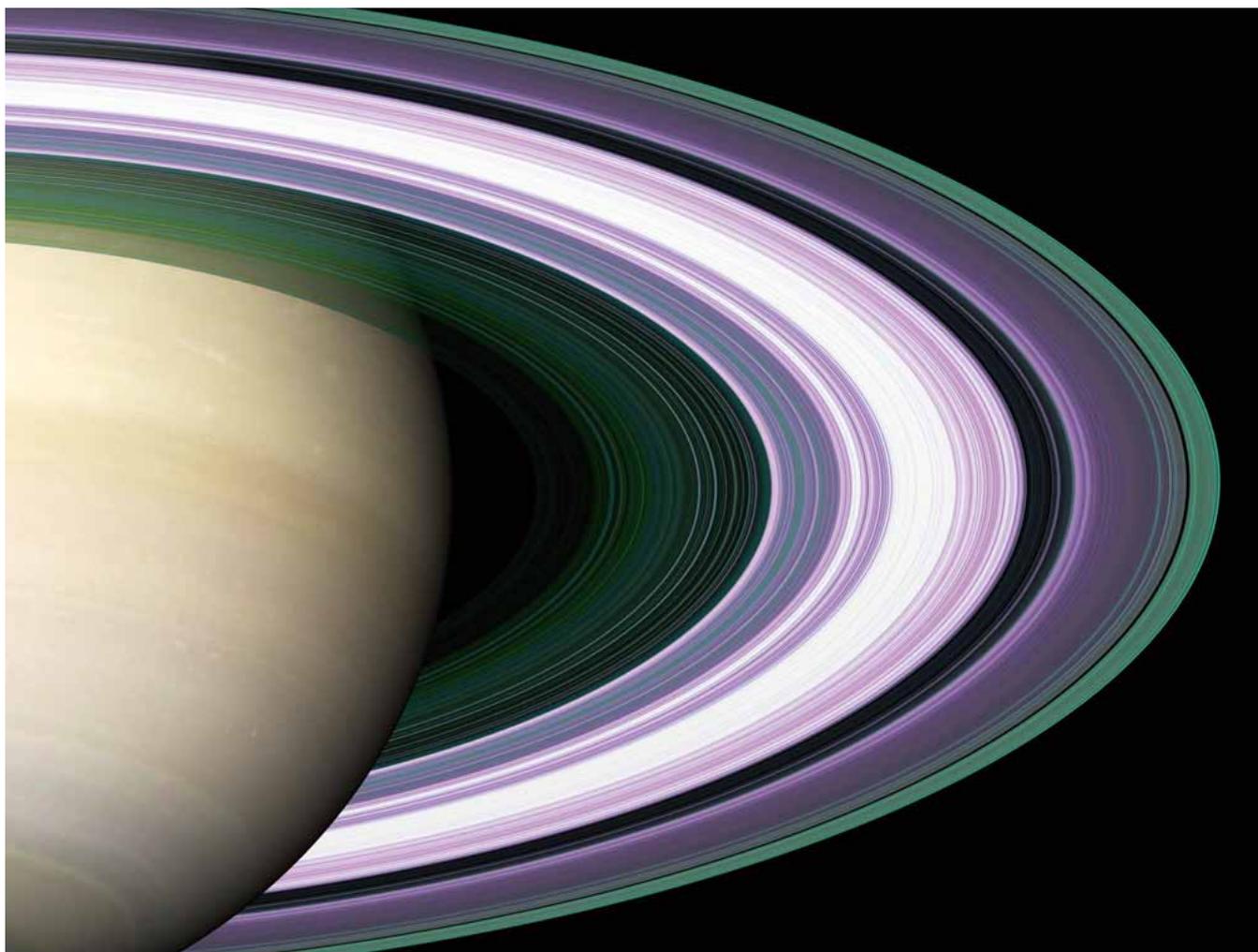
effet, loin de l'étoile centrale, dans les régions de faible densité, la croissance d'un corps est si lente que le disque de gaz se dissipe bien avant la formation d'une grosse planète, ne laissant derrière lui qu'un astre « rabougri ». L'apparition de cette seconde génération de planètes géantes dans notre système aurait d'ailleurs pu avoir un effet dévastateur. En effet, si deux de ces planètes avaient été formées trop près l'une de l'autre, elles auraient pu interagir si fortement qu'elles auraient été catapultées sur des orbites fortement excentriques et inclinées, semant la perturbation dans tout le système. La Terre aurait pu être chassée de son emplacement par le passage proche d'une telle géante. C'est probablement ce qui s'est passé autour des étoiles accompagnées d'un cortège de planètes aux orbites excentriques et inclinées, alors que toutes les planètes du système solaire parcourent des orbites circulaires dans le plan de l'équateur du Soleil.

En fait, Jupiter a déterminé l'évolution de l'ensemble du système par le jeu des résonances entre planétésimaux. Plus proche du Soleil, plus éloigné ou placé sur une orbite elliptique, il aurait perturbé l'accrétion de ces corps, empêchant la formation des planètes telluriques.

Un scénario consensuel

Pour résumer l'histoire de nos origines, la majorité des scientifiques s'accorde aujourd'hui sur le scénario suivant. D'abord les planètes géantes se sont formées dans les parties extérieures de la nébuleuse proto-solaire, par capture de gaz d'hydrogène et d'hélium sur un noyau massif résultant de l'accumulation de planétésimaux solides. Puis les planètes telluriques sont apparues, par accrétion de planétésimaux dans les parties intérieures de la nébuleuse. Tout cela n'a duré que quelques dizaines de millions d'années, ce qui est très court à l'échelle astronomique. Les planétésimaux non utilisés pour former les planètes ont interagi avec ces dernières, et une **ceinture d'astéroïdes** beaucoup plus massive que celle qui existe aujourd'hui est apparue entre Mars (dernière planète tellurique) et Jupiter (première planète géante), ainsi que de nombreux corps exilés au-delà de Neptune. Après toutes ces perturbations, un calme relatif s'est établi pendant environ 600 millions d'années. L'étude des cratères des satellites du système solaire indique pourtant qu'un bombardement intense s'est produit environ 800 millions d'années après la formation des planètes. Que s'est-il passé ? Il semble bien que les planètes géantes étaient initialement deux à trois fois plus proches du Soleil qu'aujourd'hui. Leurs **interactions gravitationnelles** les ont conduites à ce moment-là à s'éloigner du Soleil et à migrer vers l'extérieur. L'arrivée des planètes géantes aux confins du système solaire a provoqué un énorme chaos et une foule d'astéroïdes a envahi tout le système, bombardant planètes et satellites pendant une dizaine de millions d'années. Le taux de bombardement était alors environ vingt mille fois supérieur à aujourd'hui. La Terre recevait l'impact d'un objet d'un kilomètre tous les vingt ans ! C'est à ce moment-là que se sont formées les **ceintures** des astéroïdes et **de Kuiper**, que

(1) Astéroïdes troyens : astéroïdes partageant l'orbite de Jupiter autour du Soleil et situés autour de deux points d'équilibre stables. Ils sont répartis en deux groupes, l'un en avance de 60° et l'autre en retard de 60° sur Jupiter.



NASA/JPL

Jupiter a capté ses astéroïdes troyens⁽¹⁾ et que les planètes géantes ont acquis leurs satellites irréguliers. Dès lors, tout était en place. Environ 800 millions d'années après sa naissance, le système solaire était proche de son état actuel et stabilisé. Depuis, l'évolution s'est faite très lentement. Finalement, il a fallu beaucoup de hasards pour que notre système devienne ce qu'il est aujourd'hui et pour que nous soyons là pour commenter son origine. Si la répartition du gaz dans le disque autour du proto-Soleil avait été un tant soit peu différente, le résultat final aurait été tout autre.

Les enseignements de Saturne

Est-ce à dire que nous savons désormais tout de notre histoire ? Certainement pas. Malgré les spectaculaires progrès récents, nombre de points restent encore à élucider. La durée de certaines étapes et les échelles de temps de plusieurs phénomènes sont encore l'objet de discussions. La fragmentation d'un nuage est encore mal comprise. Le collage entre des agrégats de particules reste bien mystérieux. Comme indiqué plus haut, les scientifiques tournent maintenant leur regard vers Saturne, grâce à la sonde Cassini. Les anneaux de cette géante ont en effet souvent été considérés comme un « laboratoire » caractéristique du disque de gaz et de poussières qui entourait le Soleil avant la formation des planètes (voir *Les anneaux de Saturne : un merveilleux laboratoire d'étude*, p. 40).

Loin d'être uniformes, les anneaux sont en fait constitués de milliers d'annelets aux bords parfaitement délimités. Ils hébergent aussi des arcs de matière découverts pour la première fois autour de Neptune en 1984 par l'auteur de ces lignes. Tout cela suggère fortement l'existence de mécanismes de confinement, sujet majeur d'études dans de nombreux domaines de la physique. Les collisions entre les particules, les interactions gravitationnelles entre des anneaux minces et des petits satellites, ainsi que les phénomènes de résonance, conduisent à un échange d'énergie et de **moment cinétique** tel qu'anneaux et satellites se repoussent mutuellement. C'est ainsi que deux petits satellites, appelés « satellites gardiens », peuvent confiner un petit anneau. Les astronomes se demandent actuellement si des mécanismes de ce type entre les premiers embryons de planètes formés et de plus petites particules n'ont pas joué un rôle important pour former des planètes telluriques. Si Jupiter a indiscutablement déterminé l'existence même de la Terre, c'est maintenant Saturne, autre géante gazeuse, qui nous renseignera peut-être sur la formation de notre propre planète.

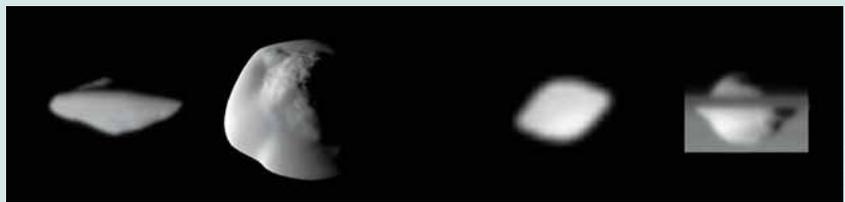
Les anneaux de Saturne vus en **rayonnements radio**. Les similarités entre les anneaux et les disques proto-planétaires sont mises à profit par les scientifiques qui observent en direct des processus ayant permis la formation des planètes.

> André Brahic

Université Paris 7
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7- CNRS)
Service d'astrophysique (SAP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)

Les anneaux de Saturne : un merveilleux laboratoire d'étude

Les anneaux de Saturne, aussi **brillants** que la **planète** elle-même, fascinent les hommes depuis des siècles. Galilée les remarque le premier, en 1610, avec la lunette qui lui a permis l'année précédente d'observer les cratères de la Lune et les satellites de Jupiter. En raison de la mauvaise qualité optique de l'instrument, il voit des sortes de taches lumineuses de part et d'autre de la planète. C'est l'astronome hollandais Christiaan Huygens qui, en 1655, comprend que des anneaux entourent Saturne. Aujourd'hui, après l'émerveillement, vient l'étude. La mission Cassini, dans laquelle le CEA est très impliqué grâce à l'accès à deux instruments embarqués – les caméras ISS et le spectromètre infrarouge CIRS –, les scrute régulièrement sous différents angles de vue, à l'échelle de quelques heures, quelques mois ou plusieurs années, pour suivre les effets saisonniers. L'instrument CIRS mesure notamment la température des anneaux, qui sont totalement gelés, et étudie avec précision la composition des particules les constituant (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90). Avec plus de 300 000 km de diamètre pour une dizaine de mètres d'épaisseur (sauf exceptions), ne pesant au total pas plus



Les images à haute **résolution** obtenues par la sonde Cassini ont révélé la forme étonnante de Pan (à droite) et Atlas (à gauche), deux satellites situés au cœur des anneaux de Saturne. Leurs bourrelets à l'équateur les font ressembler à des soucoupes volantes. Ils se sont constitués par l'accumulation récente de poussières provenant des anneaux.

lourd qu'un satellite de 400 km, constitués de myriades de blocs de glace de l'ordre du mètre, les anneaux forment un monde à part. Un monde en perpétuelle évolution, déformé en permanence par les satellites proches, et à la surface duquel se propagent des **ondes** spirales. C'est aussi une des structures les plus évoluées de l'Univers, tout au moins si l'on mesure l'évolution à l'aune du nombre de révolutions – ce qui est appelé le « temps dynamique ». Depuis leur origine, d'ailleurs incertaine, les anneaux ont peut-être fait des centaines de milliards de révolutions sur eux-mêmes alors que **notre Galaxie** n'en a fait que quelques dizaines... Ils tournent en effet sur eux-mêmes en une dizaine d'heures, contre environ 200 millions d'années pour la Galaxie (à la distance du Soleil). Durant ces innombrables révolutions, les moindres perturbations, les structures les plus subtiles ont eu pleinement le temps de se développer, comme une gigantesque broderie **gravitationnelle** de taille planétaire. Outre leur intérêt propre, les anneaux intéressent les scientifiques par leurs similarités avec d'autres disques de plus grandes dimensions (voir *Les cocons des planètes*, p. 41). En effet, à l'instar des **disques d'accrétion** autour d'étoiles, des **trous noirs** ou des disques proto-planétaires, leur évolution est dictée par l'étalement visqueux. Comme pour les **galaxies spirales** ou les disques d'accrétion, par exemple, leur aplatissement provient de processus dissipant l'énergie. Ils sont gravitationnellement instables, ce qui les rapproche à nouveau des galaxies spirales. Enfin, la région de leur bord externe est le

siège de processus d'**accrétion** évoquant les disques proto-planétaires au sein desquels se forment des planètes.

Observer la naissance des planètes

Les anneaux de Saturne présentent cependant des caractéristiques propres qui les distinguent de tous les autres disques astrophysiques. Par exemple, ils sont pour une grande part situés dans une zone particulière autour de Saturne, appelée le **lobe de Roche**. Ceci a retardé les processus d'accrétion, à cause des **effets de marée**. Conséquence heureuse de ce retard, les astronomes sont aujourd'hui aux premières loges pour étudier *de visu* comment la matière s'assemble pour donner naissance à des satellites, version « miniaturisée » de la formation des planètes.

En couplant observation et **simulations numériques**, les équipes du CEA ont étudié en particulier comment le matériau se structure et s'accrète au bord externe des anneaux et, en s'inspirant de **modèles** de formation planétaire, ont pu expliquer la forme des petits satellites Pan et Atlas (environ 30 km de rayon), tous deux situés dans l'anneau A⁽¹⁾. Ceci a permis aussi de montrer comment des structures spirales se forment autour de l'anneau F, à cause de processus collisionnels qui évoquent les disques circumstellaires. Enfin les observations de CIRS ont révélé la présence de structures gravitationnelles qui ne sont autres que des **ondes de Jeans-Toomree**, rencontrées, là encore, à l'origine de la formation des planètes.

> Sébastien Charnoz et Cécile Ferrari

Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

La face obscure des anneaux. Dans cette image, les anneaux de Saturne sont observés du côté opposé au Soleil. Dans cette géométrie d'observation très inhabituelle, les anneaux denses sont très sombres (l'anneau B en particulier) et les anneaux peu denses scintillent faiblement (anneaux C et A). L'ombre projetée des anneaux sur la planète est visible.

(1) Du centre à la périphérie, les anneaux sont identifiés ainsi : D, C, B, A, F, G et E. La série interne (D à A) rassemble les anneaux denses, brillants, visibles depuis la Terre. La série externe (de E à F), découverte durant les dernières décennies du 20^e siècle par les sondes Pioneer et Voyager, rassemble des anneaux beaucoup moins denses.

Les cocons des planètes

Les étoiles jeunes sont entourées d'un disque de gaz et de poussière dans lequel se forment les planètes. Les astrophysiciens traquent et explorent ces disques « proto-planétaires » afin de comprendre la genèse des planètes. L'observation des disques plus ténus entourant de vieilles étoiles permet de révéler indirectement la présence d'exoplanètes.



Vue d'artiste d'un disque proto-planétaire évasé.

Depuis 1995, date de la découverte de la première d'entre elles, la recherche de planètes extrasolaires a été très fructueuse. À ce jour, les astronomes en comptent plus de 350 à leur tableau de chasse. Les « exoplanètes » – comme d'ailleurs les **planètes** du système solaire – se sont très probablement formées dans les disques de gaz et de poussière entourant les **étoiles** jeunes. Ces disques jouent un double rôle dans les scénarios actuels de formation des planètes : ils apportent la matière qui les constitue, et ils influencent également leur orbite. Il est donc essentiel de bien les connaître (taille, géométrie, masse, densité...) pour en savoir plus sur la genèse des planètes.

Une géométrie inattendue

L'observation des disques n'est pas une mince affaire. La présence d'un disque autour d'une étoile a, tout d'abord, été inférée à partir de la lumière émise par le système étoile-disque. En effet, les poussières **absorbent** la lumière de l'astre (essentiellement de la **lumière visible**), chauffent et réémettent cette énergie sous forme de **rayonnement infrarouge**. À l'observation, un couple étoile-disque se signale donc par un excès d'émission infrarouge par rapport à une étoile seule. Faire une image d'un disque est beaucoup plus difficile et très peu de disques ont été **résolus spatialement** et cartographiés. Un des rares à l'avoir été entoure l'étoile HD97048, située dans la constellation du Caméléon (hémisphère Sud) à une distance de 600 **années-lumière** de la Terre. Deux fois et demie plus massive que le **Soleil** et quarante fois

plus **lumineuse**, HD97048 est encore très jeune : seulement 3 millions d'années, soit moins d'un millième de l'âge du Soleil. Elle a été observée en 2006 avec l'instrument infrarouge VISIR du VLT (*Very Large Telescope*), construit par le CEA/Irfu pour l'**ESO** (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90).

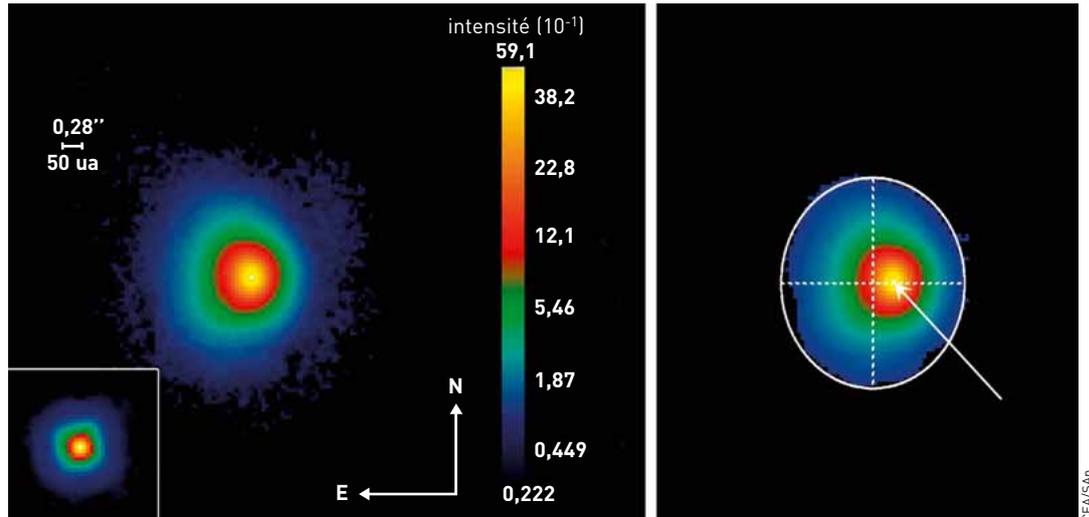
VISIR a démontré l'existence d'un disque s'étendant, à partir de l'étoile, sur plus de 370 fois la distance entre la Terre et le Soleil, soit 370 **unités astronomiques (ua)**. Les images ont révélé une morphologie bien particulière : le disque n'est pas plat mais s'évase régulièrement vers l'extérieur (figure 1). À sa périphérie, soit à 370 ua de son étoile, il atteint une épaisseur de 360 ua. C'est la première fois qu'une telle structure, prédite par certains **modèles**, est directement mise en évidence autour d'une étoile aussi massive. Une telle géométrie ne peut s'expliquer que si le disque contient encore beaucoup de gaz, dont la masse a été estimée à au moins 10 fois la masse de Jupiter, soit environ $1,9 \cdot 10^{28}$ kg. La grande quantité de poussière qu'il comporte – plus de 50 fois la masse de la Terre, soit près de $3 \cdot 10^{26}$ kg – constitue un autre indice de sa jeunesse. Selon toute probabilité, les astronomes ont sous les yeux un disque similaire à la nébuleuse **primordiale** autour du Soleil dans laquelle sont nées les planètes de notre système, donc la Terre.

La migration des planètes

Bien avant la détection de la première planète extrasolaire, les théoriciens n'étaient pas sans ignorer que les planètes en formation dans les disques étaient



Figure 1. À gauche, image en fausses couleurs (variant du bleu au jaune en fonction de l'intensité) de l'émission infrarouge à la longueur d'onde de $8,6 \mu\text{m}$ de la matière entourant l'étoile HD97048. Cette émission est beaucoup plus étendue que celle d'une étoile sans disque, représentée dans l'encadré en bas à gauche. À droite, le centre de contour de l'émission infrarouge (en forme d'ellipse) est nettement décalé par rapport à la position de l'étoile (marquée par une flèche), indiquant que cette structure est un disque incliné.



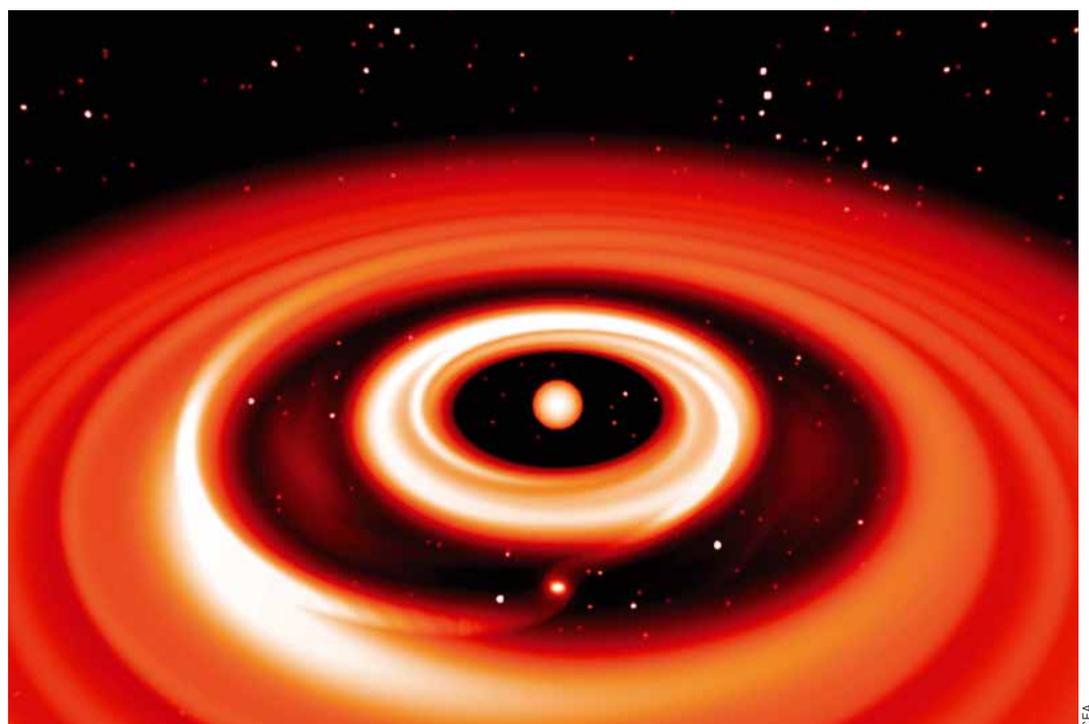
extrêmement mobiles, c'est-à-dire que leur rayon orbital pouvait varier de manière considérable, par suite des **effets de marée** avec le disque. Ils savaient également que ces effets de marée avaient tendance à amener les planètes en formation au voisinage de leur étoile centrale, leur faisant ainsi décrire une trajectoire spirale. Toutefois, ces travaux étaient restés assez confidentiels, aussi ce fut une surprise extraordinaire de constater que 51 Peg b, la première planète extrasolaire découverte, décrivait en 4,23 jours une orbite de seulement 0,052 ua de rayon autour de son étoile centrale ! À titre de comparaison, Mercure, la planète la plus proche du Soleil, décrit son orbite en 88 jours, à 0,39 ua de ce dernier. Depuis lors, les travaux des théoriciens sur les interactions de marée entre disques proto-planétaires et planètes en formation se sont retrouvés à l'avant-scène des scénarios de formation planétaire. Il n'existe en effet aucun mécanisme viable de formation *in situ* de planètes géantes aussi près de leur étoile. La commu-

nauté des astrophysiciens s'accorde donc à penser que ces objets se créent beaucoup plus loin de l'astre central, dans les régions du disque suffisamment froides pour permettre la condensation des glaces d'eau, puis sont amenés au voisinage de leur étoile par effet de marée. Ce processus s'appelle la *migration planétaire*. C'est un mécanisme essentiel pour la formation des systèmes planétaires : sa compréhension en profondeur est donc cruciale.

Des itinéraires variés

Depuis 1995, les théories de migration planétaire ont énormément progressé. Initialement cantonnées aux études analytiques, elles ont beaucoup bénéficié de l'avènement de calculateurs suffisamment puissants pour prédire finement la réponse du disque au cours des nombreuses orbites que décrit une proto-planète. À l'heure actuelle, il existe différents modes de migration d'une planète dans un disque. La *migration de type I* correspond à la

Figure 2. Résultat d'une **simulation** de l'interaction d'une proto-planète géante (d'une masse de Jupiter) et d'un disque proto-planétaire. Un sillon (l'anneau sombre, au travers duquel on voit les étoiles d'arrière-plan) a été évidé dans le disque par la planète. Celle-ci excite également dans le disque un sillage spiral, par effet de marée. C'est la force exercée par ce sillage qui fait migrer la planète.



dérive rapide, vers le centre, des planètes de petite masse – typiquement la masse terrestre. Les planètes géantes, en revanche, évalent leur orbite où elles creusent un sillon par effet de marée (figure 2). Il en résulte une *migration de type II*, beaucoup plus lente. Les disques proto-planétaires **turbulents** engendrent des migrations fort différentes : les fluctuations de densité résultant de la turbulence tendent à induire une marche au hasard du demi-grand axe⁽¹⁾ des planètes de petite masse. C'est la *migration « stochastique »* ou « *diffusive* ». Son étude est particulièrement importante car les astrophysiciens s'attendent à ce que les disques proto-planétaires soient turbulents sur une grande part de leur rayon. Il existe également des modes de migration plus exotiques, comme la *migration « emballée »* (ou de *type III*) des planètes « sous-géantes », ou la *migration « de concert »*, vers l'extérieur, de planètes géantes en résonance⁽²⁾. Le Service d'astrophysique du CEA/Irfu, très impliqué dans l'étude de la migration planétaire, a effectué plusieurs découvertes de premier plan. Reste toutefois une question essentielle : qu'est-ce qui arrête la migration planétaire ? À quoi on peut en ajouter une autre : pourquoi les planètes de notre système solaire semblent-elles n'avoir pas migré ?

Des débris bien utiles

Le disque autour des étoiles jeunes a tendance à disparaître sur une échelle de temps d'environ dix millions d'années. En effet, une partie de la matière se retrouve dans les planètes, une autre est « soufflée » au loin par la pression de la lumière émise par l'étoile, une troisième tombe en spirale jusqu'à l'astre central. Si bien que les étoiles d'âge mûr devraient être dépourvues de disque, et seule la lumière émise par l'étoile devrait être observée. Et pourtant, lorsqu'en 1984 le premier satellite infrarouge américain IRAS (*InfraRed Astronomical Satellite*) a observé des étoiles comme Vega ou β -Pictoris à des fins de calibration, il a détecté un excès de lumière infrarouge. Comment expliquer un tel phénomène ? Y aurait-il encore des poussières autour de ces étoiles ? Eh bien oui, comme l'ont très vite confirmé des observations dans le visible de l'étoile β -Pictoris, qui ont révélé la présence d'un disque résolu autour de l'étoile⁽³⁾.

Comment réconcilier cette observation avec les théories qui prédisaient l'absence de poussière ? Les quantités de poussière en jeu sont très faibles, bien plus faibles que celles contenues dans les disques proto-planétaires. Ce ne sont d'ailleurs pas des poussières primaires : elles ont été « stockées » dans des corps célestes comme des **comètes** ou des

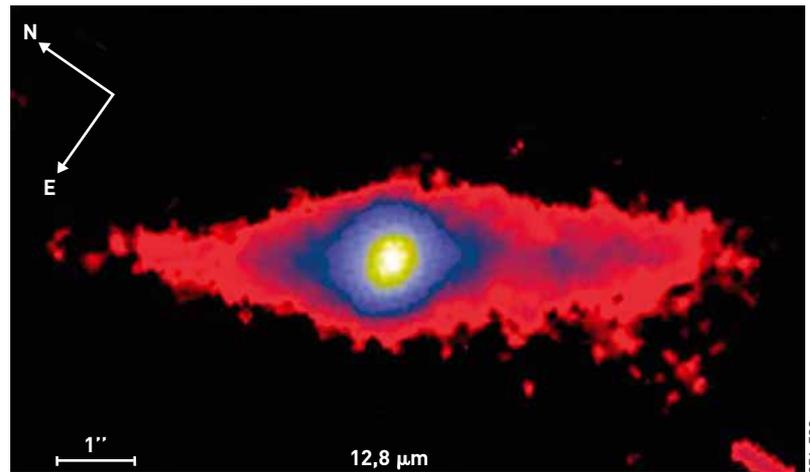


Figure 3. Image du disque de débris autour de l'étoile β -Pictoris, observée avec l'instrument VISIR du VLT. On peut notamment remarquer la dissymétrie du disque.

astéroïdes, puis régénérées lors de l'évaporation de ces comètes passant auprès de leur étoile, ou lors de collisions entre astéroïdes. De tels phénomènes existent d'ailleurs dans le système solaire, et les poussières ainsi créées engendrent la lumière « zodiacale »⁽⁴⁾.

Ces disques de « débris » intéressent les astronomes car une planète peut y « sculpter » des sillons, nettement plus faciles à observer que la planète elle-même. En 1994, le Service d'astrophysique a obtenu les premières images des régions centrales du disque autour de l'étoile β -Pictoris. Celles-ci ont révélé une morphologie laissant supposer la présence d'une planète dans le système (figure 3). Récemment, une équipe du **Laboratoire d'astrophysique de l'Observatoire des sciences de l'Université de Grenoble** a montré qu'il y a au moins une planète dans ce disque. S'ils ne sont pas le cocon où se forment les exoplanètes, les disques de « débris » constituent donc au moins une aide précieuse pour les repérer.

L'étude des disques, structures relativement ténues, repose sur le pouvoir de résolution du télescope, c'est-à-dire la finesse des détails qui peuvent être observés. Or, cette résolution dépend directement du diamètre du miroir. En effet, étant donné le phénomène de diffraction de la lumière, l'image d'un objet ponctuel à travers un télescope n'est pas un point, mais une tache : la tache de diffraction. Plus grand est le diamètre du télescope, plus petite sera cette tache. L'image d'une étoile à travers l'E-ELT (*European-Extremely Large Telescope* ; voir *ELT/METIS, un géant de 42 mètres*, p. 110), télescope européen de 42 mètres de diamètre qui entrera en service en 2018, aura ainsi une surface 25 fois moindre que celle des images produites par le VLT. Ce sera donc un instrument extraordinaire pour l'étude des disques !

> **Pierre-Olivier Lagage,**

Frédéric Masset et Éric Pantin

Service d'astrophysique (SAP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

(1) Demi-grand axe : segment (imaginaire) qui joint le centre d'une ellipse au bord en passant par un des foyers.

(2) Une résonance a lieu lorsque deux objets orbitant autour d'un troisième ont des périodes de révolution dont le rapport forme une fraction entière simple (par exemple 2/3 pour Neptune et Pluton autour du Soleil).

(3) Cette lumière visible provient de l'étoile et est simplement diffusée par les poussières, contrairement à la lumière infrarouge qui est émise par ces poussières elles-mêmes.

(4) Lumière zodiacale : faible lueur visible dans le ciel nocturne, s'étendant le long du plan de l'écliptique à partir des environs du Soleil, peu après le coucher ou avant le lever de celui-ci.