

LA FORMATION DU SYSTÈME SOLAIRE : DE LA NÉBULEUSE DE LAPLACE AUX SYSTÈMES PLANÉTAIRES

Thérèse Encrenaz, LIRA, Observatoire de Paris-PSL
(Laboratoire d'instrumentation et de recherche en astrophysique)

Il y a un peu plus de quatre siècles, en 1609, l'astronome italien Galilée (1564-1642) pointait pour la première fois sa nouvelle lunette vers le ciel. Ce geste a ouvert la voie à de multiples découvertes : les quatre gros satellites en orbite autour de Jupiter, les montagnes sur la Lune, les phases de Vénus, les étoiles de la Voie lactée. C'était un fort soutien à la nouvelle théorie prônée par Nicolas Copernic (1473-1543), selon laquelle le Soleil, et non la Terre, est au centre du Cosmos. C'était aussi le début d'une nouvelle ère, celle de l'observation des propriétés physiques des planètes du Système solaire. Grâce aux observations accumulées depuis des siècles à partir des lunettes et des télescopes, puis, à partir des années 1960, par les sondes spatiales, notre connaissance des objets du Système solaire s'est considérablement affinée et nous avons pu tracer, dans ses grandes lignes, l'histoire de sa formation et de son évolution. C'est alors qu'une nouvelle révolution, à la fin du xx^e siècle, nous a révélé l'existence d'une multitude de systèmes planétaires entourant les étoiles voisines du Soleil ; nous avons alors compris que le Système solaire, loin d'être unique, n'était nullement représentatif des autres systèmes planétaires. Cet article retrace l'évolution de notre compréhension du Système solaire, et des mondes plus lointains qui nous entourent.

D'Aristote à Copernic

Il a fallu parcourir un long chemin avant que l'héliocentrisme soit enfin reconnu. Pour les philosophes et mathématiciens grecs, d'Aristote (384-322 AEC (avant l'ère commune)) à Ptolémée (100-170), la Terre est le centre du Cosmos, les étoiles sont situées sur une sphère très éloignée, et le Soleil sur une sphère plus proche dont la Terre est aussi le centre. Pour rendre compte du mouvement diurne et des irrégularités des mouvements planétaires, il faut faire appel à une combinaison de plusieurs sphères concentriques (figure 1). Le modèle de Copernic est beaucoup plus simple, mais tarde pourtant à s'imposer, car il se heurte au dogme de l'Église selon lequel l'Homme (et donc la Terre) doit être au centre du monde. Il faudra attendre les travaux de Johannes Kepler (1571-1630) qui décrit mathématiquement le mouvement des

planètes autour du Soleil, puis plus tard d'Isaac Newton (1643-1727) qui énonce les lois de la gravitation universelle, pour que le modèle héliocentrique s'impose définitivement.

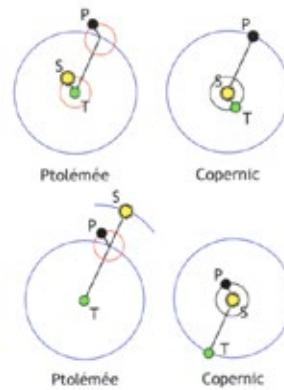


Fig.1. Représentation du mouvement des planètes selon Ptolémée (à gauche) et selon Copernic (à droite). En haut : planètes supérieures (Mars, Jupiter, Saturne) ; en bas : planètes inférieures (Mercure, Vénus). Le Soleil est représenté en jaune, la Terre en vert et la planète en noir. Les orbites des planètes sont représentées circulaires.

D'après T. Encrenaz et J. Lequeux, *L'exploration des planètes*, Berlin, 2014.

tivement.

Planètes et satellites, astéroïdes et comètes

Que trouvons-nous dans le Système solaire ? Huit planètes dont cinq, en plus de la Terre, sont connues depuis l'Antiquité ; elles tournent autour du Soleil sur des orbites quasi-coplanaires, quasi-circulaires et concentriques, proches du plan de l'orbite terrestre appelé écliptique. Elles se classent en deux catégories. Les planètes terrestres (Mercure, Vénus, la Terre et Mars), petites et denses, à moins de 2 unités astronomiques du Soleil (l'unité astronomique – ua – étant la distance moyenne Soleil-Terre, soit environ 150 millions de kilomètres), elles en sont relativement proches. À plus grande distance, au-delà de 5 ua, les planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) sont massives et très volumineuses, mais de faible densité, et sont entourées d'un cortège de satellites. Des objets de plus petite taille, les astéroïdes, sont aussi en orbite autour du Soleil. Une première famille évolue dans la Ceinture principale, entre les orbites de Mars et de Jupiter, sur des orbites quasi-circulaires et proches de l'écliptique ;

une autre famille est située au-delà de Neptune, à plus de 30 ua du Soleil, dans la ceinture de Kuiper (figure 2). Enfin, les comètes forment une catégorie à part : ces objets

de très petite dimension (quelques kilomètres) évoluent autour du Soleil sur des orbites très excentriques, parfois très inclinées par rapport au plan de l'écliptique.

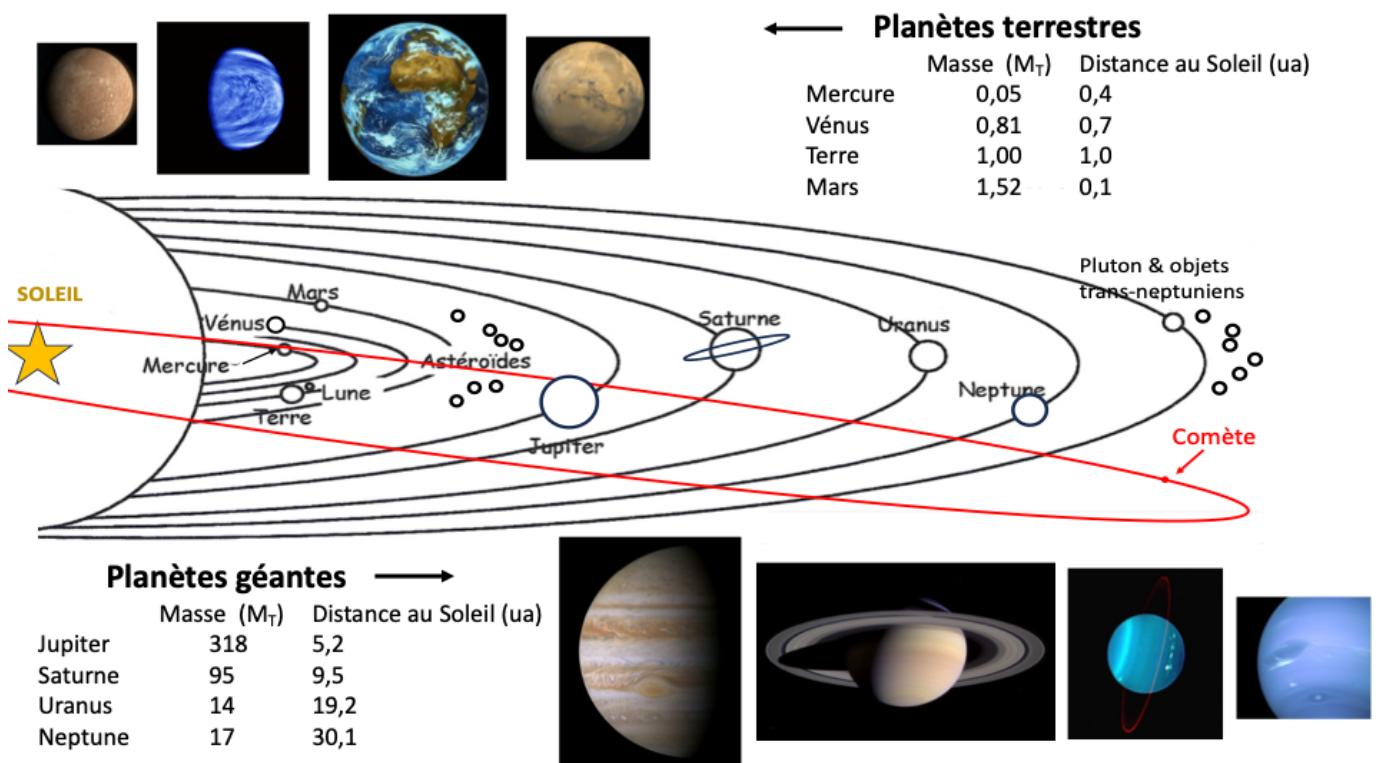


Fig.2. Schéma du Système solaire avec les images des huit planètes (crédit : NASA).

Pour résumer, les objets du Système solaire, dans leur très grande majorité, évoluent à proximité immédiate du plan de l'écliptique ; la plupart sont en rotation quasi-circulaire autour du Soleil. Dès le XVIII^e siècle, cette simple constatation amène les astronomes à énoncer le premier modèle de formation du Système solaire, appelé le modèle de la Nébuleuse primitive. Emmanuel Kant (1724-1804), puis Pierre-Simon de Laplace (1749-1827) en proposent les fondements : une masse de gaz en rotation sur elle-même tend à se contracter sous l'effet de sa propre gravité, jusqu'à s'effondrer en un disque, perpendiculaire à l'axe de rotation. Au centre se forme le futur Soleil, tandis que les planètes naissent au sein du disque à partir d'inhomogénéités de matière. Ce modèle proposé il y a plus de deux siècles par deux philosophes et physiciens visionnaires, et longuement débattu par la suite, est aujourd'hui globalement accepté par la communauté scientifique : grâce aux observations des dernières décennies, il apparaît en effet qu'il reproduit, dans ses grandes lignes, le scénario classique de la formation des étoiles.

La découverte des disques protoplanétaires

En 1983, une nouvelle inattendue suscite l'émoi de la communauté astronomique : le satellite IRAS (InfraRed

Astronomical Satellite), lancé au début de l'année par un consortium regroupant les États-Unis, le Royaume Uni et les Pays-Bas, vient de découvrir un disque de poussières autour de la jeune étoile Véga, l'une des étoiles les plus brillantes du ciel. Opérant dans l'infrarouge, IRAS peut mesurer le rayonnement des objets relativement froids (comme les planètes ou les disques de poussières) alors que les étoiles, beaucoup plus chaudes, émettent leur rayonnement autour du domaine visible. Le satellite a découvert que Véga émettait un excès de rayonnement infrarouge, signature de la présence autour de l'étoile d'un disque de poussières s'étendant jusqu'à une centaine d'unités astronomiques. Par la suite, d'autres disques protoplanétaires seront découverts ; le plus célèbre, celui de Beta Pictoris, est mis en évidence depuis un télescope terrestre, par observation coronographique dans le domaine visible (figure 3).

Ces découvertes, suivies de bien d'autres, ont confirmé que la formation stellaire par effondrement d'une nébuleuse en un disque protoplanétaire est un phénomène courant dans l'Univers. Plusieurs étapes ont jalonné l'expansion de ce domaine de recherche : les satellites ISO (Infrared Space Observatory, 1995-1998) puis Spitzer (2003-2009), lancés respectivement par l'Agence spatiale européenne et la NASA, suivis de Herschel (2009-2013), observatoire spatial submillimétrique lancé par l'Europe.

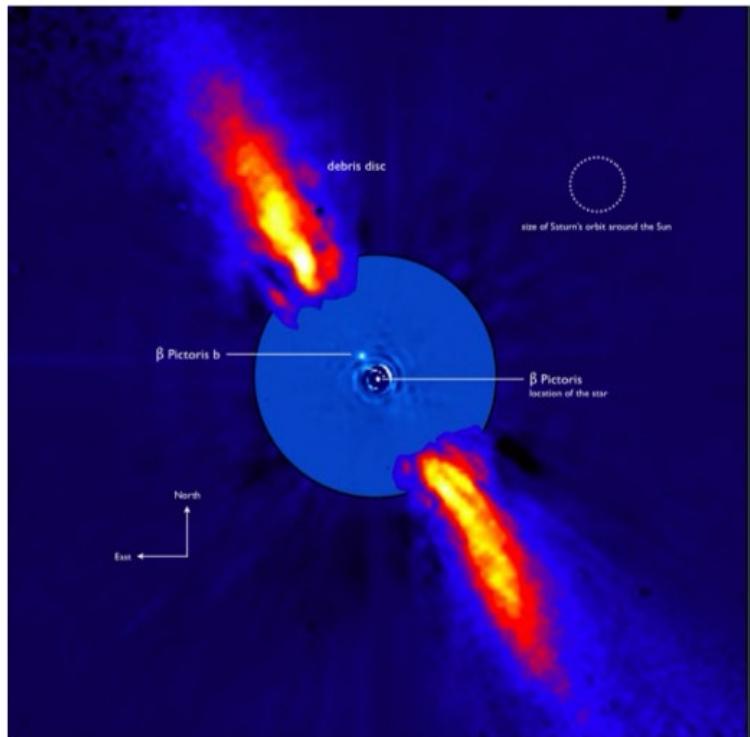


Fig.3. Image composite du disque de l'étoile Beta Pictoris observée avec le télescope de 3,60 m de l'ESO et l'instrument NACO du VLT de l'ESO. Beta Pictoris est une étoile jeune dont le disque est vu par la tranche. Une planète, Beta Pic b, est détectée à 8 ua de l'étoile centrale. Crédit : ESO/A.-M. Lagrange.

Enfin, depuis 2012, le réseau international d'antennes submillimétriques ALMA permet de réaliser des images de nombreux disques protoplanétaires, d'en étudier les structures, et même, parfois, de découvrir des planètes entre les sillons de ces disques.

Un scénario typique de formation stellaire

Les étoiles se forment au sein de nuages interstellaires, formés de gaz et de poussières, dont certains fragments s'effondrent sous l'effet de leur propre gravité. S'ils sont en rotation, ce qui est fréquent, la matière effondrée ne prend pas la forme d'une sphère (ce qui est le cas en l'absence de rotation), mais prend la forme d'un disque perpendiculaire à l'axe de rotation du fragment initial.

Les observations ont montré que la formation de l'étoile (ou des étoiles, si le disque se scinde en plusieurs morceaux) s'accompagne d'un double jet de matière, perpendiculaire au plan du disque, dont la vitesse atteint plusieurs centaines de km/s. Ce jet a pour effet d'évacuer le moment angulaire de l'intérieur du disque vers l'extérieur. Notons au passage que c'est sans doute par un tel mécanisme que la nébuleuse solaire primitive a évacué son propre moment angulaire, celui-ci se trouvant essentiellement aujourd'hui dans le mouvement orbital de Jupiter ; ainsi se trouve résolue la question longtemps débattue de la lente rotation du Soleil sur lui-même. Les grandes étapes de la formation stellaire – effondrement du nuage, formation d'un disque, éjection de matière via

les jets – se retrouvent quelle que soit la masse de l'étoile. En revanche, la vitesse d'évolution de l'étoile varie beaucoup en fonction de sa masse. Les étoiles les plus massives ont une durée de vie très courte, et se transforment en supernova en quelques dizaines de millions d'années. Une étoile de type solaire se transformera en géante rouge au bout d'une dizaine de milliards d'années, tandis que la durée de vie des naines rouges est supérieure à l'âge de l'Univers.

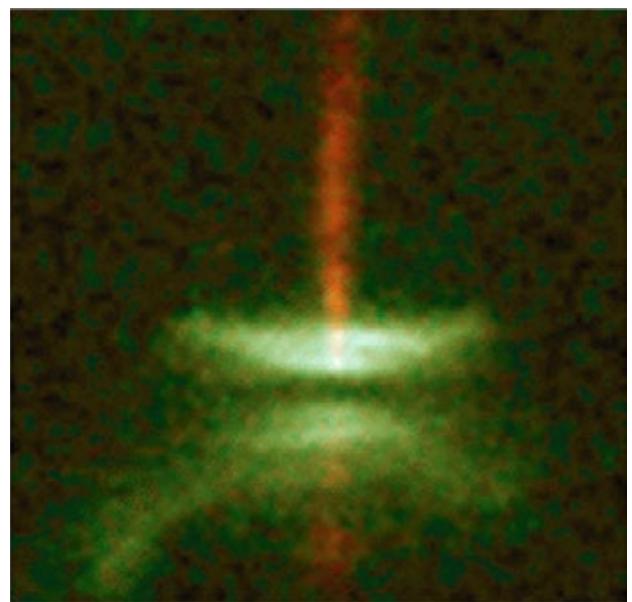


Fig.4. L'étoile en formation HH30, observée par le télescope spatial Hubble (HST). On voit clairement le jet vertical (en rouge). Le disque, vu par la tranche et évasé à ses extrémités, apparaît en noir en raison de l'opacité des poussières qu'il contient ; seuls ses côtés sont illuminés par l'étoile (cachée par le disque). Crédit : NASA/ESA.

Au sein du disque protoplanétaire, la formation des planètes

Comment les planètes du Système solaire se sont-elles formées ? Deux modèles se sont longtemps affrontés. Le premier, proposé par Alastair Cameron (1925-2005) considère un disque massif, de masse comparable à celle du Soleil. Les planètes se forment directement à partir du gaz et des poussières du disque protosolaire, suite à une instabilité gravitationnelle. La matière du disque est ensuite balayée par le vent issu du jeune Soleil en formation, et les planètes terrestres, proches du Soleil, perdent progressivement leur gaz. Le second modèle, proposé par Victor Safronov, repose sur un disque peu massif, dont la masse est environ le centième de celle du Soleil. À mesure que le disque se refroidit, les éléments lourds se condensent en poussières qui s'agglomèrent grâce aux forces électrostatiques, puis grossissent par le jeu des collisions mutuelles pour former des planétésimaux. Ceux-ci continuent à croître puis, en attirant par gravité la matière environnante, deviennent des planétoïdes, puis, par le jeu des collisions, un nombre restreint de planètes.

Dans le cas du Système solaire, le modèle de Safronov, aussi appelé modèle de nucléation, est aujourd’hui largement plébiscité par les astronomes, car c'est celui qui permet le mieux de rendre compte de l'histoire dynamique des planètes et des astéroïdes. Depuis une vingtaine d'années, celle-ci peut être décrite par les modèles de simulation numérique décrivant l'évolution d'un système à N corps sous l'effet des forces de gravitation.

Planètes rocheuses et planètes géantes

Le modèle de nucléation a un autre avantage : il permet de rendre compte de la division des planètes du Système solaire en deux classes : proches du Soleil, les “terrestres”, appelées aussi “rocheuses”, et à plus grande distance, les

géantes. Comment expliquer cette dichotomie ? Elle est due au fait que les planètes, dans le modèle de Safronov, se forment à partir de l'agglomération de particules solides. La question est donc de savoir quelle est la composition de ces particules solides à une distance donnée du Soleil. Dans le disque protosolaire, la température décroît à mesure que la distance au Soleil augmente.

Près du Soleil, les seuls constituants sous forme solide sont les roches et les minéraux qui sont formés d'atomes lourds ; or ceux-ci sont bien moins abondants que le carbone, l'azote ou l'oxygène, eux-mêmes bien moins abondants que l'hydrogène. En effet celui-ci, formé à l'origine de l'Univers dans le scénario du Big Bang, représente (avec l'hélium), près de 98 % en masse de l'ensemble des éléments chimiques. Les éléments plus lourds, à commencer par le carbone, l'azote et l'oxygène, ont été synthétisés dans les étoiles. Les éléments C, N et O sont environ mille fois moins abondants que l'hydrogène, et les éléments plus lourds (silicium, fer...) sont encore bien moins abondants, car leur synthèse au sein des étoiles demande une énergie considérable. Les planètes formées près du Soleil seront donc relativement petites et denses : ce sont les planètes dites rocheuses ou terrestres ou encore telluriques.

Plaçons-nous maintenant loin du Soleil, à plus de 3 unités astronomiques. La température est suffisamment basse pour que les petites molécules formées à partir de H, C, N et O (H_2O , CH_4 , NH_3 , CO_2 ...) qui étaient gazeuses dans le cas précédent, soient maintenant sous forme de glace. Elles peuvent alors être incorporées dans des noyaux planétaires bien plus massifs que dans le cas des planètes rocheuses. Or, les calculs montrent que si la masse des noyaux atteint une dizaine de masses terrestres, ceux-ci peuvent, par leur champ de gravité, capturer la matière environnante du disque, c'est-à-dire principalement l'hydrogène et l'hélium. Les planètes ainsi formées seront donc très massives et très volumineuses, mais de faible densité (figure 5).

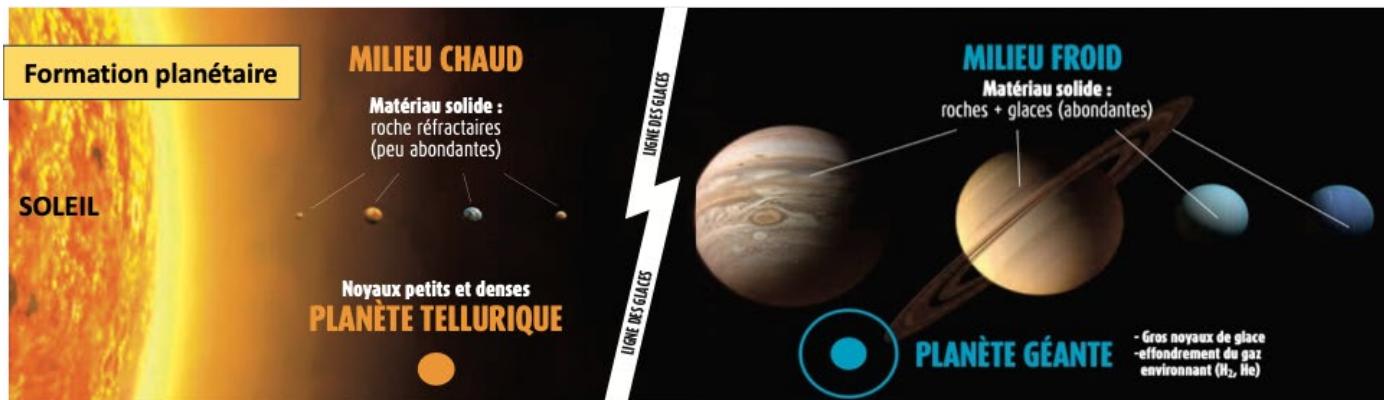


Fig.5. Scénario de formation planétaire dans le cas du Système solaire. Les planètes telluriques (appelées aussi rocheuses, ou terrestres) se forment en milieu relativement chaud, et les planètes géantes dans le milieu froid. La limite entre les deux régions est la température de condensation de l'eau en milieu très dilué. Crédit : T. Encrenaz, *L'Astronomie*, n° 151, p. 32, 2021.

Dans le cas du Système solaire, le modèle de nucléation a l'avantage d'expliquer simplement la division des planètes en deux catégories différentes, les rocheuses et les géantes. Largement reconnu dès le début des années 1990, il pouvait passer pour un modèle générique, applicable aux autres disques protoplanétaires et aux autres éventuels systèmes planétaires dont l'existence semblait plausible, mais qui restaient à découvrir. C'est pourquoi la surprise a été totale lorsqu'en 1995, Michel Mayor et Didier Queloz ont annoncé la découverte, autour d'une étoile de type solaire, d'une exoplanète géante à proximité immédiate de son étoile, 51 Peg. On apprenait d'un coup que le Système solaire n'était pas unique (ce dont on se doutait), mais aussi qu'il n'était pas représentatif des systèmes planétaires qui nous entourent.

Un nouveau mécanisme : la migration

Dans le cas du système de 51 Peg, comment expliquer la présence d'une planète géante très près de son étoile ? Dans leur article de la revue *Nature* annonçant leur découverte, les auteurs annoncent déjà un mécanisme susceptible d'expliquer ce phénomène : c'est la migration. La planète géante se serait bien formée loin de son étoile, conformément au modèle de nucléation décrit ci-dessus. Elle aurait ensuite migré vers l'intérieur par un mouvement de spirale, suite à son interaction avec le disque protoplanétaire. Après la découverte de 51 Peg b, de nombreuses exoplanètes géantes ont été découvertes très près de leur étoile, à une distance d'environ 0,05 ua, ce qui correspond à une période de rotation de quelques jours seulement. La migration des exoplanètes, dont les modèles ont été développés par de nombreux auteurs, est au-

jourd'hui reconnue comme un mécanisme essentiel dans l'évolution des systèmes exoplanétaires.

Par ailleurs, grâce aux progrès réalisés dans l'imagerie des disques protoplanétaires, dans l'infrarouge comme dans le domaine radio, il a été possible de détecter directement des planètes en formation au sein de disques protoplanétaires, mettant en évidence la croissance de la protoplanète au sein d'un sillon du disque, par l'attraction de la matière qui l'environne. Des images ont été obtenues dans l'infrarouge proche, grâce à un système coronographique. (figure 6), mais aussi avec le réseau d'antennes ALMA dans le domaine millimétrique.

Dès lors, une nouvelle question s'est posée : si la migration est un phénomène couramment observé dans les systèmes planétaires, pourquoi n'observons-nous pas cet effet dans le Système solaire ? Cette question n'est pas étrangère au développement de modèles de simulation numérique retracant l'histoire dynamique du Système solaire. Ceux-ci, rendus possibles grâce à l'avènement des super-calculateurs, ont connu un nouvel essor, en particulier à l'Observatoire de Nice, déjà connu depuis des décennies pour les travaux de mécanique céleste qui y étaient menés. En 2005, un groupe international de chercheurs publie le « Modèle de Nice » selon lequel les planètes géantes ont connu une migration modérée au cours de leur histoire. Elles auraient évolué à partir d'une position plus compacte, Jupiter se déplaçant légèrement vers l'intérieur et les autres géantes vers l'extérieur.

Ce scénario a l'avantage de rendre compte d'un certain nombre d'observations, telles que le nuage de Oort, la ceinture de Kuiper ou les astéroïdes troyens (situés sur l'orbite de Jupiter, à 60° en avant et en arrière de la planète). Plusieurs années plus tard, ce modèle, toujours développé autour de l'équipe de Nice, s'est trouvé complété par un autre scénario, celui du “Grand Tack” qui décrit l'évolution du système dans sa toute première phase, pendant le premier million d'années. Selon les simulations numériques étayant ce scénario, Jupiter se serait formé à environ 3,5 ua, juste au-delà de la ligne des glaces. La planète aurait migré vers l'intérieur jusqu'à l'orbite de Mars, suivie ensuite par Saturne, et les deux planètes géantes seraient ensuite reparties vers l'extérieur pour atteindre la position de départ du modèle de Nice (figure 7). Ce modèle pourrait expliquer, en particulier, la petite taille de Mars dont la formation aurait été stoppée par ce processus. Cependant, ce modèle ne constitue pas une solution unique et des scénarios alternatifs sont encore à l'étude pour tenter de reproduire au mieux les données existantes.



Fig.6. Le disque protoplanétaire PDS 70, observé dans l'infrarouge proche par l'instrument SPHERE du Very Large Telescope de l'ESO (European Southern Observatory) au Chili. Un disque coronographique cache l'étoile centrale, ce qui permet de mettre en évidence les détails du disque qui l'entoure. Une planète en formation apparaît clairement dans le sillon de ce disque, entre la position de l'étoile et l'anneau extérieur. Crédit : ESO/ A. Müller et al., Wikimedia Commons.

Système solaire et systèmes planétaires : une synergie permanente

En résumé, il apparaît que s'est établie, au cours des trente dernières années, une synergie entre les études sur la formation du Système solaire et celle des disques protoplanétaires. Les premiers modèles de formation des planètes ont été extrapolés aux systèmes planétaires et réciproquement, les modèles de migration ont été appliqués

avec succès à l'histoire dynamique du Système solaire. Si notre connaissance des origines du Système solaire doit beaucoup aux observations astronomiques, depuis le sol comme depuis l'espace, elle doit aussi énormément au développement des modèles de simulation numérique qui ont pu retracer l'évolution dynamique des différentes familles d'objets.

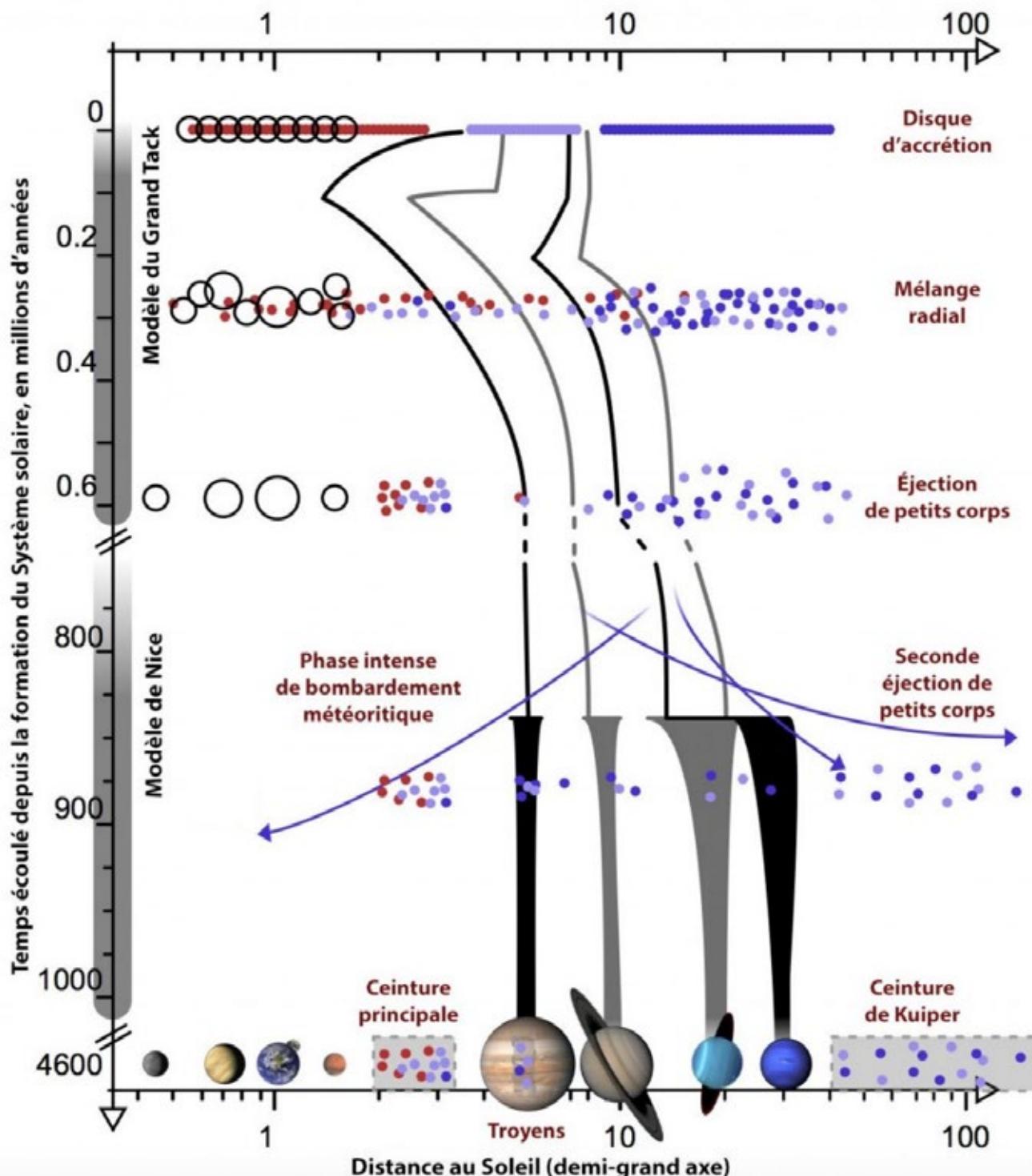


Fig. 7. La migration des planètes géantes au cours de l'histoire du Système solaire. En haut, la première phase se déroule très tôt, au cours du premier million d'années. La seconde commence avec le grand bombardement massif à $t = 800\ 000$ ans environ. Il est provoqué par le passage du système Jupiter-Saturne à la résonance 2 : 1 (Jupiter faisant 2 révolutions autour du Soleil quand Saturne en fait une). Adapté de F. De Meo et B. Carry, *Nature* 505, 629 (2014).