

molécules d'adhésion ont été testés chez le singe. Les résultats ayant été intéressants, ces molécules vont être expérimentées chez l'homme.

Chez l'homme, des essais cliniques sont en cours avec des molécules anti-interleukine 5. Les résultats obtenus avec ces anticorps semblent prometteurs chez les personnes atteintes d'asthme chronique. Au cours des prochaines années, des antagonistes de l'éotaxine et de son récepteur CCR₃ devraient être testés.

Museler les agents de l'asthme

Certaines techniques de désensibilisation, déjà utilisées chez l'homme, modifieraient le profil de production des cytokines par les lymphocytes T auxiliaires : elles «réduqueraient» le système immunitaire, abolissant les réactions allergiques chez ces personnes, comme l'ont montré Jean Bousquet, Philippe Godard et François-Bernard Michel, de l'Université de Montpellier. La désensibilisation, ou immunothérapie spécifique, doit être effectuée par des équipes entraînées et équipées d'un matériel de réanimation. La désensibilisation n'est pas recommandée chez les personnes ayant un asthme grave, car elle risque de déclencher des crises aiguës.

Certaines équipes espèrent réorienter les réactions immunitaires de personnes sensibles en limitant la «voie allergique» Th₂ de la réponse immunitaire. L'interleukine 12, l'interféron gamma ou des antagonistes sélectifs de l'interleukine 4, principale cytokine d'entretien de la polarisation de la voie allergique, auraient cet effet. Enfin, des «vaccins peptidiques», petits fragments d'allergènes, sont en cours d'évaluation. Contrairement aux allergènes entiers, ces petites molécules n'activent pas les mastocytes, mais elles seraient présentées aux lymphocytes T auxiliaires qui seraient réorientés vers la voie Th₁.

On cherche à agir sur les cytokines, mais aussi sur les autres molécules de l'allergie, notamment les leucotriènes et les immunoglobulines E. Des anticorps anti-immunoglobulines E ont été testés avec succès dans divers modèles animaux et dans l'asthme allergique humain. Avec l'équipe de J. Bousquet, nous menons des essais cliniques sur ces anticorps, administrés par voie sous cutanée : ils rédui-

Quand l'asthme n'est pas allergique

Entre 10 et 40 pour cent des asthmes ne semblent pas d'origine allergique. Comme dans l'asthme allergique, les personnes atteintes semblent être génétiquement prédisposées.

Les malades sont souvent des femmes et sont plus âgés, lorsque la maladie se déclare, que les personnes atteintes d'asthme allergique. Les malades sont moins sensibles aux glucocorticoïdes administrés comme traitement de fond. Les tests cutanés réalisés avec les allergènes usuels sont négatifs et les concentrations sanguines en immunoglobulines e sont basses.

Pourtant, on retrouve les signes biologiques et cliniques de l'asthme allergique : les polynucléaires éosinophiles associés à l'inflammation allergique sont abondants

dans les bronches de ces malades. Un puissant réseau de cytokines recrute et active ces éosinophiles, qui libèrent des protéines basiques responsables de lésions de l'épithélium bronchique et de l'hypersensibilité des bronches.

Pour certains, la maladie aurait une origine virale, car on a retrouvé des immunoglobulines E dirigées contre des virus respiratoires communs, tel le virus respiratoire syncytial, responsable des bronchiolites du nourrisson. D'autres biologistes pensent que l'asthme non allergique serait une maladie auto-immune.

Les nouveaux traitements envisagés pour l'asthme allergique seraient applicables à l'asthme non allergique : ciclosporine, anticorps anti-CD4, anticorps anti-IL5, agents bloquant le récepteur CCR3, par exemple.

sent notablement les concentrations sanguines d'immunoglobulines E ; chez l'homme, les symptômes de l'asthme sont réduits.

On a testé l'intérêt des traitements antiallergiques dirigés contre l'histamine, contre les leucotriènes, ou encore contre les prostaglandines, qui toutes participent au spasme bronchique. La plupart de ces traitements sont moins efficaces que les glucocorticoïdes. Seuls les antileucotriènes, et les cromones, qui empêchent les granules des mastocytes de libérer l'histamine qu'ils contiennent, sont utilisés dans le traitement de l'asthme léger à modéré.

Ainsi, les glucocorticoïdes restent le meilleur traitement de fond de l'asthme. Les nouveaux traitements, issus des connaissances des mécanismes cellulaires et moléculaires de l'asthme sont certes plus spécifiques, mais, étant donné le nombre de cytokines et de molécules de l'inflammation qui agissent en synergie dans la

maladie asthmatique, on ne soulagera vraisemblablement pas l'asthme par un seul antagoniste sélectif.

Parmi toutes les voies qui sont aujourd'hui explorées, citons pour terminer celle de la sensibilité génétique à la maladie. L'asthme est une maladie multifactorielle favorisée par certains terrains génétiques. On a confirmé le caractère génétique de l'asthme en étudiant des familles, notamment des jumeaux. Plusieurs gènes de susceptibilité à la maladie asthmatique ont été localisés, notamment sur le bras long du chromosome 5, dans une région qui contient aussi... de nombreux gènes codant des médiateurs puissants de l'allergie, les interleukines 4, 5 et 13!

Enfin, insistons sur le fait que l'asthme de l'enfant (comme celui de l'adulte) est notablement soulagé par de simples mesures d'hygiène, c'est-à-dire par l'éviction de l'allergène et par la lutte contre le tabagisme passif.

Marc HUMBERT est professeur de pneumologie à l'Université Paris-Sud. Il mène ses recherches dans le cadre de l'Institut Paris-Sud sur les cytokines et exerce à l'Hôpital Antoine-Béclère, à Clamart.

Manual of Asthma Management, sous la direction de Paul O'Byrne et Neil Thomson, WB Saunders, 1995.

Vaincre l'asthme. Stratégie globale pour la guidance de l'asthme et sa prévention. Rapport du groupe de travail NHLBI/OMS, in *Rev. Fr. Allergol. Immunol. Clin.*, vol. 36, pp. 545-740, 1996.

A.D. LUSTER, *Chemokines – Chemotactic Cytokines that Mediate Inflammation*, in *New Engl. J. Med.*, vol. 338, pp. 436-45, 1998.

M. ROTHENBERG, *Eosinophilia*, in *New Engl. J. Med.*, vol. 338, pp. 1592-600, 1998.

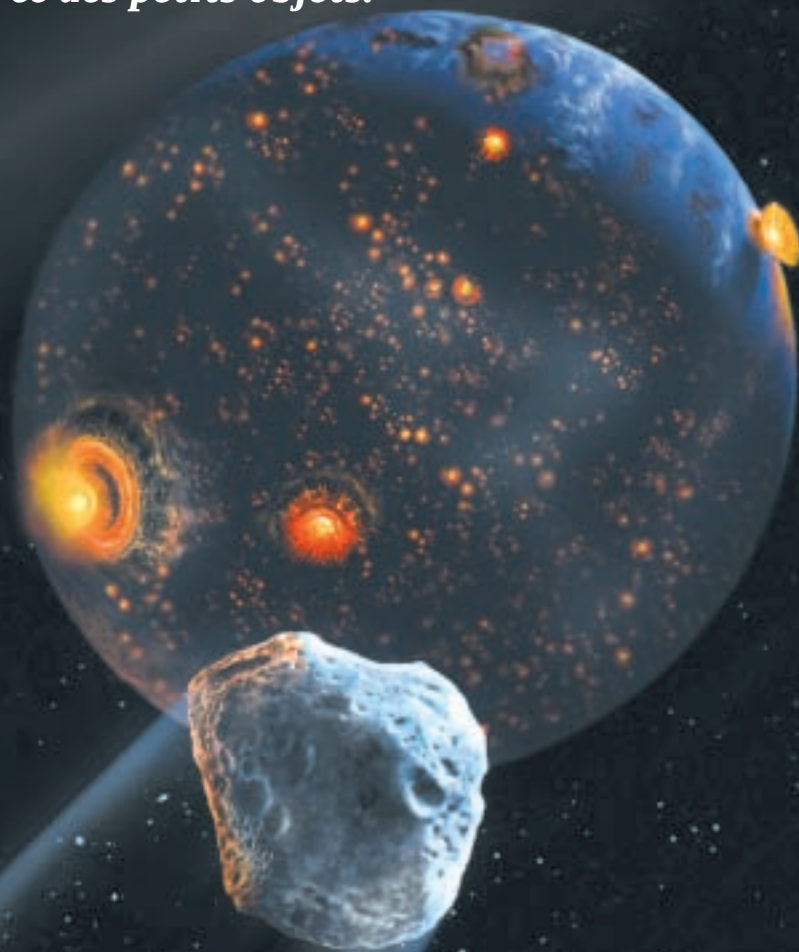
J. BOUSQUET et al., *Comprendre la maladie asthmatique*, in *Médecine/Sciences*, vol. 15, pp. 823-32, 1999.

M. HUMBERT et al., *Extrinsic (Atopic) and Intrinsic (Non-Atopic) Asthma: more Similarities than Differences*, in *Immunol. Today*, sous presse, novembre 1999.

La migration des planètes

RENU MALHOTRA

Le Système solaire a-t-il toujours eu sa conformation actuelle? De nouvelles observations laissent penser que la position des planètes externes a changé en raison d'interactions avec des petits objets.



1. À PEINE FORMÉE, NEPTUNE aurait voyagé dans un essaim de petits corps célestes de roches et de glaces nommés planétésimaux. Certains d'entre eux ont heurté la planète, mais la plupart ont été diffusés par la gravité de Neptune vers Jupiter, qui les a alors expulsés hors du Système solaire (page ci-contre). Lors de chaque diffusion, l'énergie de Neptune a augmenté, et le rayon de son orbite a légèrement crû. Des milliards de rencontres de ce type auraient progressivement amené Neptune vers son orbite actuelle.

Dans la représentation classique du Système solaire, chaque planète se déplace autour du Soleil sur une orbite bien définie, à une distance respectueuse de ses voisines. Ce manège céleste est immuable depuis que des astronomes enregistrent les mouvements planétaires, et les modèles mathématiques montrent que cette configuration orbitale stable est restée inchangée pendant la majeure partie des quatre milliards et demi d'années du Système solaire. On est tenté de supposer que les planètes sont nées sur leurs orbites actuelles.

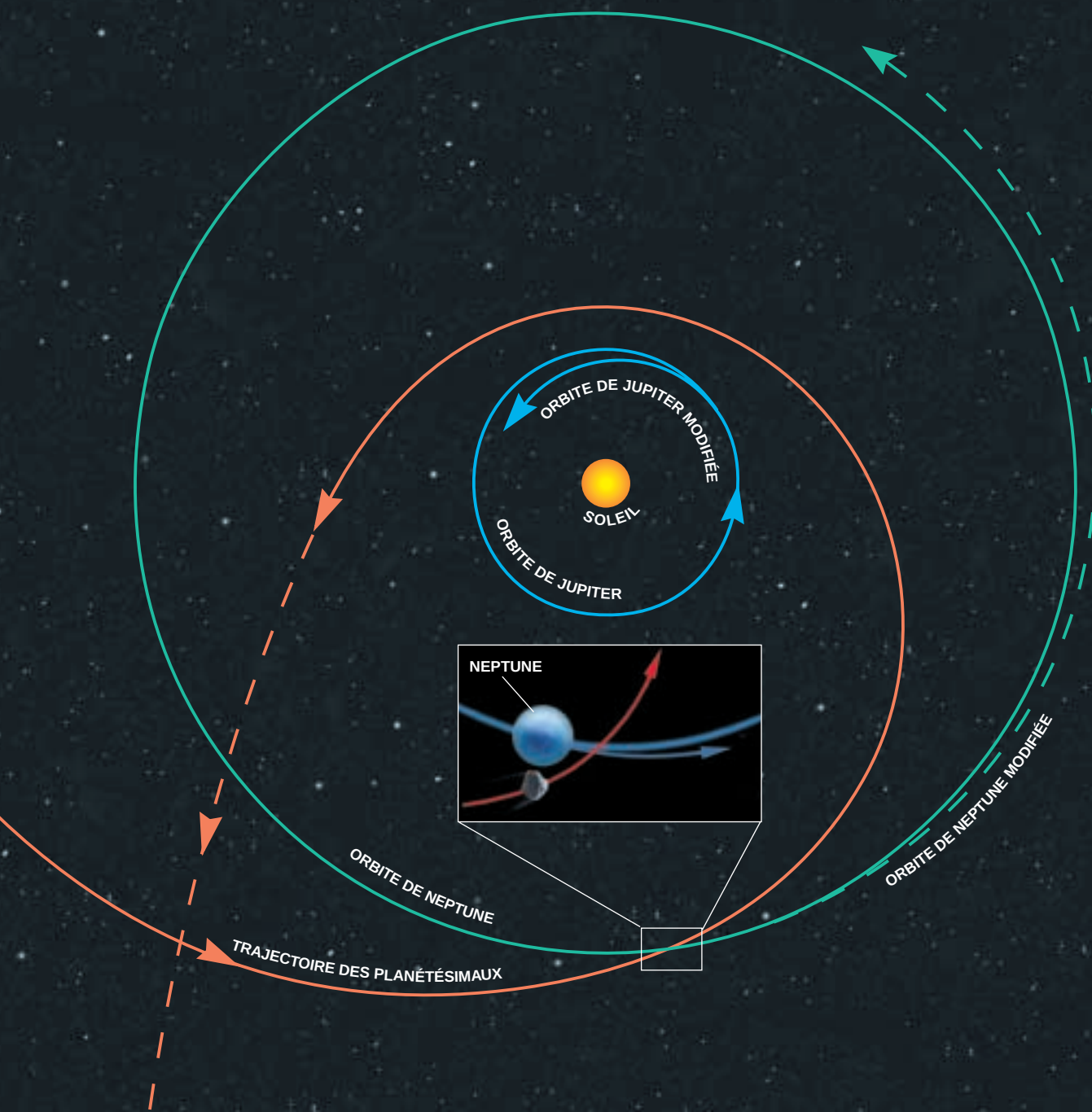
Plus précisément, les astronomes des dernières décennies ont souvent admis que la position des orbites planétaires correspondait à leur lieu de naissance dans la nébuleuse solaire,

le disque de gaz et de poussières à partir duquel s'est formé le Système solaire. Partant de cette hypothèse, on a utilisé les rayons orbitaux des planètes pour estimer la répartition de masse à l'intérieur de la nébuleuse solaire, pour étudier la formation du Système solaire et pour estimer les durées de formation des planètes.

Toutefois, les astronomes admettent aussi que de nombreux corps mineurs du Système solaire, tels les astéroïdes, les comètes ou les satellites des planètes, ont changé d'orbite au cours des derniers quatre milliards et demi d'années. Parfois, ces changements sont considérables : la chute de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter, en 1994, montra que le Système solaire n'est pas figé. D'autres

événements passent inaperçus : des objets plus petits, telles les poussières ou du millimètre, échappées des comètes et des astéroïdes, ont une trajectoire qui les font tomber en spirale sur le Soleil, arrosant d'une pluie de micrométéorites les planètes qui sont sur leur passage.

Dans le passé, l'orbite de nombreux satellites a considérablement varié. Par exemple, on pense que la Lune, qui gravite aujourd'hui à 384 000 kilomètres de la Terre, s'est formée à moins de 30 000 kilomètres. Au cours du dernier milliard d'années, la Lune s'est éloignée de près de 100 000 kilomètres, en raison de la dissipation des forces de marées exercées par le satellite sur notre planète (sous



l'effet des frottements dus aux marées, la Terre ralentit sa rotation, ce qui, en raison de la conservation de l'énergie, provoque l'éloignement de la Lune). De nombreux satellites des planètes extérieures ont également des mouvements synchronisés qui résultent des forces de marées : la période orbitale de Ganymède, le plus gros des satellites de Jupiter, est égale à deux fois celle d'Europe, qui, elle-même, est deux fois supérieure à celle de Io. Cette synchronisation découle vraisemblablement d'une évolution progressive des orbites de ces satellites, due aux forces de marées.

Et les planètes elles-mêmes ? Récemment encore, peu d'éléments laissaient croire que leur configuration orbitale avait changé depuis leur formation, mais les observations effectuées depuis cinq ans montrent que nous devons réviser nos théories. Tout d'abord, la découverte de la ceinture de Kuiper a montré que notre Système solaire s'étend bien au-delà de Pluton : environ 100 000 «planètes mineures» composées de glace (avec des diamètres compris entre 100 et 1 000 kilomètres) et un nombre encore supérieur de petits corps célestes occupent une région qui s'étend de l'orbite de Neptune (à environ 4,5 milliards de kilomètres du Soleil) jusqu'à au moins deux fois cette distance du Soleil. Ces objets sont répartis avec des caractéristiques que n'expliquent pas les théories actuelles. Les modèles théoriques qui décrivent cette répartition indiquent que la ceinture de Kuiper renferme des traces de l'histoire des planètes gazeuses géantes et, plus spécifiquement, des preuves d'un étalement progressif des orbites de ces planètes après leur formation.

De surcroît, la découverte de plusieurs planètes de la taille de Jupiter, en orbite très proche autour d'étoiles de type solaire, a fait penser que les planètes ne sont pas sur des orbites fixes. On comprend mal comment ces planètes se sont formées si près de leur étoile mère : se seraient-elles formées à des distances supérieures avant de migrer jusqu'à leurs positions actuelles ?

Pluton : exclu ou témoin ?

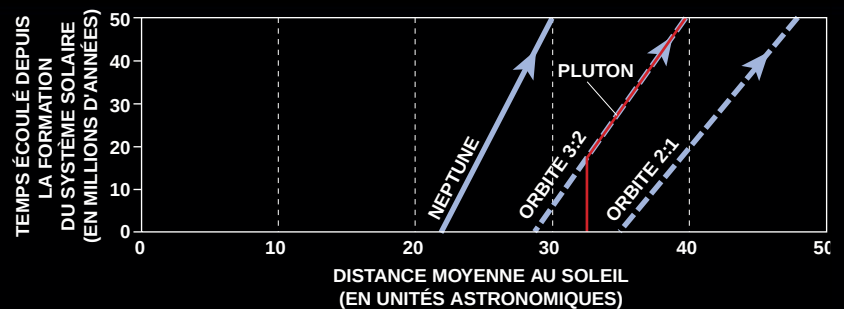
Jusqu'à ces dernières années, les seuls objets planétaires connus au-delà de Neptune étaient Pluton et son satellite, Charon. D'ailleurs, pour les théories dominantes de l'origine du Système

solaire, Pluton est une incohérence : cet objet, plusieurs milliers de fois moins massif que les quatre planètes gazeuses géantes, a une orbite très allongée et penchée sur l'écliptique (le plan de l'orbite terrestre), alors que les huit autres planètes principales ont des orbites presque circulaires et coplanaires.

Pluton a une orbite très excentrique : au cours d'une révolution, sa distance au Soleil varie entre 30 et 50 unités astronomiques (l'unité astronomique est la distance moyenne de la Terre au Soleil, soit 150 millions de kilomètres). Elle est au maximum à 8 unités astronomiques au-dessus de

l'écliptique et à 13 unités astronomiques en dessous. Pendant approximativement 20 des 248 années que compte sa période orbitale, Pluton est plus proche du Soleil que Neptune.

Dans les décennies qui ont suivi la découverte de Pluton, en 1930, des observations ont rendu cette planète plus mystérieuse encore : les astronomes ont découvert que la plupart des orbites qui croisent celle de Neptune sont instables. Un objet sur une telle orbite entre en collision avec Neptune ou est éjecté du Système solaire en un temps relativement court (moins de un pour cent de l'âge du Système solaire).



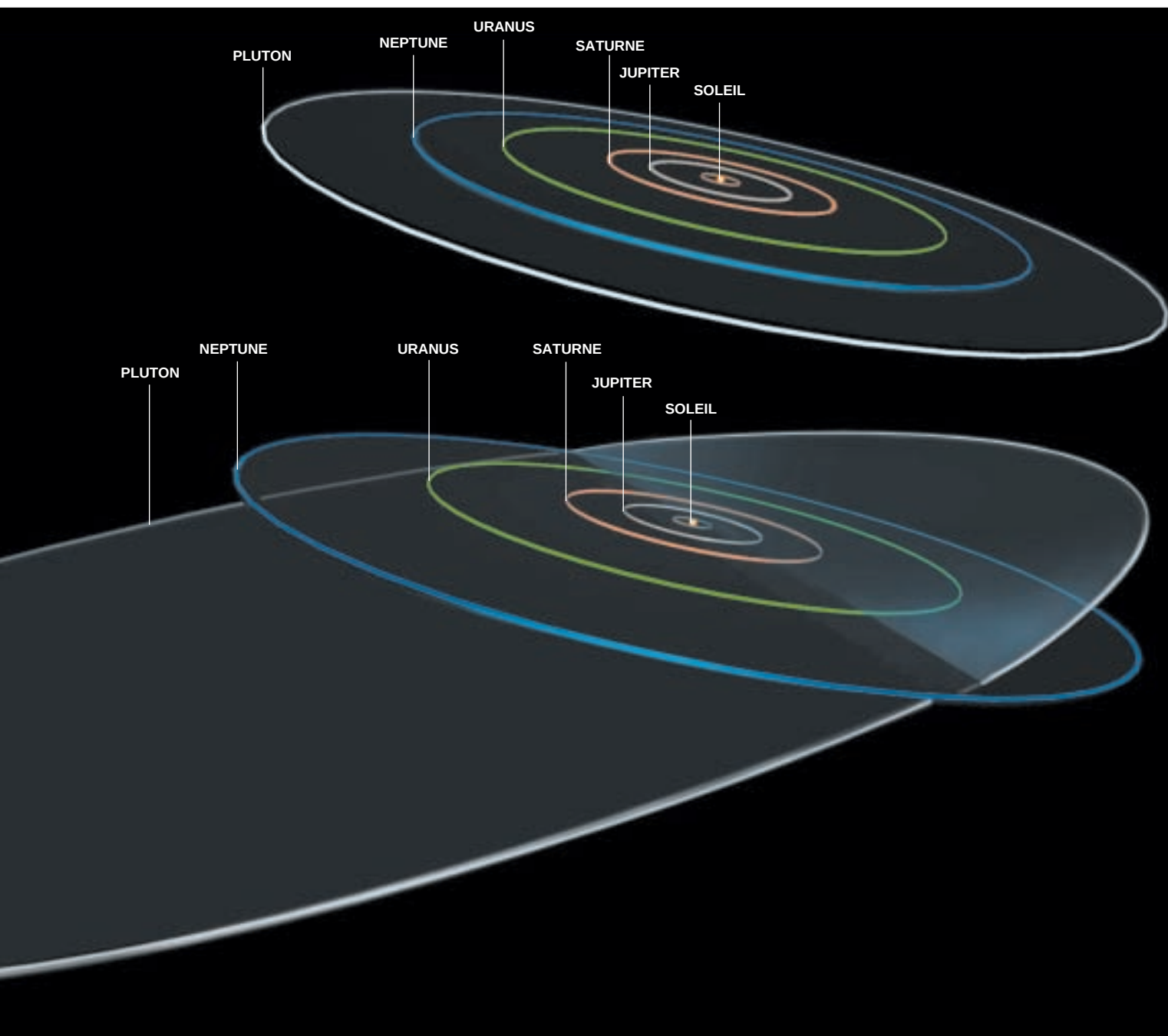
2. LA MIGRATION PLANÉTAIRE est illustrée par ces deux représentations du Système solaire, la première au moment de la formation des planètes (*en haut, à droite*), la seconde aujourd'hui (*en bas à droite*). On pense que l'orbite de Jupiter a légèrement rétréci, tandis que les orbites de Saturne, d'Uranus et de Neptune se sont agrandies (ces migrations n'ont pas eu de conséquences importantes sur la région planétaire centrale). Selon la théorie des migrations, Pluton était initialement sur une orbite circulaire. Lors de sa migration vers l'extérieur, Neptune a entraîné Pluton sur une orbite dont la période est exactement égale une fois et demie à celle de Neptune (*ci-dessus*). La gravité de Neptune a ainsi amené Pluton sur une orbite plus allongée, inclinée par rapport au plan orbital des autres planètes.

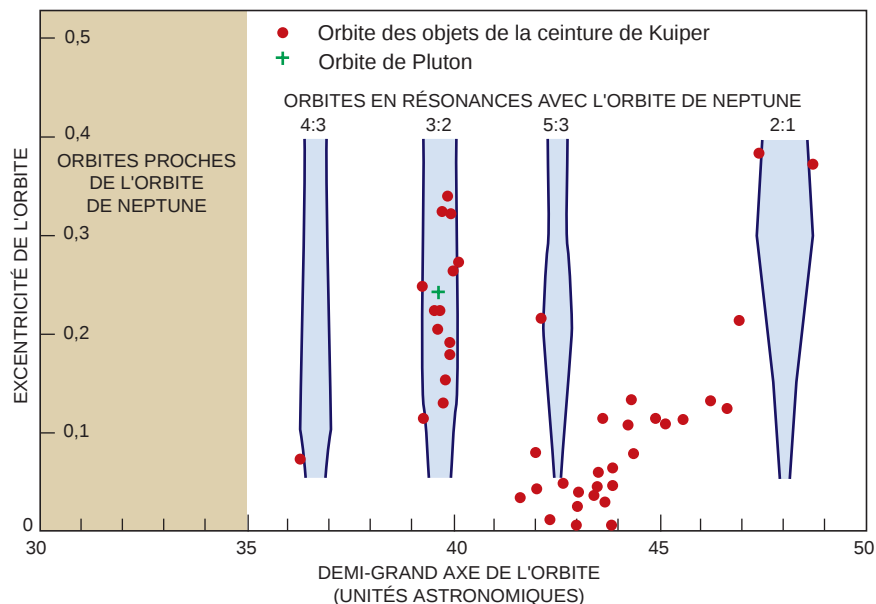
Or, l'orbite de Pluton, bien qu'elle croise celle de Neptune, est protégée d'un trop grand rapprochement avec la géante gazeuse par un mécanisme de résonance : Pluton effectue deux révolutions autour du Soleil quand Neptune en fait trois ; on dit que l'orbite de Pluton est en résonance 3:2 avec l'orbite de Neptune. En raison de ce mouvement relatif, lorsque Pluton traverse l'orbite de Neptune, cette dernière est très loin. De fait, la distance entre Pluton et Neptune n'est jamais inférieure à 17 unités astronomiques.

De plus, le périhélie de Pluton (le point de son orbite le plus proche

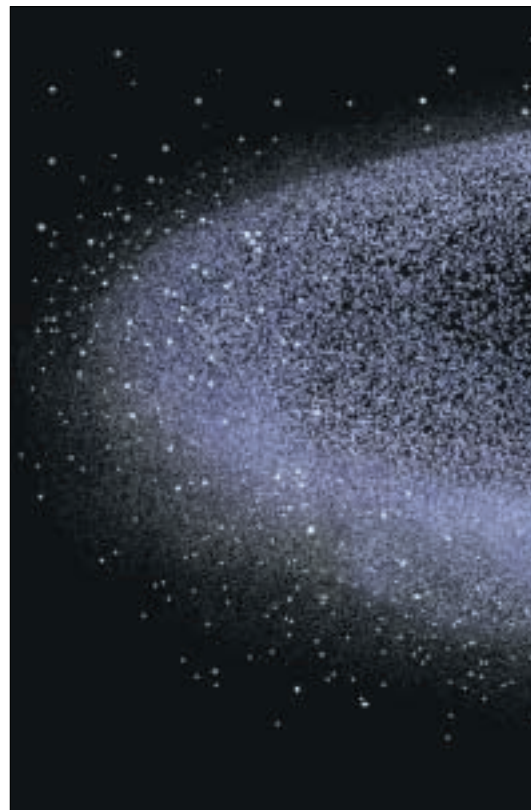
du Soleil) est toujours très au-dessus du plan de l'orbite de Neptune, ce qui garantit la stabilité orbitale à long terme de Pluton. Des simulations des mouvements orbitaux des planètes externes, tenant compte des effets de leurs perturbations mutuelles, indiquent que cette relation entre les orbites de Pluton et de Neptune existe depuis plusieurs milliards d'années et subsistera dans plusieurs milliards d'années. Pluton et Neptune font une danse cosmique bien réglée, la petite planète évitant toute collision avec la géante gazeuse depuis l'aube du Système solaire.

Comment Pluton est-elle arrivée sur une orbite aussi remarquable ? Par le passé, on invoquait des rencontres planétaires improbables, mais de nouvelles théories de la dynamique planétaire expliquent le rôle des résonances orbitales, sources à la fois de chaos et de stabilité. En 1993, j'ai utilisé ces résultats pour proposer un modèle de formation de Pluton : initialement, cette planète serait née un peu plus loin que Neptune, sur une orbite quasi circulaire, de faible inclinaison, analogue à celle des autres planètes ; puis des interactions gravitationnelles résonnantes avec Neptune l'auraient ensuite





3. LA CEINTURE DE KUIPER est une région en forme de tore, au-delà de l'orbite de Neptune, peuplée de très nombreux petits corps célestes (à droite). La théorie de la migration planétaire prédit des concentrations supérieures de ces objets sur les orbites en résonance avec celle de Neptune, c'est-à-dire celles dont la période est dans un rapport rationnel simple avec la période de Neptune (régions bleutées sur le diagramme ci-dessus). Les dernières observations montrent qu'un tiers des objets de la ceinture de Kuiper dont on connaît les orbites (points rouges) sont sur des orbites résonantes 3:2, du type de celle de Pluton (croix verte). On prévoit de trouver peu d'objets sur des orbites proches de celle de Neptune (zone marron).



déplacée sur son orbite actuelle. Cette théorie abandonne l'hypothèse selon laquelle les géantes gazeuses se seraient formées à la distance du Soleil où elles se trouvent aujourd'hui. Elle introduit également le concept d'une période de migration planétaire, au tout début de l'histoire du Système solaire, dont l'orbite singulière de Pluton serait la trace.

Tout commence lorsque les planètes sont presque constituées par accréation de «planétésimaux» (de petits corps composés de roches et de glaces, dont le rayon ne dépasse pas quelques dizaines de kilomètres pour la plupart). Autour des planètes géantes gazeuses quasi formées (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) demeure une population de ces petits corps. Par la suite, l'évolution du Système solaire ralentit, se limitant à la diffusion de ces planétésimaux ou à leur accréation sur les planètes principales (voir la figure 1). Comme la diffusion gravitationnelle éjecte la majeure partie de ces planétésimaux vers des orbites distantes ou non liées, les planètes perdent de l'énergie orbitale et du moment cinétique. Toutefois, en raison de leurs masses et de leurs distances au Soleil différentes, les quatre planètes géantes sont inégalement perturbées.

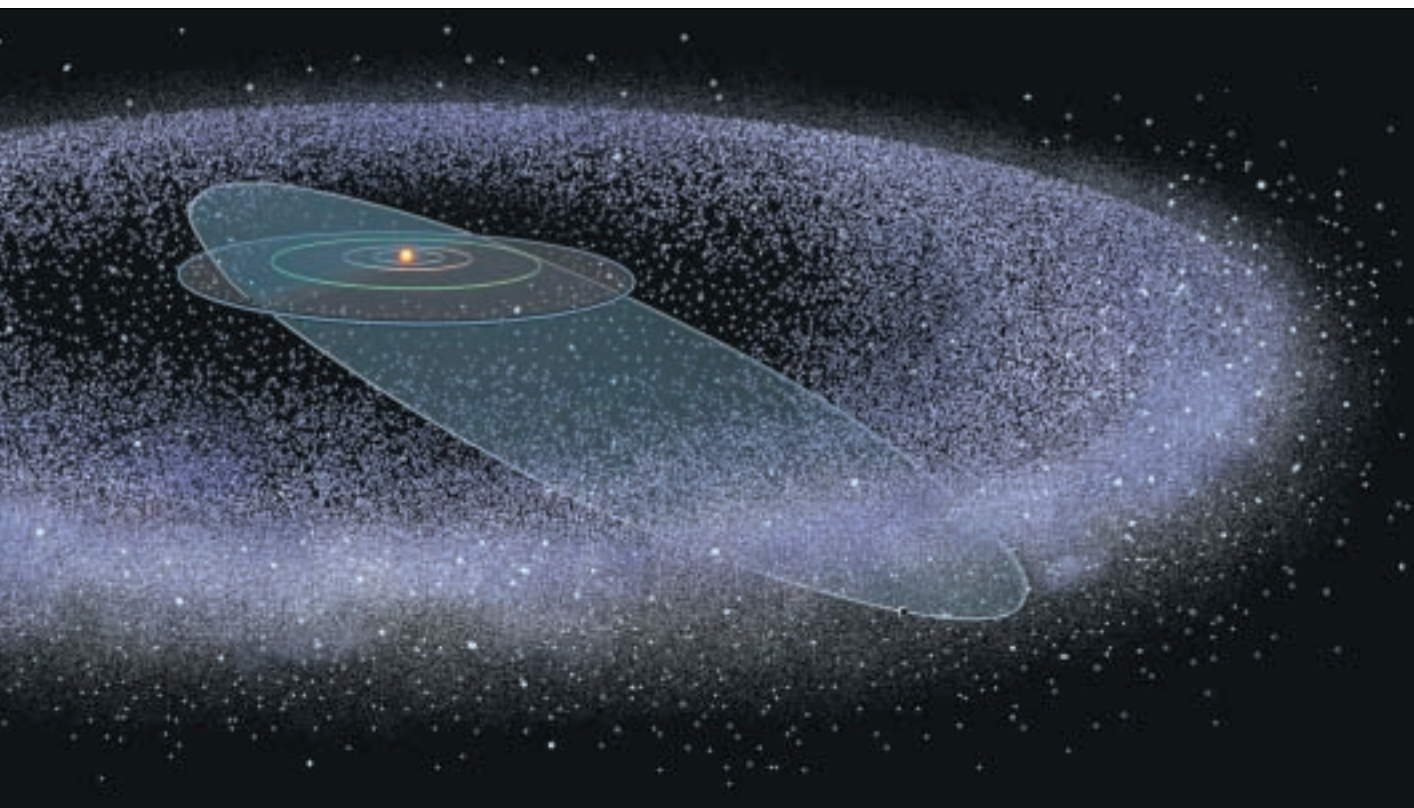
Considérons l'évolution orbitale de la planète géante la plus lointaine, Neptune, tandis qu'elle disperse la nuée de planétésimaux avoisinante. Initialement, l'énergie orbitale spécifique moyenne des planétésimaux (c'est-à-dire l'énergie orbitale par unité de masse) est égale à celle de Neptune, de sorte que les interactions gravitationnelles avec Neptune sont neutres : elles n'apportent pas d'énergie à Neptune et ne lui en prennent pas non plus. Après quelque millions d'années, le nuage de planétésimaux dans les parages de Neptune perd ses objets dont les énergies orbitales sont les plus faibles, car ils sont attirés par le champ gravitationnel des autres planètes géantes. La plupart de ces planétésimaux sont finalement éjectés hors du Système solaire par Jupiter, le poids lourd des planètes.

Ainsi, progressivement, l'énergie orbitale spécifique des planétésimaux rencontrés par Neptune devient supérieure à celle de Neptune. En raison des interactions gravitationnelles, l'énergie orbitale de Neptune augmente, et la planète s'éloigne du Soleil. Saturne et Uranus gagnent également de l'énergie orbitale et partent en spirale vers la périphérie, tandis que, en raison de la conservation de l'énergie totale du système, Jupiter perd de

l'énergie orbitale. Toutefois, Jupiter est si massif que son orbite change peu.

Dès 1984, à l'Institut Max Planck, Julio Fernandez et Wing-Huen Ip avaient déjà supposé de tels ajustements des orbites des planètes géantes. Faute d'observations et d'hypothèses directement testables, leurs travaux restèrent une curiosité.

En 1993, j'ai montré qu'à mesure que l'orbite de Neptune dérivait, elle entraînait les orbites qui sont en résonance avec son orbite. Pluton aurait été entraîné jusqu'à son orbite actuelle à partir d'une orbite initiale quasi circulaire, de faible inclinaison, extérieure à celle de Neptune. La probabilité que de tels objets soient captés et déportés vers l'extérieur avec les orbites résonantes pendant la migration de Neptune est très élevée (de la même façon, on augmente l'amplitude d'une balançoire au moyen de petites poussées, appliquées à la fréquence naturelle de la balançoire). L'excentricité finale mesurerait ainsi l'importance de la migration de Neptune. Selon cette théorie, l'excentricité orbitale de Pluton (0,25) indique que Neptune aurait migré vers l'extérieur d'au moins cinq unités astronomiques. À l'aide de simulations numériques, on estime aujourd'hui qu'une migration de huit unités astronomiques et une durée de



migration de quelques dizaines de millions d'années rendraient compte de l'inclinaison de l'orbite de Pluton.

Si Pluton était le seul objet situé au-delà de Neptune, cette explication resterait invérifiable, mais les calculs prédisent également la répartition orbitale des corps de la ceinture de Kuiper constituée des planétésimaux situés au-delà de Neptune, qui restent du disque primordial (voir *La ceinture de Kuiper*, de Jane Luu et David Jewitt, *Pour la Science*, juillet 1996). En supposant que les plus gros des corps de la ceinture de Kuiper étaient suffisamment petits pour que leur perturbation gravitationnelle sur les autres objets de la ceinture soient négligeables, le mécanisme dynamique de balayage résonant serait applicable non seulement à Pluton, mais également à tous les objets situés au-delà de Neptune, qui subiraient une déviation semblable de leur orbite d'origine. En conséquence, les objets sur des orbites excentriques devraient être plus nombreux aux deux plus fortes résonances de Neptune, la 3:2 et la 2:1. Les orbites correspondantes sont des ellipses de demi-grand axe respectivement égales à 39,5 et 47,8 unités astronomiques (le demi-grand axe est la distance moyenne entre l'objet et le Soleil.)

Aux autres résonances, telle la résonance 5:3, on trouverait également

des concentrations d'objets, mais moins denses. La région située entre Neptune et l'orbite 3:2 devrait être peu peuplée, en raison d'un important entraînement par résonance dans cette zone et parce que les perturbations engendrées par Neptune déstabiliseraient les orbites des éventuels objets restants. En revanche, les planétésimaux qui se sont formés à plus de 50 unités astronomiques du Soleil auraient été peu perturbés et auraient encore leur répartition initiale.

La découverte de nombreux objets dans la ceinture de Kuiper nous permet aujourd'hui de tester la théorie. Plus de 174 objets y ont déjà été découverts. La plupart d'entre eux ont des périodes de plus de 250 ans, et aucune orbite n'a été suivie sur plus de un pour cent de sa totalité. Néanmoins, on a déterminé avec une fiabilité raisonnable les paramètres orbitaux de 45 de ces objets (voir la figure 3). Ils ne sont pas répartis uniformément sur des orbites quasi circulaires et de faible inclinaison, comme cela serait le cas pour une population primordiale non perturbée de planétésimaux. Au contraire, on détecte des vides et des accumulations dans leur répartition. Une grande partie de ces objets de la ceinture de Kuiper se déplacent sur des orbites allongées de résonance 3:2, sem-

blables à celle de Pluton, et l'on ne compte presque aucun corps sur des orbites intérieures à l'orbite 3:2, ce qui est prédit par la théorie de l'entraînement par résonance.

Plusieurs questions demeurent néanmoins posées : le nombre d'objets en résonance 2:1 est-il du même ordre que celui des objets en résonance 3:2, conformément à la théorie de la migration planétaire ? Quelle est la répartition des orbites à plus grande distance du Soleil ? Le recensement de la population de la ceinture de Kuiper est encore trop incomplet pour que l'on réponde précisément à ces questions. En décembre 1998, une équipe du Centre pour les petites planètes, dans le Massachusetts, a annoncé l'identification du premier objet en résonance 2:1 avec Neptune. Deux jours plus tard, la même équipe révélait qu'un deuxième objet de Kuiper avait été découvert sur une orbite résonante 2:1. Ces objets sont tous deux sur des orbites très excentriques. Ils font peut-être partie d'une importante population d'objets situés sur des orbites de même type. On avait initialement cru que ces objets étaient respectivement sur des orbites 3:2 et 5:3, mais de nouvelles observations montrent que les identifications initiales étaient incorrectes. Cette révision souligne l'importance

d'un suivi des orbites des objets de Kuiper connus, en vue de mieux connaître leur répartition. Avec un ensemble de données restreint, le risque d'une conclusion incorrecte est élevé.

Bien qu'on ne puisse écarter d'autres explications, la répartition des objets de la ceinture de Kuiper renforce l'hypothèse de la migration des planètes. Neptune serait née à environ 3,3 milliards de kilomètres du Soleil et aurait ensuite fait un voyage d'environ 1,2 milliard de kilomètres vers la périphérie, couvrant une distance presque égale

au tiers du rayon de son orbite actuelle. Les migrations d'Uranus, de Saturne et de Jupiter auraient été plus limitées, respectivement de l'ordre de 15, 10 et 2 pour cent de leur rayon orbital actuel. Pour ces planètes, les estimations sont moins fiables, car, contrairement à Neptune, leurs migrations n'ont pas laissé de traces directes sur les objets de la ceinture de Kuiper.

L'essentiel de cette migration s'est opéré en moins de 100 millions d'années ; c'est long par rapport à la période de formation des planètes (moins de

10 millions d'années), mais c'est peu par rapport à l'âge du Système solaire (4,5 milliards d'années). Autrement dit, la migration planétaire a commencé au début du Système solaire, et elle a duré longtemps après que les planètes ont été formées. La masse totale des planétésimaux dispersés était d'environ trois fois la masse de Neptune. Des changements orbitaux encore plus spectaculaires se produisent précocement dans des systèmes planétaires, lorsque le disque primordial contient plus de matière, avec, peut-être, de

Un autre système planétaire ?

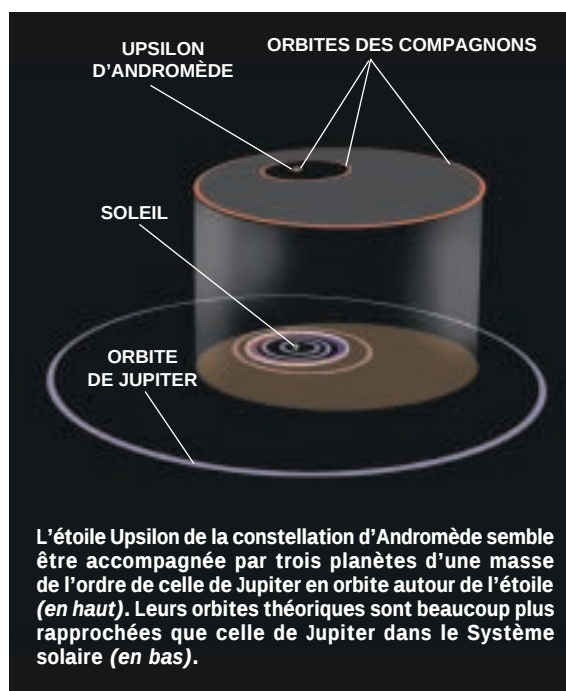
En avril 1999, Paul Butler et ses collègues de l'Observatoire anglo-australien ont annoncé la découverte de ce qui semble être le premier exemple de système planétaire comprenant plusieurs objets de masse équivalente à celle de Jupiter, en orbite autour d'une étoile de type solaire. Jusqu'alors, on ne connaissait que des systèmes à une planète. L'étoile étudiée par P. Butler, Upsilon de la constellation d'Andromède, est à 40 années-lumière du Système solaire ; elle est un peu plus massive que le Soleil et trois fois plus brillante.

Cette étoile semble posséder trois compagnons. L'objet le plus central a une masse au moins égale à 70 pour cent de la masse de Jupiter, et décrit une orbite circulaire à une distance de seulement 0,06 unité astronomique (soit environ neuf millions de kilomètres) de l'étoile. Le

compagnon le plus externe est au moins quatre fois plus massif que Jupiter et se déplace sur une orbite très allongée, d'un rayon moyen de 2,5 unités astronomiques (la moitié du rayon de l'orbite de Jupiter). L'objet intermédiaire est au moins deux fois plus massif que Jupiter et parcourt une orbite moyennement excentrique, d'un rayon moyen de 0,8 unité astronomique.

Si elle est confirmée, cette découverte permettra de tester et de mettre au point de nouveaux modèles de formation et d'évolution des systèmes planétaires. Plusieurs théoriciens ont déjà déterminé que ce système est peu stable : la stabilité dynamique du système serait bien meilleure s'il n'y avait pas de planète intermédiaire. Ce résultat est intéressant, car le corps intermédiaire est celui pour lequel les données observationnelles sont le moins probantes.

Le système planétaire ne s'explique par aucun des mécanismes théoriques qui stipulent que les planètes géantes naissent sur des orbites distantes, avant de se rapprocher de l'étoile : si les interactions entre le disque et la protoplanète rétrécissaient les orbites, les planètes les plus massives, en principe les plus anciennes, devraient s'être le plus rapprochées de l'étoile, contrairement à ce



L'étoile Upsilon de la constellation d'Andromède semble être accompagnée par trois planètes d'une masse de l'ordre de celle de Jupiter en orbite autour de l'étoile (en haut). Leurs orbites théoriques sont beaucoup plus rapprochées que celle de Jupiter dans le Système solaire (en bas).

qui est observé dans le système Upsilon d'Andromède. Si seuls le corps le plus proche et le corps le plus éloigné de l'étoile existent vraiment, ce système corroborerait la théorie de diffusion planète-planète, où deux planètes massives migrent vers des orbites proches, puis s'éloignent en raison d'une diffusion mutuelle, avec pour résultat une planète sur une orbite rapprochée quasi circulaire, et l'autre sur une orbite lointaine et allongée. Cependant ce scénario n'explique pas tout : on s'attendrait à trouver le compagnon le plus massif sur l'orbite la plus proche de l'étoile, et le compagnon le moins massif sur l'orbite la plus lointaine, ce qui est l'inverse des caractéristiques du système Upsilon d'Andromède.

Les deux mécanismes auraient-ils agi simultanément ? Un rétrécissement orbital par des interactions

disque-protoplanète pour l'objet le plus central aurait-il été suivi d'une diffusion gravitationnelle mutuelle des deux autres corps ? Il se peut également que des mécanismes de formation et d'évolution entièrement différents soient à l'œuvre, comme la fragmentation du nuage de gaz protostellaire, à laquelle on attribue la production de systèmes à étoiles multiples et les compagnons de naines brunes.

Si seuls le corps le plus rapproché et le corps le plus éloigné existent vraiment, le système aurait une architecture semblable à celle des systèmes stellaires triples classiques, constitués d'un système binaire serré et d'une étoile distante sur une orbite allongée. Davantage d'observations seront nécessaires pour confirmer le nombre de compagnons, leur masse et leurs paramètres orbitaux.

Les techniques utilisées jusqu'à présent ne permettent pas de détecter des systèmes planétaires semblables au nôtre, car les oscillations stellaires dues à des planètes de la taille de la Terre, en orbite rapprochée (ou à des planètes de la taille de Jupiter, en orbite plus lointaine), sont inférieures au seuil d'observation. Nous commençons seulement à découvrir des planètes autour d'étoiles de ce type. L'astronomie devra encore progresser beaucoup avant d'expliquer la formation de notre Système solaire.

nombreuses protoplanètes sur des orbites proches, en compétition dans le mécanisme d'accrétion.

D'autres systèmes planétaires?

Au début des années 1980, à l'Institut de technologie de Californie, Peter Goldreich et Scott Tremaine calculèrent que les forces gravitationnelles entre une protoplanète et le disque de gaz environnant, ainsi que les pertes d'énergie engendrées par les forces de frottement visqueux dans le milieu gazeux, conduiraient à d'importants échanges d'énergie et de moment cinétique entre la protoplanète et le disque. Si les forces exercées sur la protoplanète par le disque de matière contenu dans l'orbite, d'une part, et par la matière se trouvant juste à l'extérieur, d'autre part, étaient légèrement déséquilibrées, l'orbite de la planète serait rapidement modifiée de manière draconienne. À l'époque, cette possibilité théorique avait peu retenu l'attention. N'ayant d'autre exemple que notre Système solaire, les théoriciens de la formation des planètes supposaient toujours que les planètes s'étaient formées sur leurs orbites actuelles.

Cependant, depuis cinq ans, la recherche de planètes extrasolaires a apporté quelques exemples possibles de migration planétaire. En mesurant les oscillations révélatrices des étoiles proches (situées à moins de 50 années-lumière du Système solaire), les astronomes ont découvert des preuves de la présence de compagnons de la taille de Jupiter autour d'étoiles analogues au Soleil. Le premier exemple, une planète en orbite autour de l'étoile 51 de la constellation de Pégase, a été découvert en 1995 par Michel Mayor et Didier Queloz, de l'Observatoire de Genève. Aujourd'hui, une vingtaine de planètes extrasolaires ont été décelées. La technique utilisée pour ces recherches (la mesure du décalage Doppler des rayonnements des étoiles, pour déterminer les variations périodiques des vitesses stellaires orbitales) ne fournit qu'une limite inférieure pour la masse des compagnons des étoiles. La plupart des objets trouvés ont des masses supérieures à la masse de Jupiter et des rayons orbitaux inférieurs à 0,5 unité astronomique.

Que révèlent ces objets sur la constitution du Système solaire? Selon le modèle classique de formation plané-

taire, les planètes géantes du Système solaire se sont formées en deux étapes. Au cours de la première étape, des planétésimaux solides se sont agglutinés et ont formé un noyau protoplanétaire. Lors de la seconde étape, ce noyau s'est entouré d'une enveloppe gazeuse massive, constituée d'éléments de la nébuleuse environnante attirés par la force gravitationnelle du noyau. La durée de vie des disques protoplanétaires autour des étoiles de type solaire montre que cette formation se termine moins de dix millions d'années après la formation de la nébuleuse solaire elle-même.

À moins de 0,5 unité astronomique d'une étoile, la masse du disque primordial est trop faible pour que des noyaux protoplanétaires solides se condensent. De surcroît, il est douteux qu'une protoplanète en orbite proche puisse attirer suffisamment de gaz pour se constituer une enveloppe aussi massive que celle de Jupiter. L'une des raisons en est géométrique : un objet en orbite rapprochée traverse un volume inférieur à celui d'un objet qui se déplace sur une orbite plus éloignée. En outre, le disque gazeux, plus chaud près de l'étoile, est moins susceptible de se condenser en un noyau protoplanétaire froid. Au total, la formation de planètes géantes sur des orbites très proches est peu plausible.

Plusieurs théoriciens ont donc supposé que les planètes géantes extrasolaires se seraient formées à plusieurs unités astronomiques de leur étoile et auraient ensuite migré vers l'intérieur. Trois mécanismes de migration orbitale planétaire sont à l'étude. Deux font intervenir des interactions disque-protoplanète par lesquelles les planètes migreraient loin de leur lieu de formation tant que subsiste un disque massif.

Selon la théorie de P. Goldreich et S. Tremaine, le mouvement de la planète serait couplé à celui du gaz qui vient s'ajouter à la protoétoile : la planète pourrait soit plonger dans l'étoile, soit se désolidariser du gaz au moment où il devient très proche de l'étoile. L'autre hypothèse envisagée est l'interaction avec un disque de planétésimaux plutôt qu'avec un disque gazeux : une planète géante initialement placée dans un disque très massif de planétésimaux échangerait de l'énergie et du moment cinétique par diffusion gravitationnelle et par des interactions résonantes ; son orbite se rétrécirait alors jusqu'à ce qu'elle

Des petits corps mal connus

Depuis 1992, les découvertes se succèdent à un rythme effréné : environ 200 objets transneptuniens ont déjà été observés depuis 1992. Cette moisson résulte de l'utilisation de caméras à capteurs CCD montées sur les grands télescopes internationaux. Cependant, la plupart de ces corps n'ont été observés qu'une fois et ils ne seront probablement jamais observés à nouveau. La détermination de leur orbite est compromise, car elle nécessiterait plusieurs années d'observation. En trois ans, de tels objets parcourent environ un centième d'orbite, soit le strict minimum pour la détermination d'une orbite approximative. De surcroît, il faut que l'objet soit observé chaque année lors de son passage à l'opposition (lorsque l'objet et le Soleil sont opposés dans le ciel), ce qui nécessite une coopération entre tous les groupes d'observateurs.

Brett Gladman, de l'Observatoire de la Côte d'Azur collabore avec des astronomes de l'Université de Toronto dans un programme de recherche et de suivi d'objets transneptuniens. De nouvelles techniques d'observation et de traitement des données leur ont permis de découvrir l'objet le plus lointain (62 unités astronomiques lors de son observation) et l'objet le plus petit (15 kilomètres de dimension).

Le nombre d'objets lointains bien connus étant très restreint, les conclusions sur le Système solaire externe restent spéculatives. Ainsi, plusieurs équipes travaillent sur des scénarios différents de celui présenté dans l'article de R. Malhotra. Sous l'impulsion d'Alessandro Morbidelli, le groupe de mécanique céleste de l'Observatoire de la Côte d'Azur a imaginé que de gros planétésimaux (certains d'une taille au moins équivalente à celle de Mars) se forment en même temps que les planètes géantes. À la fin de la formation des planètes géantes, le gaz qui était dans le Système solaire commence à se dissiper. La dynamique gravitationnelle n'est alors plus amortie par le gaz environnant et l'orbite des gros planétésimaux

est très perturbée par les planètes géantes : en quelques millions ou dizaines de millions d'années, ils auraient été éjectés du Système solaire. Au cours de cette éjection, les gros planétésimaux traversent les ceintures de petits corps et les perturbent. De nombreux petits corps sont éjectés du Système solaire ; les survivants sont sur des orbites excentriques et inclinées.

Un tel modèle explique d'une façon unifiée les caractéristiques dynamiques et physiques connues, pour la ceinture des astéroïdes, et supposées, pour la ceinture de Kuiper. Contrairement à celui de R. Malhotra, ce modèle prévoit que tous les petits corps au-delà de Neptune sont entraînés sur des orbites excentriques et inclinées, pas seulement ceux qui sont sur des orbites résonantes.

Le grand nombre d'objets sur des orbites résonantes, point clef du modèle de R. Malhotra, pourrait n'être qu'un effet de sélection des observations, qui sont le plus souvent effectuées dans des directions où les corps en résonances dominent ; de plus, les responsables du Centre pour les petites planètes de Cambridge, chargés de la détermination des orbites, ont la fâcheuse manie d'attribuer une orbite résonante à tout corps pour lequel les données orbitales manquent...

Le mécanisme de capture des orbites résonantes fonctionne uniquement lorsqu'il n'y a plus de gros planétésimaux dans le Système solaire. Aussi, l'évolution du Système solaire s'est probablement déroulée en deux phases : une perturbation des petits corps, due pour l'essentiel à la présence de planétésimaux massifs, puis, lorsque ces planétésimaux ont été éjectés, une période de migration de Neptune qui a capturé certains corps en résonance, enrichissant les orbites résonantes. Toutefois, comme les orbites initiales des objets transneptuniens n'étaient vraisemblablement par circulaires, leur excentricité actuelle ne permet pas de déduire la distance de migration.

Jean-Marc PETIT, Observatoire de la Côte d'Azur, Nice

atteigne le bord interne du disque, à quelques rayons stellaires seulement de l'étoile. Enfin, le troisième mécanisme est la diffusion des planètes, qui se seraient formées sur des orbites trop proches les unes des autres pour assurer une stabilité à long terme ou qui auraient migré vers de telles orbites. Si l'issue de ce scénario reste imprévisible, il devrait néanmoins conduire à des orbites très excentriques. Le hasard pourrait, dans certains cas, placer une des planètes dispersées sur une orbite excentrique, dont le point le plus proche de l'étoile serait si proche de cette dernière que les effets de marées finiraient par circulariser l'orbite ; l'autre planète serait déplacée vers une orbite excentrique éloignée. Chacun de ces mécanismes peut rendre compte de toute une variété de rayons orbitaux et d'excentricités orbitales pour les planètes survivantes.

Ces idées ne sont pas un simple ajustement de la théorie classique de formation des planètes. Elles remettent en cause l'opinion répandue qui voudrait que les disques protoplanétaires entourant des étoiles de type solaire évoluent en des systèmes planétaires semblables au nôtre. En réalité, la plupart des planètes pourraient naître dans des configurations instables, de sorte qu'une migration planétaire ultérieure donnerait des résultats très variés, selon les propriétés initiales du disque. Seules de nouvelles observations et des avancées théoriques permettront d'élucider la relation entre les planètes extrasolaires nouvellement découvertes et les planètes de notre Système solaire. Néanmoins, les astronomes sont maintenant convaincus que les planètes peuvent changer d'orbite de façon radicale.

Renu MALHOTRA travaille au Laboratoire Lunaire et planétaire de l'Université de l'Arizona.

Ivars PETERSON, *Le chaos dans le Système solaire*, Collection Sciences d'avenir, Pour la Science, 1995.

Geoffrey W. MARCY et R. Paul BUTLER, *Detection of Extrasolar Giant Planets*, in *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 36, pp. 57-98, 1998.

Renu MALHOTRA et al., *Dynamics of the Kuiper Belt*, in *Protostars and Planets IV*, sous la direction de V. Mannings et al., University of Arizona Press (à paraître).
