

ÉPREUVE ORALE D'ANALYSE DE DOCUMENTS SCIENTIFIQUES 2018

FILIERE PC

DOSSIER n° 1.1

« *Les systèmes planétaires sont-ils pleins à craquer ?* »

Ce dossier est constitué d'un article portant sur la stabilité des systèmes planétaires.

Dans votre exposé, qui durera environ 15 minutes, **en vous appuyant sur vos connaissances**, vous ferez une synthèse du sujet, soulignerez et explicitez les principaux concepts physiques abordés ainsi que les ordres de grandeur évoqués dans le document, le cas échéant.

Remarques :

- *L'usage de la calculatrice est interdit pendant la phase de préparation.*
- *A l'issue de l'épreuve, tous les documents (brouillons, présentation, notes diverses) doivent être impérativement remis à l'examineur.*
- *Le dossier proposé est constitué de reproductions de textes ou d'extraits de textes scientifiques d'origines variées. Ces documents, comme tout document scientifique, peuvent être critiqués, voire contenir des erreurs. Si tel est le cas, cela ne doit pas gêner le/la candidat(e) au cours de sa préparation. Au contraire, il/elle pourra le mentionner au cours de l'exposé ou de la discussion avec l'examineur.*
- *Certaines parties de textes peuvent faire appel à des notions qui ne figurent pas au programme des classes préparatoires. Les candidats pourront s'attacher à expliciter les phénomènes physiques élémentaires mis en jeu, et pourront s'appuyer sur les encadrés ou annexes s'ils existent, pour mieux assimiler ces notions. Dans tous les cas, aucune connaissance hors programme ne sera attendue par l'examineur de la part du candidat ou de la candidate.*

Les systèmes planétaires sont-ils

Des simulations montrent que les systèmes planétaires évoluent vers des états de stabilité marginale : ils contiennent le nombre maximal de planètes qui reste compatible avec la stabilité à long terme.

Steven SOTER est chercheur associé au Département d'astrophysique du Muséum américain d'histoire naturelle de New York.

L'ESSENTIEL

↳ Les systèmes planétaires s'avèrent chaotiques, c'est-à-dire si sensibles aux conditions initiales qu'on ne peut prédire leur évolution à long terme.

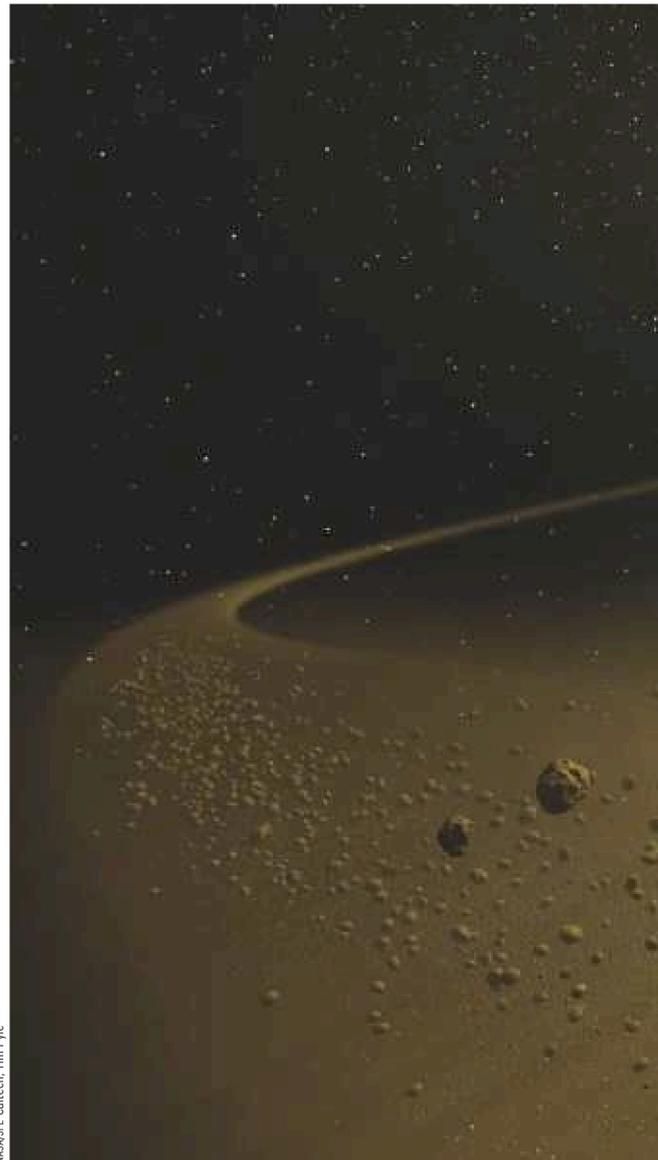
↳ Ils auraient atteint une configuration marginalement stable en éjectant des petits corps. Celle-ci est façonnée par des résonances tantôt stables et tantôt instables entre les orbites.

↳ Ils seraient aussi pleins que possible : chaque zone de stabilité interne abriterait une planète. On a ainsi prédit l'existence de plusieurs exoplanètes, détectées par la suite.

En 1609, Johannes Kepler énonçait la première des trois lois qui portent aujourd'hui son nom : les orbites des planètes sont des ellipses, dont le Soleil est l'un des foyers, et non des combinaisons de cercles comme le pensaient les astronomes depuis l'Antiquité. Près de 80 ans plus tard, Isaac Newton montrait dans ses *Principia* que la force qui fait tomber les pommes sur le sol est la même que celle qui explique le mouvement des planètes sur leur orbite elliptique autour du Soleil.

Mais Newton notait déjà que les effets cumulés de l'attraction gravitationnelle entre planètes voisines devaient augmenter l'excentricité de leur orbite – la déviation par rapport au cercle – jusqu'à ce que leurs trajectoires finissent par se croiser, ce qui entraînerait des collisions et, à la fin, la destruction du Système solaire. Il pensait que Dieu devait intervenir de temps à autre et corriger la trajectoire des planètes afin que tout continue à « tourner rond » dans les cieux.

En 1800, le mathématicien Pierre-Simon Laplace concluait que le Système solaire n'a pas besoin de cette main directrice, car il est naturellement stable : les trajectoires se corrigent d'elles-mêmes. Laplace calcula que les interactions gravitationnelles entre les planètes ne produisent que de petites oscillations de leurs excentricités autour de valeurs moyennes. Selon la légende, à Napoléon qui lui demandait pourquoi il ne mentionnait pas Dieu dans son ouvrage majeur sur la mécanique céleste, Laplace aurait ainsi répondu : « Sire, je n'ai pas eu besoin de cette hypothèse. » Laplace énonça également l'idée fondatrice du déterminisme selon laquelle, si on connaissait la position et la quantité de



NASA/JPL-Caltech, Tim Pyle

pleins à craquer ?

mouvement de tous les objets du Système solaire à un instant donné, il serait possible de calculer à partir des lois du mouvement où se trouvera chacun d'entre eux à tout instant futur.

Laplace avait raison de rejeter la nécessité d'une intervention divine pour préserver le Système solaire, mais pas pour les bons motifs. Ses calculs étaient en fait incorrects. À la fin du XIX^e siècle, Henri Poincaré montra que la prise en compte de termes négligés par Laplace dans certaines de ses équations conduisait à l'apparition du chaos

dans le Système solaire. Des calculs modernes ont finalement démontré que le Système solaire n'est que marginalement stable, et que son comportement précis est fondamentalement imprévisible à longue échéance.

Nous allons ici donner un aperçu des avancées qui ont conduit aux idées actuelles sur l'instabilité du Système solaire. Ce sujet est d'actualité, car les théoriciens disposent aujourd'hui de moyens informatiques puissants pour explorer la formation de systèmes planétaires à partir de conditions initiales

Outre les huit planètes, le Système solaire comprend des milliers de petits corps, vestiges de sa formation. Les simulations suggèrent que de légers changements dans les conditions initiales auraient pu le mener à une configuration très différente. Dans celle qu'il a atteinte, d'éventuelles planètes supplémentaires seraient instables.



diverses, tandis que les observateurs découvrent depuis quelques années des systèmes planétaires à foison autour d'autres étoiles.

Les données suggèrent que ces systèmes planétaires seraient remplis au maximum de leur capacité, mais la découverte à un rythme accru de systèmes planétaires mettra sans doute à l'épreuve nos idées sur l'équilibre fragile entre l'ordre et le chaos autour des étoiles.

En 1866, l'astronome américain Daniel Kirkwood a établi la première preuve solide de l'instabilité du Système solaire dans ses travaux sur la ceinture principale d'astéroïdes, située entre les orbites de Mars et de Jupiter. À l'époque, moins d'une centaine d'astéroïdes étaient connus (contre quelque 150 000 aujourd'hui), mais cette maigre population a suffi à Kirkwood pour remarquer plusieurs « trous » dans la distribution de leurs périodes orbitales ou, ce qui est équivalent, des tailles de leurs orbites (la période T augmente avec le demi-grand axe a de l'orbite elliptique selon la troisième loi de Kepler, stipulant que le

rapport T^2/a^3 est constant). Kirkwood découvrit ainsi qu'aucun astéroïde n'a une période voisine de 3,9 années, valeur correspondant au tiers de la période de Jupiter.

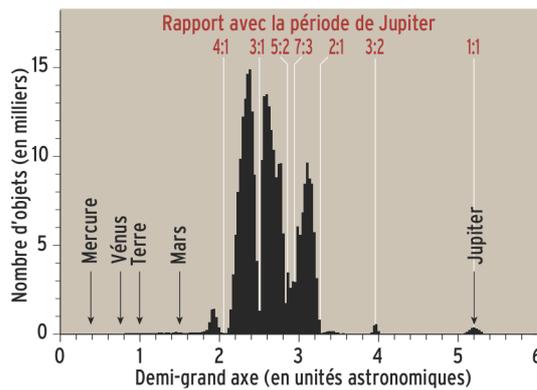
La raison en est simple. Un astéroïde qui ferait trois fois le tour du Soleil pendant que Jupiter n'en fait qu'un serait au plus près de la planète gazeuse, et donc en subirait une attraction maximale, au même point de sa propre orbite, ceci à chaque révolution de la géante. Cette influence gravitationnelle répétée aurait tendance à s'additionner d'un passage à l'autre. Les astronomes disent qu'un tel corps est en résonance de moyen mouvement 3:1. D'autres trous dans la ceinture d'astéroïdes correspondent à des orbites dont la période serait en rapport 2/5 ou 3/7 avec celle de Jupiter, on parle de résonance 5:2 ou 7:3.

Un astéroïde sur une balançoire

De telles résonances ont le même effet que lorsque vous poussez un enfant sur une balançoire. Si vous poussez au hasard, ça ne fonctionne pas très bien. En revanche, si vous poussez chaque fois que la balançoire est au plus haut dans son retour vers vous, son mouvement prend vite de l'ampleur. En poussant au même point, mais par exemple une fois tous les deux ou trois cycles, la balançoire mettra plus longtemps à s'élever très haut, la résonance étant plus faible, néanmoins, elle le fera quand même.

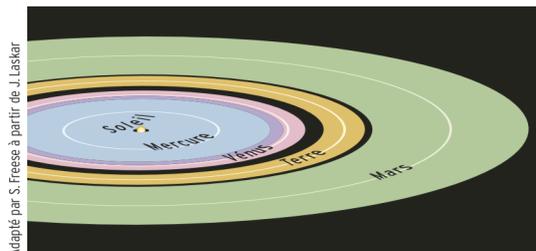
Il en est de même pour les astéroïdes : ceux qui étaient présents dans les trous de Kirkwood ont vu l'excentricité de leur orbite augmenter à chaque pic d'attraction avec Jupiter, et ce jusqu'à ce qu'ils finissent par percuter une planète ou plonger dans le Soleil, ou bien passer suffisamment près d'une planète pour être expédiés vers une région distante du Système solaire. Des astéroïdes auparavant en orbite stable dans la ceinture principale sont parfois poussés par le jeu des interactions dans une des résonances correspondant aux trous de Kirkwood, d'où ils sont éjectés. Ces lacunes sont comme des ouvertures à travers lesquelles la population d'astéroïdes s'écoule lentement. Beaucoup des météorites qui heurtent la Terre ont été éjectés de la ceinture d'astéroïdes après s'être aventurés dans ces trous de résonance.

Un phénomène semblable se produit dans le Système solaire externe. L'influence gravitationnelle des planètes géantes chasse progressivement les corps glacés de la ceinture de Kuiper, située au-delà de l'orbite de Neptune. Ce processus alimente le réservoir de comètes à courte période, des corps qui visitent brièvement le Système solaire interne à intervalles réguliers. Durant la formation du système, les rencontres rapprochées de petits objets glacés avec les planètes géantes en pleine croissance ont conduit au peuplement du

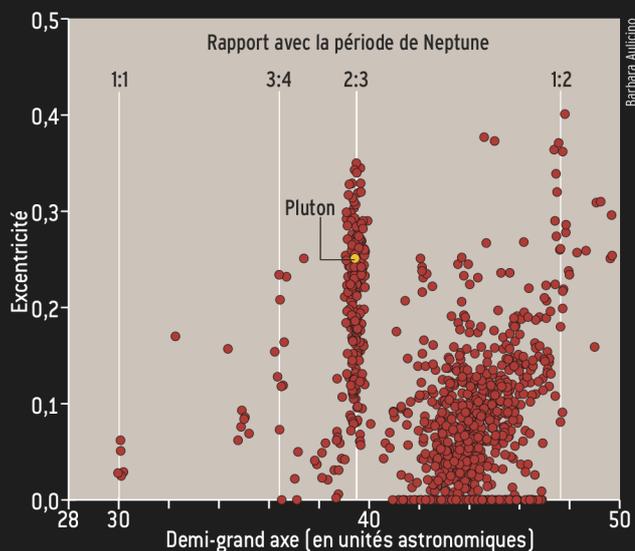


LES RÉSONANCES dictent la répartition des astéroïdes.

La ceinture principale d'astéroïdes est limitée par les résonances orbitales 4:1 et 2:1 avec Jupiter (des orbites où la période de révolution est respectivement quatre et deux fois plus courte que celle de Jupiter). Certaines résonances sont instables et engendrent des trous dans la distribution nommés lacunes de Kirkwood. Les résonances stables 3:2 et 1:1 sont occupées respectivement par la famille d'astéroïdes Hilda et par les astéroïdes troyens de Jupiter.

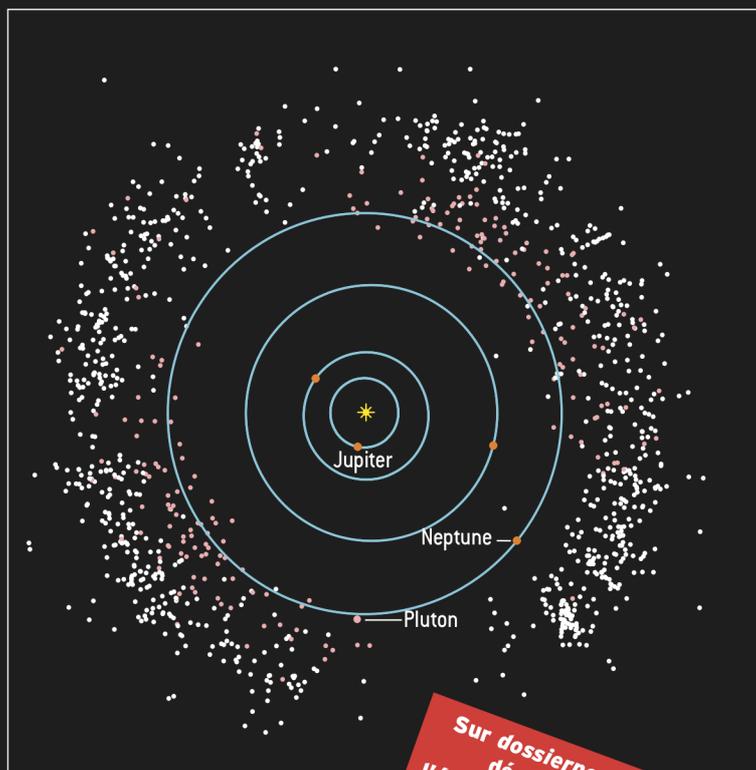


L'ORBITE DES PLANÈTES fluctue au fil du temps : sur des milliards d'années, chaque planète balaye une large bande (en couleur ci-dessus) de part et d'autre de son orbite moyenne (ligne blanche). En théorie, Mercure pourrait entrer en collision avec Vénus. De plus, selon une étude récente, la Terre n'est pas à l'abri d'une collision avec Mars ou avec Vénus.



Barbara Aulicino

LES RÉSONANCES façonnent le Système solaire externe. Elles sont apparentes sur la distribution des petits corps (ci-dessus). Les astéroïdes troyens de Neptune, situés à 30 unités astronomiques du Soleil, sont en résonance 1:1 avec la planète. Plus loin, la ceinture de Kuiper contient Pluton et les plutinos, qui partagent une résonance stable 2:3 avec Neptune, et des objets bloqués en résonances 3:4 et 1:2. La plupart des plutinos (à droite, en rose) et des autres objets de la ceinture de Kuiper (en blanc) sont situés au-delà de l'orbite de Neptune.



Minor Planet Center

Sur dossierpourlascience.fr,
découvrez en vidéo
l'évolution du Système solaire
et les collisions de planètes
probables

lointain nuage de Oort, bien au-delà de la ceinture de Kuiper, par des centaines de milliards de noyaux cométaires.

Systèmes par nature chaotiques

De telles interactions ont aussi provoqué la migration des planètes majeures. Lorsqu'elles se développaient, les planètes Saturne, Uranus et Neptune repoussaient davantage de petits corps vers l'orbite de Jupiter que vers l'extérieur du Système solaire. En vertu du principe de conservation du moment cinétique, ces planètes ont en retour migré vers l'extérieur. La planète Jupiter, beaucoup plus massive, a pour sa part éjecté la plupart des petits corps qu'elle a rencontrés vers les marges extérieures du Système solaire, et elle a par conséquent migré sur une orbite plus interne.

Lors de la formation du Système solaire, la population de la ceinture de Kuiper était des centaines de fois plus importante qu'aujourd'hui. Les objets qui y résident à l'heure actuelle ne représentent que la petite fraction qui a réussi à survivre. Il en va de même de la ceinture d'astéroïdes. La réorganisation dirigée par les planètes a sévèrement appauvri ces deux populations, ne laissant comme vestiges du disque primordial de planétésimaux que l'actuelle ceinture de Kuiper et la ceinture d'astéroïdes.

Toutes les orbites résonantes ne sont pas instables. On constate au contraire que certaines d'entre elles, impossibles à déterminer analytiquement du fait de la complexité des interactions en jeu dans ces systèmes à plusieurs corps, correspondent à des zones de stabilité. Beaucoup des objets de la ceinture de Kuiper sont ainsi en résonance stable 2:3 avec Neptune (ils accomplissent deux

orbites autour du Soleil pendant que Neptune en parcourt trois). Ces objets sont des plutinos, du nom de Pluton, le premier de ce type à avoir été découvert. L'orbite de certains d'entre eux, dont Pluton, coupe celle de Neptune, mais sans jamais s'approcher trop de la planète.

Des milliers de petits corps partagent l'orbite de Jupiter, précédant ou suivant la géante d'une soixantaine de degrés. On les nomme astéroïdes troyens, car les premiers découverts ont été nommés d'après les héros de l'*Illiade*. Ils sont piégés dans une résonance 1:1, la planète et les astéroïdes ayant la même période orbitale. Cette configuration les empêche de rencontrer Jupiter, si bien qu'elle est relativement stable. De même, des familles d'astéroïdes (également troyens) partagent l'orbite de Neptune et de Mars autour du Soleil.

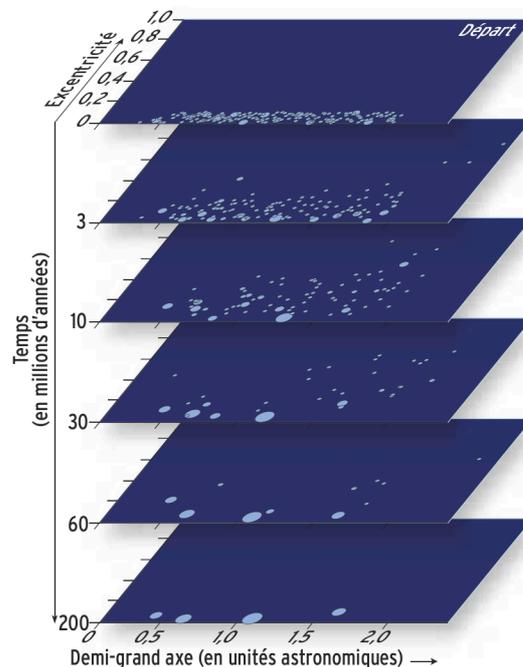
Il existe d'autres types de résonances dans le Système solaire. L'attraction mutuelle des planètes produit un décalage infime, mais continu, de l'orientation de leur orbite elliptique. Ce mouvement dit de précession du périhélie est beaucoup plus lent que la révolution des planètes sur leur orbite. Il peut aussi produire des résonances, qui sont qualifiées de séculaires. Elles peuvent perturber de façon notable les orbites des corps les plus petits. Le Système solaire regorge d'orbites potentielles sur lesquelles les objets seraient soumis à des résonances séculaires ou de moyen mouvement. De nombreuses orbites résonantes se chevauchent, et en ces points de croisement, le mouvement des petits corps est particulièrement susceptible d'être perturbé.

Malgré son apparence ordonnée, le Système solaire recèle ainsi de nombreuses caractéristiques chaotiques, au sens mathématique du terme. Une

propriété caractéristique des systèmes chaotiques est leur extrême sensibilité aux conditions initiales. La perturbation la plus anodine peut profondément modifier la configuration à grande échelle d'un tel système à moyen terme. Le billard en est un bon exemple : de minuscules variations dans la trajectoire d'une bille de billard, en particulier si elle participe à de multiples collisions, peuvent bouleverser le résultat d'un coup. Les systèmes chaotiques sont déterministes, car ils suivent les lois de la physique classique, mais ils sont fondamentalement imprévisibles.

L'exploration mathématique des systèmes chaotiques est restée limitée jusqu'à ce que la montée en puissance des ordinateurs permette aux mathématiciens de les étudier en détail. À l'époque de Laplace, personne n'imaginait que le Système solaire, alors considéré comme parangon de stabilité, est en fait vulnérable au chaos.

Jacques Laskar, du Bureau des longitudes à Paris, a mené des calculs poussés pour étudier la stabilité à long terme du Système solaire. Il a simulé les interactions gravitationnelles entre les huit planètes (Pluton ayant été déchu de son rang en 2006) sur une période de 25 milliards d'années, soit cinq fois l'âge du Système solaire.



LES SYSTÈMES PLANÉTAIRES internes se forment par accrétion des planétésimaux du disque initial, comme le montre cette simulation. Au départ (*en haut*), de nombreux planétésimaux circulent sur des orbites quasi circulaires, c'est-à-dire de faible excentricité. En quelques millions d'années, au fil des interactions gravitationnelles, les excentricités deviennent importantes pour la plupart des petits corps, tandis que des embryons planétaires (*les plus gros points bleus*) se forment. À mesure que le temps passe, les corps les plus petits sont accrétés ou éjectés. Il ne reste que quelques planètes sur des orbites faiblement excentriques.

Il a découvert que les excentricités et d'autres caractéristiques des orbites connaissent des périodes d'évolution chaotique, ce qui interdit de prévoir la position des planètes après une centaine de millions d'années. Ce résultat signifie-t-il que, par exemple, la Terre décrira un jour une orbite très elliptique, qui la rapprocherait et l'éloignerait dangereusement du Soleil, ou qu'elle pourrait être éjectée du Système solaire ?

Heureusement, non. Même le chaos opère dans certaines limites. Ainsi, bien que les météorologues ne puissent prédire le temps – un autre système chaotique – un mois à l'avance, ils peuvent être quasi sûrs que les conditions se situeront dans une fourchette donnée. Les contraintes extérieures, telles la luminosité du Soleil et la durée des jours, posent en effet des limites à l'évolution du système.

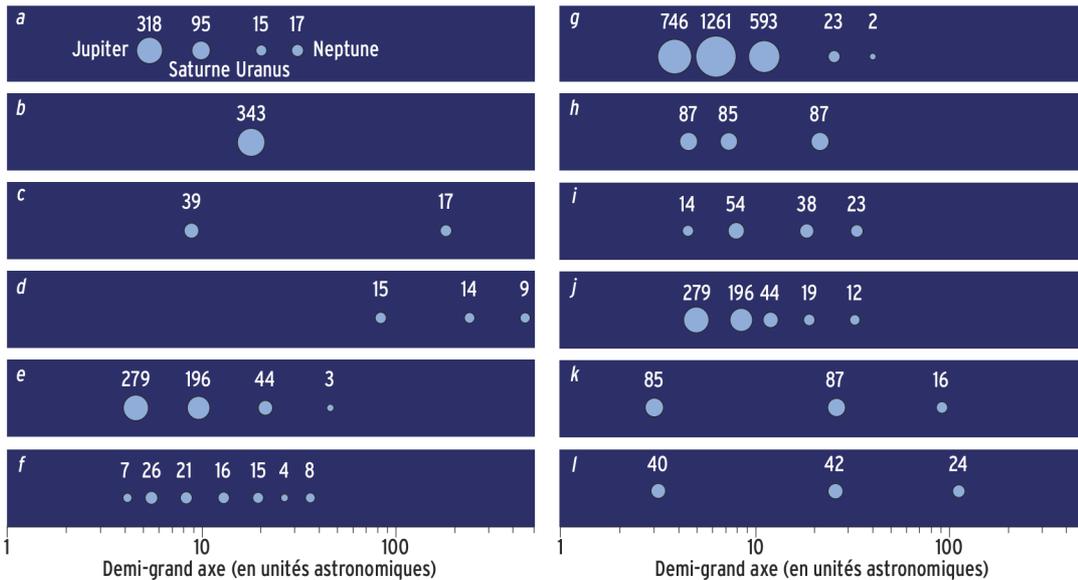
De même, J. Laskar a trouvé que malgré le caractère chaotique du ballet des planètes, leurs orbites restent relativement stables sur des milliards d'années. En d'autres termes, si la configuration à long terme est imprévisible, on sait que les orbites restent suffisamment « sages » pour qu'aucune collision entre planètes voisines ne survienne dans un futur proche. Dans ce cas, une des contraintes est imposée par la conservation du moment cinétique global du Système solaire, qui limite les dérapages de l'excentricité orbitale pour les corps de masse planétaire.

Une stabilité bien fragile

Les orbites des planètes externes géantes sont les plus stables. Celles des planètes telluriques, en particulier Mars et Mercure, les plus légères, sont plus chahutées. Les simulations montrent que sur des millions d'années, les orbites des planètes telluriques varient de façon notable, assez pour que ces planètes éliminent tous les débris de l'espace qu'elles balaient, mais pas suffisamment pour qu'elles entrent en collision. Cependant, en juin 2009, J. Laskar a déniché une exception possible : il y a une probabilité d'environ un pour cent (une valeur fondée sur de nombreuses simulations) que des planètes telluriques se heurtent ou que l'une d'elles percute le Soleil d'ici cinq milliards d'années. Le Système solaire serait donc « marginalement stable ».

Ces résultats indiquent que le Système solaire est « dynamiquement plein », ou presque. Cela signifie que si on essayait de placer une autre planète entre celles qui existent déjà, les perturbations gravitationnelles créées modifieraient le système au point de conduire à une collision ou à une éjection avant qu'il ne puisse se stabiliser.

Le Système solaire aurait toujours été proche de l'instabilité, comme il semble l'être aujourd'hui. Pour maintenir une stabilité marginale, il a dû éliminer des objets tout au long de son histoire. Il y a des milliards d'années, il contenait ainsi peut-être bien plus de planètes qu'aujourd'hui.



DANS LES SIMULATIONS, une grande diversité de systèmes planétaires externes (en a, celui du Système solaire) résulte de disques de planétésimaux initiaux légèrement différents. Les systèmes planétaires obtenus dans ces 11 simulations numériques contiennent de une (b) à sept (f) planètes externes de masses diverses (indiquées au-dessus de chacune, en masses terrestres). Les résultats dépendent du nombre initial de planétésimaux et de leur distribution, qui influent sur les interactions en jeu.

Selon cette théorie, à mesure que le Système solaire vieillissait, il s'est stabilisé et a résisté de mieux en mieux au chaos généralisé en réduisant le nombre de planètes et en les espaçant. Le nombre actuel de planètes doit être le plus grand, et leur espacement le plus réduit que la stabilité à long terme du Système solaire autorise. Le Système solaire augmente son ordre interne en communiquant son désordre – son entropie – au reste de la galaxie, par le biais d'objets éjectés.

Club privé, intrus interdits

Ce processus, dit de relaxation dynamique, est également à l'œuvre dans les amas stellaires et dans les galaxies. Comme de tels systèmes dynamiques expulsent leurs membres les plus instables, les orbites des objets restants deviennent plus compactes.

Des simulations informatiques de grande ampleur ont été réalisées pour étudier le sort de petits corps tests placés un peu partout dans le Système solaire. Elles montrent que les huit planètes perturbent fortement le mouvement de ces petits objets, qui finissent par les croiser et par être éliminés en quelques millions d'années seulement. Cependant, plusieurs régions où les objets peuvent subsister beaucoup plus longtemps sont apparues. L'une d'elles est située à peu près à mi-chemin entre les orbites de Mars et de Jupiter : c'est précisément la ceinture d'astéroïdes. Des simulations numériques de Jack Lissauer et de ses collègues du Centre de recherche Ames de la NASA et de l'Université Queen, dans l'Ontario, ont montré que si une planète de la taille de la Terre s'était formée à cet endroit, son orbite serait restée stable pendant des milliards d'années. Ce résultat n'étonne pas outre mesure, car la ceinture d'astéroïdes est densément peuplée et doit donc être relativement à l'abri des perturbations. En revanche, la même étude a montré qu'une planète géante

située dans la ceinture d'astéroïdes deviendrait rapidement instable.

La ceinture de Kuiper est une autre région de stabilité, car il n'y a pas de planète susceptible de chambouler le paysage au-delà de l'orbite de Neptune. Les astéroïdes troyens de Mars, Jupiter et Neptune occupent d'autres niches interplanétaires protégées.

En dehors de ces îlots de stabilité, l'espace interplanétaire est peu accueillant. La plupart des petits corps en orbite entre les planètes, tels les astéroïdes géocroiseurs et les comètes à courte période, sont des intrus de passage qui se sont égarés depuis peu dans le voisinage des planètes à partir de la ceinture d'astéroïdes ou de celle de Kuiper. Les planètes auront tôt fait de les éjecter ou de les anéantir par des collisions. De fait, selon la nouvelle définition adoptée en 2006 par l'Union astronomique internationale, une planète est un corps céleste qui a « fait le ménage » dans son voisinage orbital en le vidant de tous les petits objets qui pouvaient s'y trouver. Sans l'existence de quelques niches, dont les fuites alimentent régulièrement leurs parages, les planètes auraient complètement vidé l'espace interplanétaire.

Ces idées s'intègrent naturellement dans la théorie de la formation du Système solaire en vigueur actuellement, la théorie de l'accrétion, dont les prémices ont été proposées par le philosophe Emmanuel Kant en 1755. Selon cette théorie, les systèmes planétaires, dont le nôtre, se forment par l'accumulation et la condensation de poussière et de gaz dans des disques de débris en orbite autour d'étoiles nouvellement nées (voir *La naissance des planètes : tohu-bohu dans les nuages*, par Douglas Lin, page 98).

Dans une première phase, les poussières contenues dans un tel disque circumstellaire s'agrègent par collisions successives jusqu'à former des milliards d'astéroïdes rocheux et de comètes glacées de quelques kilomètres de diamètre, nommés planétésimaux.

Dans un deuxième temps, ces objets entrent à leur tour en collision et grossissent pour former des dizaines, voire des centaines, de corps dont la taille va de celle de la Lune à celle de Mars; ce sont des embryons de planètes. Ils gravitent dans l'essaim de planétésimaux restants. Certains embryons situés dans la partie externe du disque grossissent assez pour capturer le gaz de la nébuleuse, donnant ainsi naissance aux planètes géantes.

Quand les embryons ont amassé la majeure partie de la masse du disque, leur attraction réciproque peut alors augmenter leur excentricité orbitale. Dès lors, tout s'emballe. Dans cette étape finale de la formation des planètes, les orbites des embryons planétaires commencent à se croiser, et le système entier plonge dans l'anarchie. Des planètes naissantes se percutent et fusionnent, tandis que d'autres sont expulsées dans l'espace interstellaire.

Les traces d'un intense bombardement sont visibles sur les astres formés dans la jeunesse du Système solaire: leur surface est grêlée d'anciens cratères. Beaucoup sont encore aujourd'hui couverts d'énormes cicatrices d'impacts. Certains astéroïdes et lunes semblent avoir été entièrement disloqués et s'être réassemblés à partir de leurs fragments. La Lune elle-même est, selon toute vraisemblance, née de la collision d'un embryon planétaire de la taille de Mars avec la proto-Terre.

Décaler d'un mètre l'orbite d'un seul embryon parmi 100 au départ conduit à un système final de cinq planètes telluriques plutôt que de trois.

Pendant que les planètes en croissance avalaient les planétésimaux peuplant le disque de débris, elles en éjectaient également d'innombrables autres à distance. Beaucoup de ces objets se sont échappés dans l'espace interstellaire. D'autres, éjectés avec une vitesse plus faible, ont atteint les confins du Système solaire, où l'influence gravitationnelle des étoiles voisines et de la galaxie elle-même a pu les stabiliser sur des orbites elliptiques. Des centaines de milliards de ces objets glacés peuplent aujourd'hui le lointain nuage de Oort, faiblement liés par la gravité au Système solaire.

Les théoriciens peuvent aujourd'hui simuler les étapes finales de la formation des planètes grâce à des modèles informatiques. Ils suivent l'évolution de ces systèmes à partir d'un large éventail de conditions initiales qui représentent différents disques de débris (*voir la figure page 117*).

Certaines des simulations aboutissent à la création de planètes dont les orbites et les masses sont semblables à celles des corps du Système

solaire. D'autres produisent des systèmes comportant des planètes géantes sur des orbites plus excentriques. Dans ces simulations, les collisions et les éjections réduisent le nombre de planètes en croissance et augmentent leur espacement moyen. Les planètes se font concurrence et jouent des coudes pour occuper l'espace.

Ces expériences numériques confirment que la formation planétaire est très sensible aux conditions initiales. Décaler d'un mètre seulement, l'orbite d'un seul embryon parmi 100 au départ suffit par exemple à conduire à un système final constitué de cinq planètes telluriques plutôt que de trois. C'est sans doute sur une collision mineure et fortuite que s'est jouée l'existence même de la Terre!

Des systèmes créés *in silico*

Les astronomes ont maintenant l'occasion de vérifier si ces simulations reflètent bien la réalité. Depuis plus d'une décennie, on découvre chaque mois de nouveaux systèmes planétaires. Les chasseurs de planètes ont déjà détecté près de 350 objets en orbite autour d'autres étoiles, parfois regroupés dans l'un des 37 systèmes planétaires multiples aujourd'hui connus.

De façon surprenante, la plupart des planètes extrasolaires ont des orbites beaucoup plus excentriques que celles des planètes du Système solaire. Avant leur découverte, on imaginait que les autres systèmes planétaires ressembleraient au nôtre, avec des orbites quasi circulaires. Certains ont alors émis l'hypothèse que notre Système solaire est exceptionnel et que la plupart des autres systèmes planétaires se sont formés de façon différente. Cela paraît aujourd'hui peu plausible.

Mario Jurio et Scott Tremaine, de l'Université de Princeton, ont récemment réalisé des milliers de simulations de l'évolution d'une dizaine de planètes géantes ou plus dans un disque sous l'effet des collisions, des fusions et des éjections. Lorsque les planètes sont initialement assez proches les unes des autres, la distribution des excentricités orbitales de celles qui survivent jusqu'à la fin est en remarquable accord avec celle des systèmes planétaires observés.

En revanche, les simulations où les planètes sont au départ plus espacées conduisent à des interactions moins nombreuses, et les planètes survivantes présentent des excentricités orbitales plus faibles, comme c'est le cas dans le Système solaire. Dans la plupart des simulations, il ne reste à la fin que deux ou trois planètes géantes après éjection d'au moins la moitié de la population initiale. Les planètes flottant librement dans l'espace, sans attaches stellaires, devraient donc être monnaie courante dans la galaxie.

D'autres études confirment que beaucoup des objets peuplant à l'origine un disque protopla-

nétaire, si ce n'est la plupart, sont projetés dans l'espace interstellaire. Les plus gros parmi les corps survivants continuent à grandir en accrétant des objets plus petits restés liés à l'étoile centrale. La formation des planètes est donc un processus qui produit beaucoup de déchets.

Si la plupart des planètes extrasolaires connues sont plus massives, de périodes plus courtes (de quelques jours à quelques années tout au plus) et gravitent sur des orbites plus excentriques que les planètes du Système solaire, cela ne signifie pas pour autant que ce dernier est atypique. Les techniques d'observation actuelles favorisent en effet par nature la découverte de telles planètes; même les planètes géantes du Système solaire, avec des périodes orbitales allant d'environ 12 à 165 ans, seraient à la limite de nos capacités de détection si elles se situaient autour d'une autre étoile.

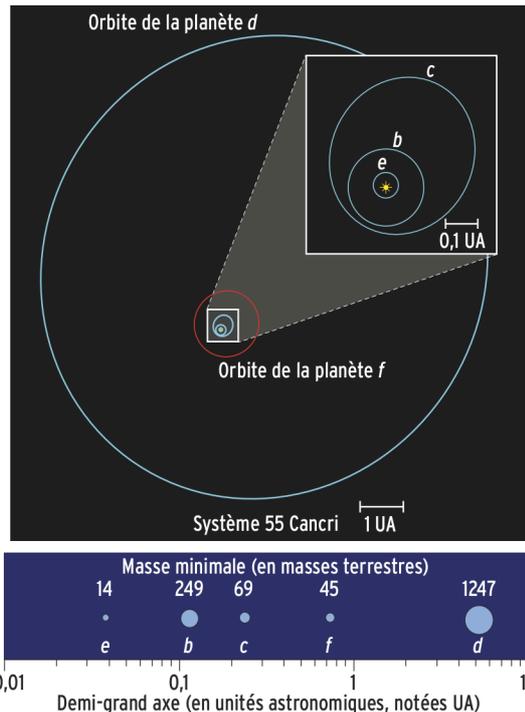
Il y a quelques années, Rory Barnes et Thomas Quinn, à l'Université de Washington, ont examiné à l'aide de simulations la stabilité de systèmes dotés de deux planètes ou plus. Ils ont découvert que presque tous les systèmes ayant des planètes assez proches pour s'influencer mutuellement se trouvaient au bord de l'instabilité. De petites perturbations de l'orbite des planètes de ces systèmes conduisent à des changements catastrophiques.

Ce résultat peut surprendre, mais la prévalence de ces systèmes se comprend si les planètes se forment au sein de systèmes instables qui gagnent en stabilité en éjectant des corps massifs. Selon R. Barnes et T. Quinn, une grande proportion des systèmes planétaires, y compris le nôtre, seraient dangereusement proches de l'instabilité.

Là où il peut y avoir des planètes, il y en a

R. Barnes, désormais à l'Université de l'Arizona, et Sean Raymond, de l'Université du Colorado, ont alors supposé que tous les systèmes planétaires sont aussi remplis que possible. Dans certains des systèmes extrasolaires observés, les deux astronomes ont identifié des régions de stabilité apparemment vides. Selon eux, ces régions renferment des planètes assez petites pour avoir échappé à la détection.

Ils ont par exemple prédit l'existence d'une cinquième planète autour de l'étoile 55 Cancri, distante de 41 années-lumière (voir la figure ci-dessus). Quatre planètes géantes étaient connues. Trois sont plus proches de l'étoile que Mercure ne l'est du Soleil, tandis que la quatrième, sur une orbite équivalente à celle de Jupiter, a une période de près de 15 ans. R. Barnes et S. Raymond ont prédit en 2005 que l'on finirait par détecter une ou plusieurs nouvelles planètes entre les trois corps intérieurs et la planète extérieure. Cette région contient la « zone habitable », où la température de la planète permettrait l'existence d'eau liquide.



Les observations viennent de leur donner raison. Debra Fischer et Geoff Marcy, de l'Université de Californie à San Francisco et à Berkeley respectivement, ont découvert en 2007 une cinquième planète dans la zone de stabilité de 55 Cancri. Il s'agit d'une planète de 45 masses terrestres qui gravite sur une orbite légèrement plus grande que celle de Vénus. Avec cette cinquième planète, 55 Cancri devient le système extrasolaire le plus peuplé connu. Cette cinquième planète serait assez petite et la région de stabilité assez grande pour qu'une planète supplémentaire y réside. L'intérêt suscité par ce système est tel, notamment pour ceux qui traquent une vie extraterrestre, qu'un signal radio a été transmis vers 55 Cancri en 2003: il arrivera en 2044!

De la même façon, R. Barnes et T. Quinn avaient prédit l'existence d'une troisième planète dans le système HD74156. Elle vient d'être découverte, début 2008, par l'équipe de Barbara Mc Arthur, de l'Observatoire Mc Donald, au Texas, qui n'avait pas connaissance de la prédiction.

Ces observations étayaient l'idée que le Système solaire et les autres systèmes planétaires arrivés à maturité sont pleins. Ils contiennent autant de planètes qu'ils peuvent en contenir, aussi rapprochées qu'il est possible pour que la stabilité soit préservée. Cette stabilité marginale résulte du processus chaotique de formation des planètes.

Pour valider cette hypothèse, les astronomes devront chercher de nouvelles planètes dans les régions stables des systèmes déjà connus. Cela prendra du temps, car les petites planètes sont difficiles à détecter, mais nous finirons bien par savoir si les systèmes planétaires « affichent complet ».

LA DÉCOUVERTE D'EXOPLANÈTES prédites par la théorie conforte l'idée que les systèmes planétaires sont pleins. Par exemple, dans le système 55 Cancri, on connaissait trois planètes (e, b, c) gravitant sur des orbites plus petites que celles de Mercure, et une quatrième (d), très massive, située à une distance équivalente à celle de Jupiter. Les astronomes ont montré que la région intermédiaire, qui englobe la zone d'habitabilité, est une zone de stabilité dynamique. Ils ont donc conjecturé qu'une planète devait l'occuper; elle vient d'être découverte (f, en rouge).

articles

- J. LASKAR et M. GASTINEAU, *Existence of collisional trajectories of Mercury, Mars and Venus with the Earth*, in *Nature*, vol. 459, pp. 817-819, 2009.
- S. SOTER, *What is a planet ?*, in *Astronomical Journal*, vol. 132, pp. 2513-2519, 2006.
- D.P. O'BRIEN, A. MORBIDELLI et H.F. LEVISON, *Terrestrial planet formation with strong dynamical friction*, in *Icarus*, vol. 184, pp. 39-58, 2006.
- S.N. RAYMOND, T. QUINN et J. LUNINE, *High-resolution simulations of the final assembly of Earth-like planet. I. Terrestrial accretion and dynamics*, in *Icarus*, vol. 183, pp. 265-282, 2006.