

Nouvelles du système solaire

Depuis que Pluton a été déclassée en 2006, de planète à part entière vers la dénomination de planète naine, beaucoup d'évènements se sont produits qui ont changé notre vision sur le système solaire, notre habitat principal. Notre planète, la Terre, est une des quatre planètes rocheuses, qui ont un sol, une croûte solide où poser les pieds. Mais c'est bien la seule qui soit si agréable à vivre ! Mercure, tout près du Soleil, n'a pas d'atmosphère, et la température du sol peut aller de -180°C la nuit à plus de 400° le jour ; Vénus, elle, a une atmosphère étouffante dont la pression est 90 fois celle de la Terre, mais composée de gaz carbonique, produisant un effet de serre tel, que sa température est plus de 460°C . Mars enfin, située à une distance du Soleil environ 1,5 fois la distance Terre-Soleil (que l'on appelle unité astronomique, ou ua), a une masse dix fois plus petite que la Terre. Son atmosphère est très ténue, faite de gaz carbonique essentiellement, et sa température maximisée à l'équateur à $20-25^{\circ}\text{C}$, pour descendre jusqu'à -120° aux pôles. Nous connaissons beaucoup mieux la planète Mars, depuis que des robots l'ont parcourue, comme Curiosity, qui ont creusé le sol, extrait des échantillons, et examiné leur composition chimique. Depuis très longtemps, les astronomes contemplant Mars et sa surface, avaient été stupéfaits de voir des structures ressemblant à des canaux, des rivières, où des ravines qui ne pouvaient être dues qu'à l'érosion d'un liquide. Aujourd'hui, si on sait qu'il n'y a pas d'eau sur la surface, par contre, on a pu démontrer qu'il existait de réserves d'eau en sous-sol. D'autre part les ravines sont peut-être dues à des pluies et des orages, mais de neige carbonique.

Le rover Curiosity a été lancé il y a déjà 7 ans, et s'est posé sur Mars en Août 2012. Conformément à ce qui était programmé, il s'est posé au pied du mont Sharp haut de 5,5 kilomètres, dans le cratère Gale de 150 kilomètres de diamètre. Depuis, il a parcouru, lentement mais sûrement, plus de 21 km, et son exploration a permis de montrer que la planète était habitable il y a plus de trois milliards et demie d'années, que toutes les conditions étaient réunies pour que de la vie puisse apparaître à sa surface, et en particulier il y faisait plus chaud et humide qu'aujourd'hui. Dans la région explorée, Curiosity a découvert une magnifique roche feuilletée qui prouve que cet endroit était très humide dans le passé. La structure de la roche suggère que le vent et de l'eau en mouvement, donc des rivières, ont façonné cet endroit.

De plus de surprises moléculaires organiques ont été découvertes. Lorsque Curiosity a creusé et analysé la poudre de roche recueillie, une bouffée de méthane s'est dégagée, augmentant l'abondance de ce gaz dans l'atmosphère d'un facteur 10 au moins. Le méthane avec le gaz carbonique de l'atmosphère a formé du méthanol, du formaldéhyde, des molécules organiques, jusqu'au chlorobenzène. Le méthane pourrait avoir été formé lorsque des roches comme l'olivine ont rencontré l'eau souterraine de Mars, ou bien à partir de microbes subsistant dans cette eau souterraine. L'histoire de l'abondance de l'eau sur Mars a pu être suivie, grâce au prélèvement de l'eau dans les roches, d'âges variés. Le rapport isotopique deutérium/hydrogène augmente avec le temps, car l'hydrogène plus léger s'évapore et quitte Mars plus facilement. Le rapport isotopique est bien plus grand sur Mars aujourd'hui que sur Terre. Si l'on suppose ce rapport constant dans tout le système solaire à sa formation, on peut en déduire que Mars a perdu l'essentiel de son eau.

Le cœur de la mission de Curiosity était de rechercher et démontrer l'habitabilité de Mars. Les principaux éléments nécessaires à la vie y ont été trouvés :

oxygène, hydrogène, soufre, phosphore, carbone et azote. Les données recueillies dans une région du cratère de Gale montrent l'existence d'un ancien système fluvial ou d'un lit de lac humide par intermittence qui aurait pu fournir de l'énergie chimique et d'autres conditions favorables aux microbes. La roche est constituée d'une boue à grains fins contenant des minéraux d'argile, de sulfate et d'autres produits chimiques, un environnement humide, ni très oxydant, ni acide ou trop salé.

Ces minéraux argileux sont le produit de la réaction d'une eau relativement douce avec des minéraux ignés, tels que l'olivine, également présents dans les sédiments. De façon surprenante, Curiosity a mis en évidence un mélange de produits chimiques oxydés, moins oxydés et même non oxydés, fournissant un gradient d'énergie du même type que celui qu'exploitent de nombreux microbes sur Terre. Cette oxydation partielle était présente dans les déblais de forage, qui se sont avérés être gris plutôt que rouges. L'éventail d'ingrédients chimiques identifiés est impressionnant et suggère des associations telles que des sulfates et des sulfures qui indiquent une source d'énergie chimique possible pour les micro-organismes. Ces observations ont définitivement prouvé que les conditions sur Mars autrefois étaient favorables à la vie. Curiosity a encore de l'énergie et pourra fonctionner pendant plusieurs années. Il a déjà mis en évidence une grande variété de terrains, et notamment des unités d'argile, qui n'avaient pas été soupçonnées par observation lointaine auparavant, sans doute car recouvertes de petits cailloux ou de poussière.

Au-delà des planètes telluriques, les quatre autres planètes Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune sont gazeuses, et peu propices à une vie telle que nous la connaissons. Elles possèdent toutefois des satellites en grand nombre, et sur certains des phénomènes spectaculaires ont été mis en évidence. Sur Europe, grosse lune de Jupiter, ou Encelade, satellite de Saturne, la surface est glacée, mais sous la glace existent des océans qui pourraient contenir de l'eau liquide, élément nécessaire à la vie. Cette eau serait maintenue liquide grâce à des sources d'énergie, qui pourraient aussi servir à des organismes vivants. Sur Terre, il s'agit de la photosynthèse mais sur ces lunes glacées, il s'agit d'une chimiosynthèse comparable à celle exploitée sur Terre dans les abysses autour des sources hydrothermales.

En passant tout près de ces lunes glacées, les vaisseaux spatiaux envoyés par la NASA ont mis en évidence des geysers, ou émission d'eau à des altitudes de l'ordre de 200 kilomètres. Ces geysers, qui viennent confirmer les images qu'en avait fait le télescope spatial Hubble (HST, voir Figure 1), proviendraient du chauffage et de l'énergie libérée par les forces de marée de Jupiter. Ce sont ces mêmes forces de marée qui créent des volcans à la surface d'Io, un autre satellite de Jupiter par exemple. L'eau propulsée en hauteur à travers la glace, produit des panaches de vapeur d'eau visibles à très grande distance. L'observation de ces panaches, prévue dans des missions spatiales futures, pourrait nous renseigner sur la présence ou non de molécules biologiques et la présence de vie primitive dans les océans sous la glace.

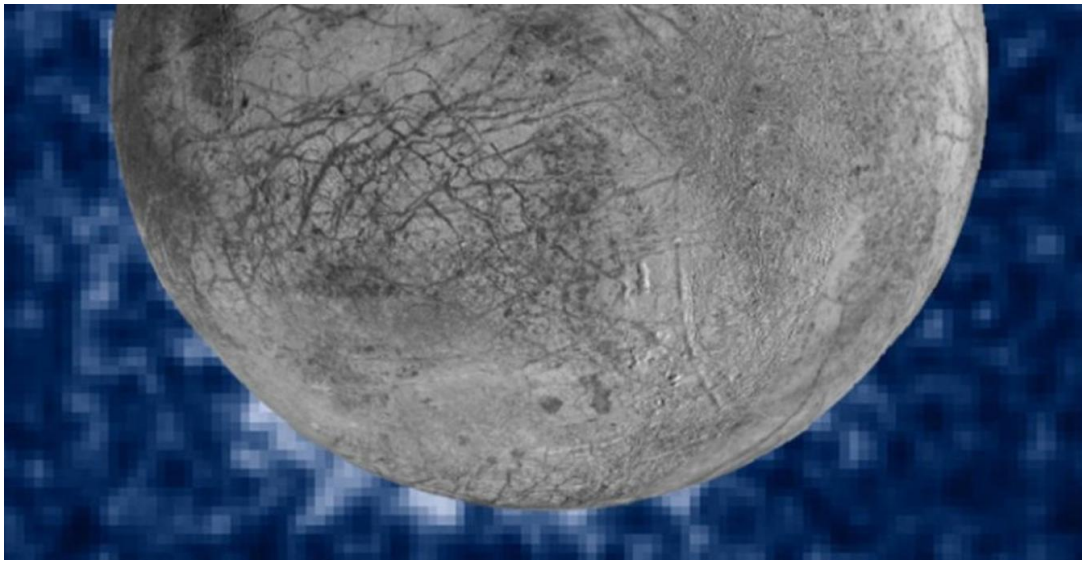


Figure 1 : Autour d'Encelade, satellite de Saturne (en haut, observation de Cassini/Huygens) et d'Europe, satellite glacé de Jupiter (en bas, ici en bleu et blanc, images HST/NASA/ESA), ont été observées des éjections de vapeur d'eau, des geysers,

Un autre satellite de Saturne a été récemment étudié de près par la mission Cassini-Huygens, de l'Agence Spatiale Européenne, le satellite Titan. C'est le seul dans le système solaire à disposer d'une atmosphère assez dense dont les caractéristiques sont proches de celles de la Terre. La mission a recueilli in situ des données sur la composition de l'atmosphère de Titan, sur la vitesse des vents et sur sa température. Le composant essentiel est le méthane. De même la nature du sol du satellite et sa topographie ont été déterminées. Au sol, les paysages rappellent ceux de la Terre, avec des galets de méthane gelé, et des océans de méthane et d'hydrocarbures (cf Figure 2). La sonde Huygens a été déposée sur Titan en 2005, et la mission Cassini s'est terminée en 2017. Le méthane se transforme en cyanure d'hydrogène et d'autres hydrocarbures dans son atmosphère riche en azote, colorant ainsi le ciel d'un orange tirant vers la brique ocre.

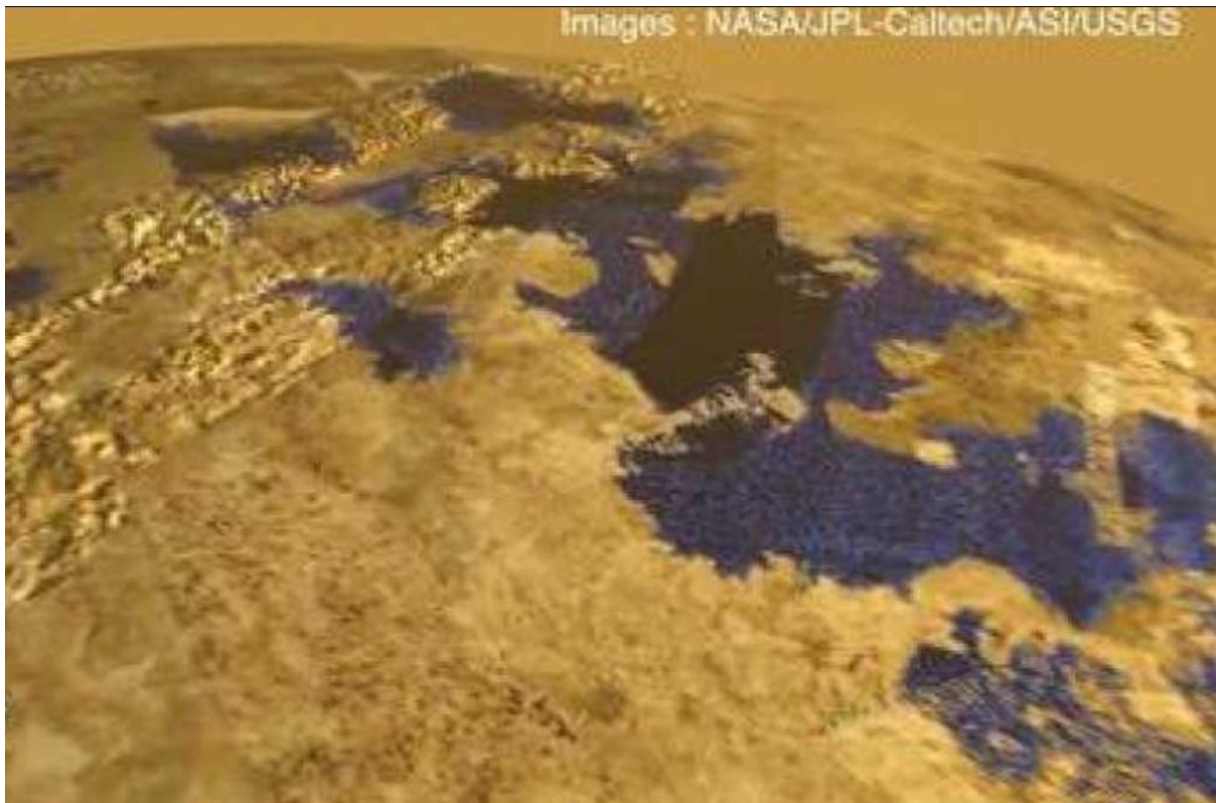


Figure 2 : Carte de la surface de Titan, montrant des océans liquides de méthane et hydrocarbures (mission Cassini-Huygens, NASA/ESA)

Neptune, à une distance de 30 unités astronomiques (ua) du Soleil, est la plus lointaine planète du système solaire, mais le système s'étend bien au-delà de Neptune, avec des petits corps, des planètes naines comme Pluton, la ceinture de Kuiper. Cette ceinture est constituée de petits objets, des astéroïdes, qui orbitent entre 35 et 55 ua. Contrairement aux astéroïdes entre Mars et Jupiter, qui sont rocheux, ceux-ci sont essentiellement formés de glaces d'eau, de méthane ou d'ammoniac. Récemment en 2014, les astronomes se sont aperçus d'une distorsion caractéristique des trajectoires de certains objets de la ceinture de Kuiper. Ces objets ont une orbite excentrique, et ne sont pas distribués dans une structure d'équilibre apparente, mais ils sont décalés d'un seul côté, car leurs orbites excentriques sont alignées entre elles. Cette distorsion ne peut pas se produire toute seule, mais serait due à l'influence gravitationnelle d'une hypothétique neuvième planète, que l'on appelle provisoirement planète 9, ou P9. De même que l'astronome français Urbain le Verrier en 1846 avait découvert Neptune, par les perturbations de sa gravité sur les orbites d'Uranus et des autres planètes, les astronomes américains Konstantin Batygin et Michael Brown en 2016 prédisent l'existence de P9 uniquement par les calculs de ses perturbations sur les objets de la ceinture de Kuiper.

Depuis, plusieurs groupes se sont penchés sur les caractéristiques possibles de P9 : son rayon et sa masse pourraient être comparables à ceux de Neptune, qui a un rayon de 25 000 km, et une masse 17 fois la masse de la Terre. Sa distance au Soleil pourrait être entre 100 et 200ua, avec une période de révolution de l'ordre de 1000 ou 2000ans. Sa distance implique une luminosité très faible, et sa détection nécessite de

grands télescopes de 8m de diamètre, avec un très grand champ, car il est encore très difficile de prédire exactement dans quelle direction elle pourrait se trouver. Dans un futur proche, de grands télescopes à grand champ vont être opérationnels pour une observation globale du ciel, comme le LSST (Large Synoptic Survey Telescope) au Chili, qui fera un relevé complet du ciel austral tous les 3 jours.

En attendant de la découvrir, plusieurs équipes se sont penchées sur le mode de formation de cette planète massive, très loin des autres planètes de notre système solaire. Heureusement, de nombreuses théories permettent d'envisager un scénario, et ceci grâce à l'intense activité autour de la découverte des planètes extra-solaires, depuis 1995. Il y a près de 24 ans maintenant, les astronomes suisses Michel Mayor et Didier Queloz découvraient une planète de la moitié de la masse de Jupiter orbitant autour de l'étoile de type solaire 51 pegasi, à une distance de 0,05 ua, et une période de révolution de 4 jours !. C'était la porte ouverte à la détection d'une multitude d'autres planètes, qui au début étaient pratiquement toutes très massives, et situées très près de leur étoile ; c'est pourquoi on les a appelées des Jupiters chauds. Cette disposition peut apparaître très surprenante, au vu de la disposition des 8 planètes dans notre système, avec Jupiter très éloignée, à 5ua. Mais elle est due à la méthode de détection, basée sur la vitesse radiale de l'étoile : celle-ci, par effet de recul, tourne aussi autour de sa planète, mais avec une vitesse très faible, de l'ordre de 10m/s. Pour pouvoir détecter des vitesses aussi faibles, il faut que la planète soit massive et très proche. La deuxième méthode pour détecter la présence de planètes autour d'étoiles proches est celle du transit : la planète en passant devant son étoile obscurcit une toute petite partie de son disque visible, et la luminosité de l'étoile est périodiquement diminuée. Là encore, il est plus facile de détecter de grosses planètes, qui sont proches, donc avec une période de quelques jours. Aujourd'hui, plus de 6000 exoplanètes sont répertoriées. (<http://exoplanetes.esep.pro/>).

L'existence de ces Jupiters chauds a donné lieu à une intense activité de recherche des processus dynamiques jouant un rôle majeur lors de la formation des disques proto-planétaires. Une étoile se forme à partir d'un nuage de gaz, qui très vite se distribue en un disque d'accrétion mince, en rotation képlérienne autour de la proto-étoile, puis étoile centrale. Le rayonnement de l'étoile chauffe le disque, et évapore les éléments plus volatils ; il reste des grains de poussière qui vont progressivement entrer en collision et fusionner pour former des objets plus gros et des planétésimes, ou embryons de planètes de quelques kilomètres de taille. C'est à ce moment là que des embryons plus gros que les autres, de la taille de 1000km environ, donc des protoplanètes, peuvent interagir gravitationnellement avec le reste de gaz et de poussière dans le disque, et créer des perturbations spirales et des sillons annulaires (cf Figure 3). Ces perturbations réagissent en retour sur la protoplanète, et peuvent soit la freiner dans sa rotation, soit l'accélérer. La protoplanète migre radialement dans le disque. C'est ainsi que des Jupiters, planètes gazeuses et massives, qui normalement se forment loin de leur étoile, peuvent s'en approcher tout près, jusqu'à peut-être tomber et fusionner avec elle. De la même façon, surtout s'il existe un grand nombre de planétésimes entrant en résonance, la protoplanète peut migrer vers l'extérieur du disque. Cela expliquerait pourquoi la planète hypothétique P9 dans le système solaire est aujourd'hui si loin du Soleil.

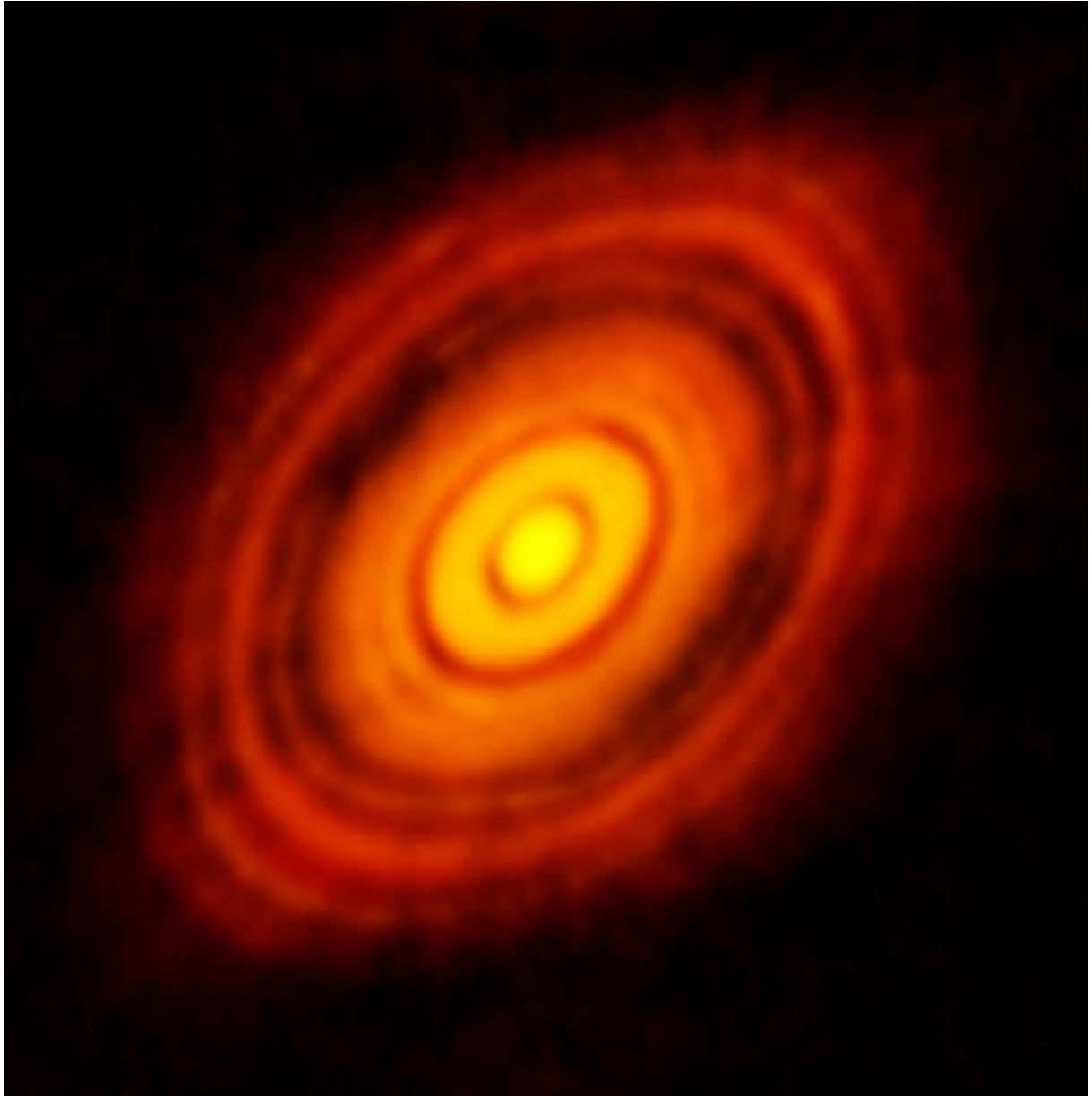


Figure 3 : Image du disque protoplanétaire de HL Tauri réalisée par l'Atacama Large Millimeter Array (ALMA). HL Tau est une jeune étoile, de moins d'un million d'années d'âge, entourée d'un disque protoplanétaire. Le disque est composé de régions brillantes, grâce à l'émission de la poussière, séparées par des sillons noirs, évidés chacun par la formation d'une planète.

Le phénomène de migration radiale des planètes peut expliquer l'existence d'une phase de grand bombardement tardif, c'est-à-dire une phase ultérieure à la formation des planètes, qui provoque la chute de petits corps, comme les astéroïdes sur les planètes et leurs satellites, provoquant d'énormes impacts et cratères. En effet, après la formation des planètes, un équilibre relatif s'est établi, minimisant les collisions. Grâce à des résonances gravitationnelles, les astéroïdes sont confinés dans des anneaux, et ne croisent plus l'orbite des planètes. Ceci est remis en cause par la migration des planètes massives, comme Jupiter ou la planète 9, qui déstabilise les

petits corps, provoque des collisions et un grand bombardement, qui nettoie le disque d'une grande partie des petits objets. Le modèle proposé par l'équipe d'astronomes de l'Observatoire de Nice pour la formation de notre système solaire inclut le bombardement tardif, qui explique les observations des croûtes terrestre et lunaire, qui sont 600 millions d'années plus récentes que la formation du système solaire, et aussi la faible masse de la ceinture de Kuiper, seulement 1% de ce qui aurait pu être attendu du disque initial. De même le nombre de planètes naines comme Pluton aurait pu être 1000 fois plus grand.

La très grande variété des systèmes planétaires découverts aujourd'hui nous aide à mieux comprendre notre système solaire. On estime que la probabilité de trouver des planètes autour des étoiles de masse voisine à celle du Soleil est de 100%. De plus, on détecte de nombreux systèmes à planètes multiples, jusqu'à 8 planètes ! Le nombre de planètes dans notre galaxie la Voie lactée serait donc de plusieurs centaines de milliards. Des planètes autour d'étoiles doubles ou triples ont aussi été détectées. Et toutes les géométries et arrangements sont possibles, les périodes de révolution observées vont de 2 à 2000 jours (de plus grandes périodes sont très difficiles à détecter avec les méthodes actuelles). Les planètes massives sont plus rares que les petites, elles se forment vers l'extérieur des disques proto-planétaires, puis migrent vers le centre grâce à leur interaction avec le gaz du disque. Comment peut-on alors expliquer l'absence de Jupiter chaud dans notre système solaire?

Dans les modèles et simulations numériques menées par plusieurs équipes, y compris celle de Nice, les planètes géantes se forment plus vite que les autres, dans le disque externe, en quelques millions d'années, alors que les planètes telluriques n'ont pas terminé leur formation. Jupiter aurait bien commencé à migrer vers le centre, mais le gaz du disque a disparu assez vite, par la pression du rayonnement et le vent solaire, et Jupiter se serait arrêté vers 1.5 ua. Les planètes géantes auraient alors rebroussé chemin. En effet, lorsque le gaz du disque a disparu, les résonances entre planètes prennent alors le dessus, plus lentement. Les résonances entre les mouvements de Jupiter et Saturne ont déclenché une migration vers l'extérieur, et expliquent la position de Jupiter à 5ua aujourd'hui. L'arrivée de Jupiter à 1.5 AU et son revirement auraient nettoyé le disque à cet endroit, et empêché l'embryon de la planète Mars de croître. Les modèles sans Jupiter prévoient une masse de Mars cinq fois plus grande. D'autres scénarios moins rapides, proposent que des résonances entre les planètes massives externes et les planétésimes internes auraient balayé lentement le disque, empêchant la protoplanète Mars d'accumuler autant de masse que prévue, de même pour la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter dont la masse totale n'est que de quelques pourcents de la masse de la Lune.

Dans tous les cas possibles et tous les scénarios, c'est bien Jupiter le principal coupable de la très faible masse de Mars, seulement un dixième de la masse de la Terre !

Aujourd'hui, le système solaire n'évolue que très lentement, loin du grand bombardement tardif, ou des grandes migrations. Très lentement par exemple, la Lune s'éloigne de la Terre de 3cm par an, à cause des forces de marée, et de même parmi les satellites de Mars Phobos se rapproche (2cm par an) alors que Deimos s'éloigne. Mais

de grands changements sont attendus au niveau du Soleil. Notre étoile est une étoile banale, très ordinaire, de température de surface de 6000 degrés environ, qui la fait apparaître comme une naine jaune. Elle est actuellement au milieu de sa vie. Dans 5 milliards d'années, lorsqu'elle aura brûlé tout son combustible d'hydrogène en hélium, elle va devenir une géante rouge, de rayon 200 fois son rayon actuel, soit 1 ua, et la Terre sera englobée, détruite et avalée par la géante. Et même si seulement Mercure et Vénus sont complètement évaporées, la Terre sera chauffée à une température telle qu'il n'y aura plus d'océans, mais seulement un désert brûlé. Après une phase très lumineuse, lorsque tout le combustible sera vraiment épuisé dans le noyau, le Soleil éjectera son enveloppe de gaz ionisé à 10 000 degrés dans l'espace, et l'ensemble deviendra une nébuleuse planétaire. Les éléments ou métaux formés par le Soleil au cours de sa vie vont ainsi rejoindre l'espace interstellaire, pour former de nouvelles étoiles, enrichies en éléments lourds, qui formeront ainsi plus de planètes. Pendant ce temps, le cœur du Soleil va s'effondrer en naine blanche, un état dégénéré de la matière, où la densité atteint une tonne par centimètre cube. La pression quantique de Pauli compense alors la gravité, et la naine blanche se refroidit lentement dans la nuit des temps.

Bibliographie

- Batygin, K, Brown, M.E.: 2016, *Astron. J.* 151, 22: Evidence for a Distant Giant Planet in the Solar System
- Bromley, B. C., Kenyon, S.J: 2017, *Astron. J* 153, 216, Terrestrial Planet Formation: Dynamical Shake-up and the Low Mass of Mars
- Gomes, R., Levison, H. F., Tsiganis, K., Morbidelli, A.: 2005, *Nature* 435, 466: Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets (modèle de Nice)
- Hurowitz, J. A., Grotzinger, J. P., Fischer, W. W. et al. 2017, *Science* 356, 6849: Redox stratification of an ancient lake in Gale crater, Mars (Curiosity)
- Porco C. C., Helfenstein, P., Thomas, P. C. et al.; 2006, *Science* 311, 1693: Cassini Observes the Active South Pole of Enceladus
- Spencer, J. R., Pearl, J. C., Segura, M. et al.: 2006, *Science* 311, 1401: Cassini Encounters Enceladus: Background and the Discovery of a South Polar Hot Spot
- Teolis, B. D., Wyrick, D. Y., Bouquet, A. et al : 2017, *Icarus* 284, 18: Plume and surface feature structure and compositional effects on Europa's global exosphere: Preliminary Europa mission predictions
- Tobie, G., Cadek, O., Sotin, C.: 2008, *Icarus* 196, 642: Solid tidal friction above a liquid water reservoir as the origin of the south pole hotspot on Enceladus
- Walsh, K. J., Morbidelli, A., Raymond, S. et al. 2012, *Meteoritics & Planetary Science*, Vol 47, Issue 12, p. 1941: Populating the asteroid belt from two parent source regions due to the migration of giant planets—"The Grand Tack"