

Le Système solaire, une exception née du chaos

JUPITER, dans sa prime jeunesse (*au premier plan*), évoluait dans le disque protoplanétaire de poussières et de gaz entourant le Soleil (*au fond*). Cette planète géante a sans doute joué un rôle crucial dans le Système solaire.

Konstantin Batygin, Gregory Laughlin et Alessandro Morbidelli

Les premiers âges du Système solaire se caractérisent par des planètes vagabondes aux orbites instables et des collisions planétaires destructrices. Ce chaos a engendré un système qui, comparé aux autres systèmes planétaires découverts, constitue une anomalie.

L'ESSENTIEL

- Loin d'être la norme, la configuration actuelle du Système solaire, avec ses planètes internes rocheuses et ses géantes gazeuses externes, est atypique en comparaison de la plupart des autres systèmes planétaires.
- Les récentes simulations numériques et l'étude des exoplanètes suggèrent que les débuts du Système solaire ont été violents et chaotiques.
- Jupiter et Saturne ont connu des changements d'orbite il y a des milliards d'années.
- Lors de ces migrations, les géantes gazeuses auraient poussé des planètes vers le Soleil ou, plus probablement, vers l'espace interstellaire.

© Ken Brown / Mondelithic Studios

Il y a quelques années, telle que nous la concevions, l'histoire de la naissance du Système solaire était assez simple et dénuée d'événements spectaculaires. Elle commence il y a près de 4,5 milliards d'années, avec un nuage sombre de gaz et de poussière en rotation. Le nuage s'est effondré sur lui-même sous l'effet de sa propre gravité. Le Soleil s'est formé en son centre et, petit à petit, huit planètes, ainsi que des objets plus modestes tels que Pluton, ont émergé du reste de gaz et de poussières qui tourbillonnait autour de l'étoile. Depuis, le Système solaire effectue un ballet aux mouvements aussi précis et prévisibles que ceux d'une horloge.

Mais ces dernières années, les astronomes ont commencé à glaner des indices subtils faisant mentir ce scénario bien rodé. Comparé aux milliers de systèmes exoplanétaires nouvellement découverts, le Système solaire a des caractéristiques peu fréquentes. Sa structure, avec ses petites planètes internes rocheuses, ses géantes gazeuses externes et l'absence de planètes plus proches du Soleil que Mercure, est parfaitement atypique. Grâce à des simulations numériques, les astronomes commencent à comprendre que ces entorses à la règle sont le résultat d'une jeunesse turbulente.

De fait, la nouvelle histoire du Système solaire est beaucoup plus mouvementée et chaotique qu'on ne l'imaginait : il y est question de planètes errantes évincées de leur lieu de naissance, de corps précipités dans le Soleil et de géantes solitaires expulsées dans les confins glacés du Système solaire. En étudiant ces événements anciens et les cicatrices qu'ils ont laissées, les astronomes ont brossé un tableau cohérent des époques cruciales de la formation de ce système.

Reprenons d'abord l'ancienne vision du Système solaire dès ses débuts, lors de la formation du Soleil. Celle-ci s'est déroulée au cœur d'un nuage moléculaire géant de gaz et de poussière

ayant une masse de l'ordre de 10 000 fois celle du Soleil. Une zone dense au sein du nuage s'est effondrée sur elle-même, formant au centre une protoétoile – le jeune Soleil –, entourée d'un immense anneau de gaz et de poussière opaque, le disque protoplanétaire.

Pendant des décennies, les théoriciens ont pensé que les propriétés du disque protoplanétaire suffisaient pour expliquer l'une des principales caractéristiques du Système solaire : la répartition de son cortège, d'abord les quatre planètes telluriques rocheuses, puis, sur des orbites plus lointaines, les quatre géantes gazeuses.

Un processus universel explique la formation de ces deux variétés de planètes. Dans le disque gazeux et turbulent, des grains de poussière entrent en collision et se collent les uns aux autres jusqu'à former des objets de taille kilométrique nommés planétésimaux. Ceux-ci s'apparentent aux moutons de poussière formés par les courants d'air et les forces électrostatiques sur un sol non balayé. En un million d'années environ, le disque protoplanétaire du Système solaire regorgeait de planètes embryonnaires de la taille de la Lune.

La plupart de ces corps se trouvaient au-delà de l'actuelle ceinture d'astéroïdes, et au-delà de la « ligne de glace », qui indique la région suffisamment éloignée de la chaleur du jeune Soleil pour qu'il subsiste de la glace d'eau dans le disque. Par conséquent, au-delà de la ligne de démarcation, les planètes embryonnaires pouvaient se repaître de glace en abondance et ainsi atteindre des tailles énormes. Par ailleurs, les plus gros de ces corps étaient aussi ceux qui grossissaient le plus vite. Leur champ gravitationnel, plus intense, accumulait la plus grande part de la glace, du gaz et de la poussière disponibles dans le disque environnant. En un million d'années seulement, l'embryon le plus goulu était devenu la planète Jupiter.

Pour les planétologues, la dichotomie de l'architecture du Système solaire s'est jouée à cette période. Devancées par Jupiter, les autres planètes géantes sont plus petites parce que leur croissance a été plus lente, la quantité de gaz disponible ayant déjà été très réduite par Jupiter au moment où leur attraction gravitationnelle a pris vraiment de l'importance. Les planètes internes étaient encore beaucoup plus petites parce que nées à l'intérieur de la ligne de glace, là où le disque était relativement appauvri en matière solide.

■ LES AUTEURS



Konstantin BATYGIN est maître de conférences en planétologie à l'institut de technologie de Californie, aux États-Unis.



Gregory LAUGHLIN est professeur d'astronomie et d'astrophysique à l'université de Californie à Santa Cruz, aux États-Unis.



Alessandro MORBIDELLI est planétologue à l'Observatoire de la Côte d'Azur, à Nice, et membre des académies des sciences française et belge.

En dehors de quelques détails gênants, comme les masses trop petites de Mars et de Mercure par rapport aux résultats des simulations, ce scénario de « Jupiter en premier » semblait expliquer de façon satisfaisante la structure du Système solaire. Le mécanisme semblait assez universel pour qu'on s'attende à retrouver des organisations similaires autour d'autres étoiles : des planètes géantes sur des orbites de longue période au-delà de la ligne de glace, et des planètes rocheuses en deçà, avec des périodes orbitales de l'ordre de quelques années ou moins. Or les observations ont contredit ces pronostics.

La révolution des exoplanètes

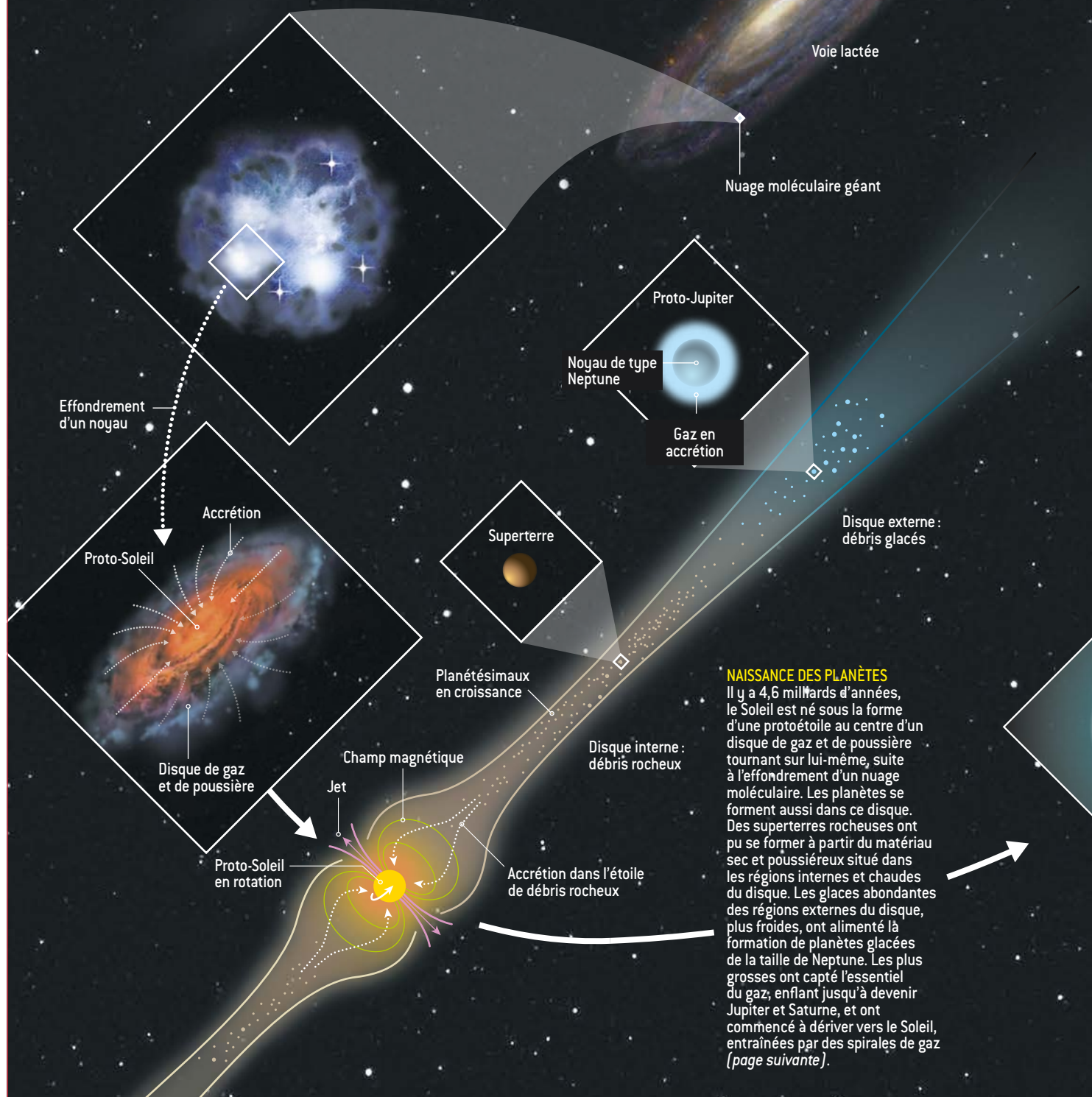
Quand les astronomes ont commencé à découvrir des exoplanètes, il y a plus de vingt ans, ils ont pu mettre à l'épreuve ce qu'ils savaient de la formation du Système solaire. Beaucoup des premières exoplanètes connues étaient des « jupiters chauds », des planètes gazeuses géantes tournant à toute allure près de leur étoile, avec des périodes de révolution de quelques jours seulement. L'existence de planètes géantes si proches de leur étoile, où la chaleur est si forte que la glace est totalement absente, est en contradiction avec le scénario classique de formation planétaire. Pour expliquer ce désaccord, les théoriciens ont conclu que ces planètes s'étaient formées plus à l'extérieur du disque, avant de migrer vers ses régions internes.

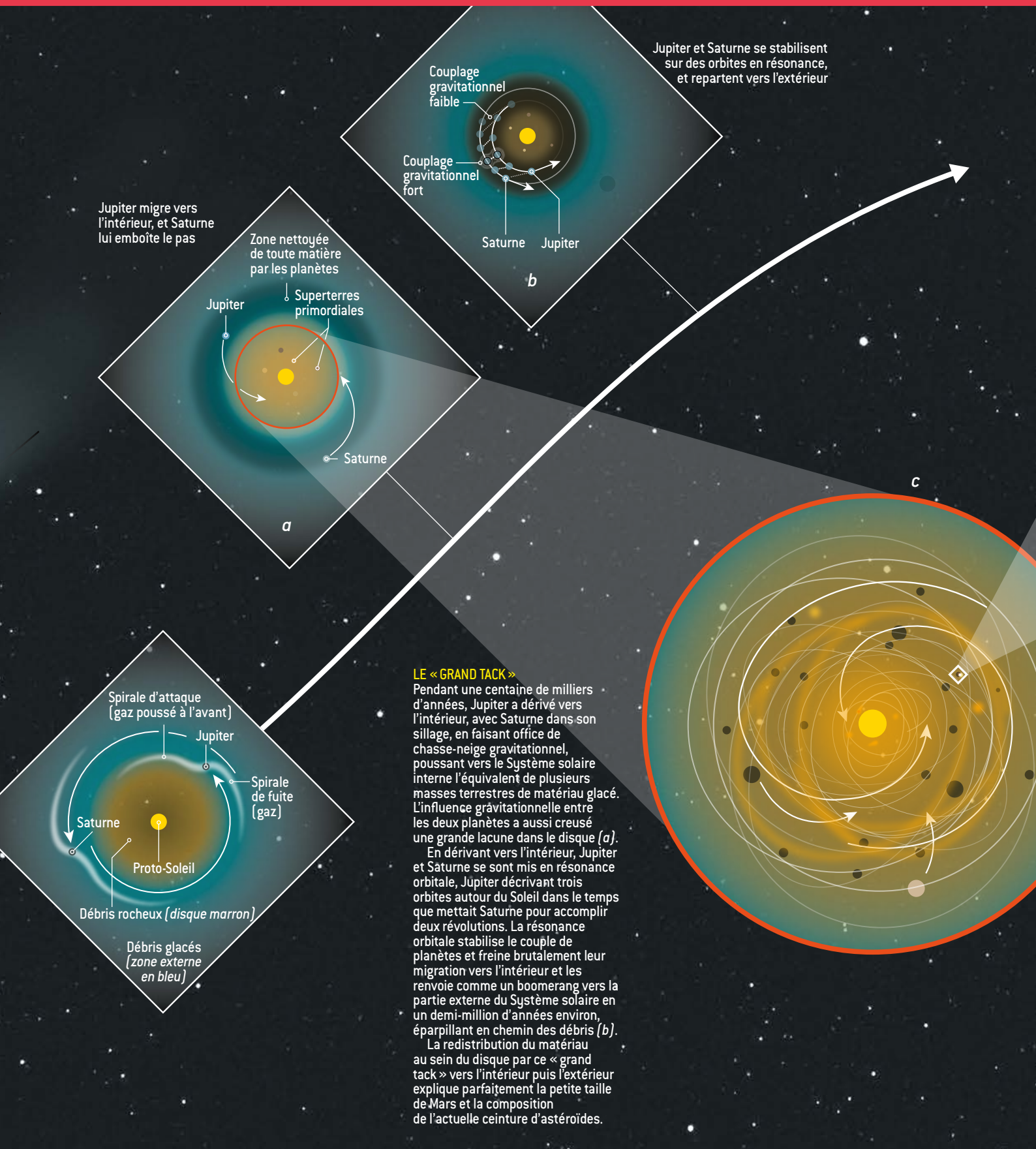
Il reste cependant que, avec les milliers d'exoplanètes trouvées par des relevés tels que la mission *Kepler* de la Nasa, le Système solaire apparaît comme une exception dans l'Univers. Le système planétaire moyen contient une ou plusieurs super-terres (des planètes environ deux à dix fois plus grandes que la Terre) avec des périodes orbitales inférieures à une centaine de jours. En revanche, on ne trouve de planètes géantes (des analogues de Jupiter et Saturne) que dans 10 % environ des systèmes extrasolaires, et, parmi elles, celles décrivant des orbites presque circulaires sont encore plus rares.

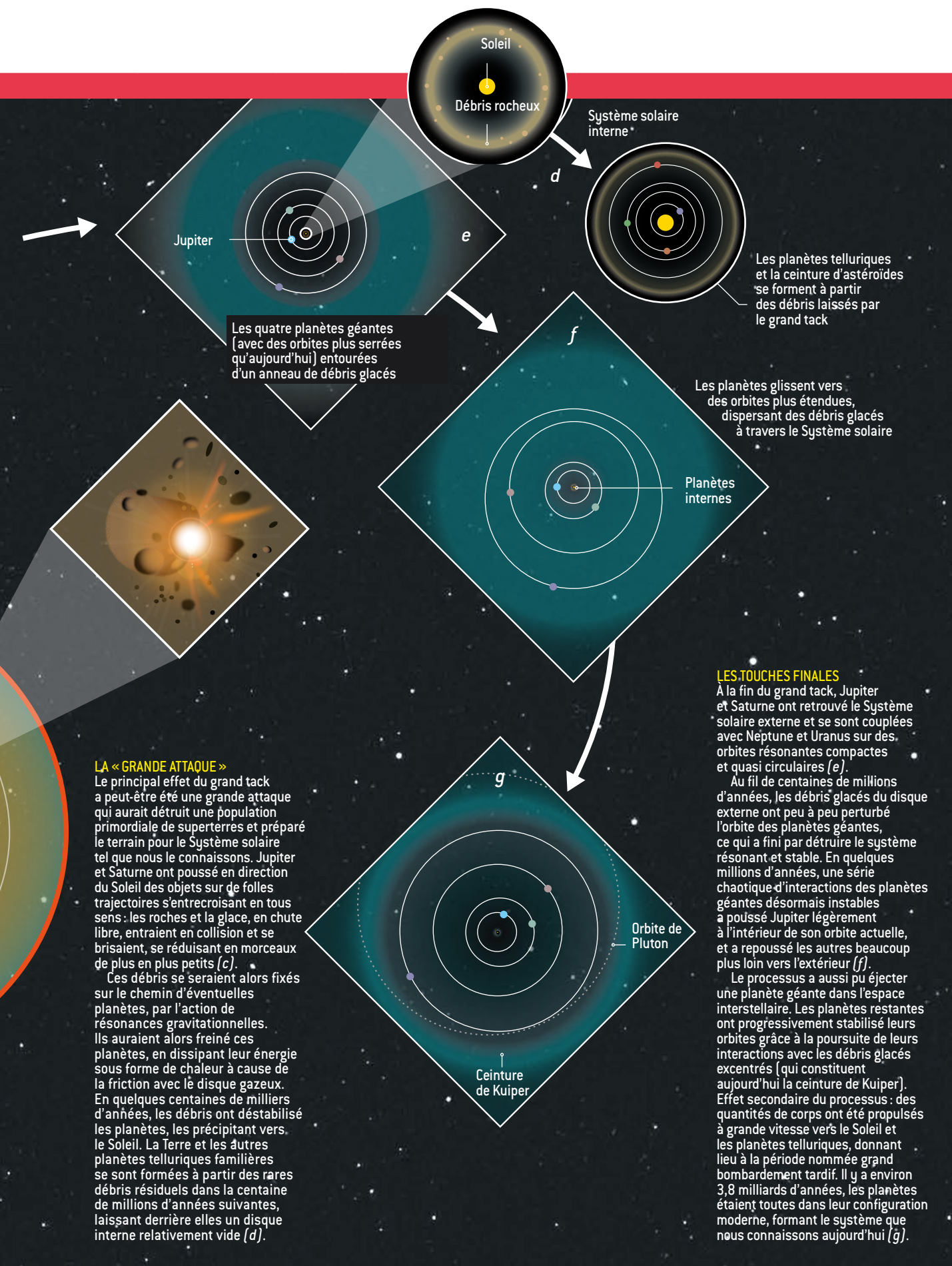
Leurs attentes ayant été déçues, les planétologues ont compris que les « quelques détails gênants » de la théorie classique de formation du Système solaire exigeaient de meilleures explications. Pourquoi la région interne du Système solaire est-elle si pauvre

L'ÉVOLUTION DU SYSTÈME SOLAIRE

Les planétologues pensaient que le Système solaire, avec ses planètes rocheuses internes et ses géantes gazeuses externes, était d'un type banal. Or cette organisation est, en fait, plutôt une anomalie. Les « superterres », d'une masse comprise entre celle de la Terre et de Neptune, sont les planètes les plus courantes dans la Galaxie, mais il n'en existe aucune autour du Soleil. Et la plupart des étoiles sont dotées de planètes bien plus rapprochées qu' Mercure ne l'est du Soleil. Des interactions planétaires complexes lors de la jeunesse du Système solaire expliqueraient la structure de ce dernier.







Différents phénomènes
gravitationnels ont conduit
les planètes à entreprendre
d'épiques
traversées
du disque
protoplanétaire

en masse, comparée à ses homologues exoplanétaires, avec des planètes rocheuses maigrichonnes au lieu de superterres et sans aucune planète plus proche du Soleil que Mercure ? Et pourquoi les orbites des planètes géantes du Soleil sont-elles si paisibles et éloignées ?

Les différents indices révélés par l'étude des exoplanètes nous ont fait comprendre que l'orbite des planètes pouvait changer drastiquement au cours du temps. Ainsi, une planète en formation pourrait dériver loin de son point d'origine, un peu comme un radeau de survie sur l'océan.

Les astronomes ont d'abord cherché quel serait le mécanisme de migration. Dès qu'une planète est devenue assez grosse, son influence gravitationnelle s'étend au disque environnant, et engendre des ondes de densité spirales. Celles-ci exercent, à leur tour, des forces gravitationnelles. Cette dynamique crée d'importantes rétroactions entre les planètes et le disque : en interagissant avec ces ondes, les jeunes grosses planètes sont freinées sur leur orbite, ce qui les conduit à se rapprocher de leur étoile.

Quand ce processus de migration planétaire est intégré au modèle, la ligne de glace au sein des disques ne joue plus un rôle prépondérant dans le façonnage et l'architecture des systèmes planétaires. Par exemple, des planètes géantes nées au-delà de la ligne de glace peuvent devenir des jupiters chauds en dérivant vers l'intérieur. Le problème est que ce processus fonctionne presque trop bien : il semble avoir eu lieu dans de très nombreux disques protoplanétaires. Comment, dans ces conditions, expliquer les orbites décrites par Jupiter et Saturne, si éloignées du Soleil ?

En 2001, à l'université Queen Mary de Londres, Frédéric Masset et Mark Snellgrove ont donné la première ébauche d'une explication convaincante. Les deux chercheurs ont modélisé l'évolution simultanée des orbites de Saturne et de Jupiter dans le disque protoplanétaire du Soleil. En raison de la masse inférieure de Saturne, le rythme de migration de cette planète vers l'intérieur est plus rapide que celui de Jupiter, et à

mesure que leur migration progresse, les deux planètes se rapprochent. Finalement, les orbites atteignent une configuration particulière, nommée résonance orbitale, dans laquelle Jupiter effectue trois révolutions autour du Soleil quand Saturne en fait deux dans le même temps.

Deux planètes liées par une résonance orbitale échangent de l'énergie mécanique, ce qui stabilise leurs orbites. L'influence gravitationnelle commune des deux planètes est amplifiée et s'exerce essentiellement l'une sur l'autre et sur leur environnement. Dans le cas de Jupiter et de Saturne, l'influence des deux corps a creusé une grande lacune – c'est-à-dire une région vide de matière – dans le disque protoplanétaire, Jupiter étant sur le bord interne de la lacune et Saturne sur son bord externe. La formation de la lacune conduit à un déséquilibre des rétroactions du disque sur ces deux planètes. Et comme Jupiter exerce une attraction gravitationnelle plus importante sur le disque interne que ne le fait Saturne sur le disque externe, les planétologues ont montré que les deux planètes ont rebroussé chemin et ont commencé à s'éloigner du Soleil. Ce mouvement vers l'intérieur puis vers l'extérieur est souvent nommé le grand tack (ou grand virement de bord), par analogie avec la trajectoire d'un voilier qui tire des bords pour remonter au vent.

Jupiter, le régime minceur de Mars

En 2011, une décennie après l'introduction du concept de grand tack, Kevin Walsh, alors à l'observatoire de la Côte-d'Azur, à Nice, et ses collègues ont montré grâce à des simulations numériques que ce modèle explique non seulement l'histoire dynamique de Jupiter et de Saturne, mais aussi la composition de la ceinture principale d'astéroïdes (qui contient des planétésimaux rocheux et glacés) ainsi que la faible masse de Mars.

Comment ? Quand Jupiter a migré vers l'intérieur, la planète s'est comportée comme un chasse-neige. Par son influence gravitationnelle, elle a capturé et poussé des planétésimaux devant elle sur sa trajectoire. On suppose que dans sa migration, Jupiter s'est approchée du Soleil jusqu'à l'orbite actuelle de Mars (1,5 fois la distance Soleil-Terre actuelle) avant de faire demi-tour. Elle aurait alors pu repousser l'équivalent de plusieurs masses terrestres de matériau

La « planète Neuf » dont l'existence a été récemment avancée est-elle en accord avec les dernières théories de l'origine du Système solaire ? Seule son observation et la détermination de ses propriétés permettront de le dire.

L'idée selon laquelle le Système solaire aurait subi de violents remaniements dans un passé lointain pourrait expliquer beaucoup de choses : l'existence des corps glacés de la ceinture de Kuiper et du nuage d'Oort qui nous entourent, le bombardement ancien des planètes internes par des astéroïdes il y a des milliards d'années et l'absence de superterres que les autres systèmes possèdent en abondance. Mais, désormais, les planétologues doivent compter avec un nouvel élément : une planète putative, environ dix fois plus massive que la Terre, en orbite dans les régions sombres au-delà de Pluton. Si cette planète existe, son influence gravitationnelle expliquerait pourquoi une poignée d'objets de la ceinture de Kuiper parmi les plus lointains décrivent des trajectoires étonnamment resserrées et similaires.

Mais cela pourrait aussi être un indice supplémentaire pour expliquer les changements dramatiques subis par le Système solaire dans sa jeunesse. Avec une distance minimale au Soleil de 30,5 milliards de kilomètres (cinq fois plus loin que la distance moyenne de Pluton), il est peu probable que cette planète massive ait pu se former là où elle se trouve actuellement : il n'y aurait tout simplement pas eu assez de matière pour la constituer. « Si elle existe », dit Harold Levison, théoricien de la formation planétaire au SwRI (Southwest Research Institute), « elle s'est très probablement formée dans une région comprise entre 5 et 20 fois la distance Terre-Soleil et a été expulsée par [des

interactions gravitationnelles avec] Jupiter ou Saturne. »

En effet, Jupiter, en particulier, est si massive, selon Scott Tremaine, de l'Institut d'études avancées de Princeton, qu'« elle ne se soucie pas de savoir si elle éjecte une comète ou une planète de dix masses terrestres ».

Mais une fois éjectée, une planète aurait tendance à poursuivre sa route et à finalement s'échapper dans l'espace interstellaire. La probabilité qu'elle se mette en orbite autour du Soleil est très faible. Statistiquement, explique Harold Levison, il faudrait en avoir 50 ou 100 au départ pour en avoir une à l'arrivée, ce qu'il considère comme improbable.

Si les astronomes parviennent effectivement à détecter la neuvième planète avec leurs télescopes, la question de la probabilité cessera évidemment de se poser. En revanche, les théoriciens devront alors déterminer comment quelque chose d'aussi peu probable a pu se produire. « J'ai dans l'idée », dit Scott Tremaine, « que le processus de dispersion est plus efficace que le modèle standard ne donne à penser. » Autrement dit, un pourcentage plus élevé qu'attendu d'objets expédiés vers l'extérieur parviendrait à rester dans le Système solaire.

D'après Ben Bromley, de l'université de l'Utah, cela pourrait s'expliquer si la dispersion d'une superterre s'est produite très tôt dans l'histoire du Système solaire, avant la dissipation du gaz du disque proto-planétaire qui a formé les planètes. Si la dispersion d'une

superterre s'est produite durant cette période, note Ben Bromley, « la planète aurait interagi avec le gaz et se serait installée à l'écart de tout ».

Ou peut-être, avance Nathan Kaib, théoricien à l'université de l'Oklahoma, la planète, si elle existe, ne provient-elle pas de notre Système solaire. Le Soleil s'est formé non pas dans l'isolement total, mais dans un amas contenant probablement des milliers d'étoiles, chacune (vraisemblablement) avec son propre système planétaire. Certains de ces systèmes auraient subi leurs propres remaniements violents, éjectant des objets de la même façon que le Soleil l'a sans doute fait.

Ces objets, explique Nathan Kaib, peuvent être capturés par notre propre Soleil.

La meilleure explication dépendra des caractéristiques de l'orbite de la neuvième planète ; ses partisans n'ont calculé qu'une plage de possibilités. Si la planète existe, les scientifiques devraient être capables de calculer comment elle est arrivée à sa place actuelle.

La neuvième planète est-elle en accord avec ce que nous savons actuellement des débuts du Système solaire ? La réponse de Scott Tremaine entretient le suspense : « Peut-être. »

– Michael Lemonick
Scientific American



© Ron Miller

de construction planétaire glacé vers la région occupée aujourd'hui par la Terre, l'ensemencement en eau et autres éléments volatils. Ce processus aurait alors privé l'embryon planétaire voisin, la future Mars, de matériau pour poursuivre sa croissance.

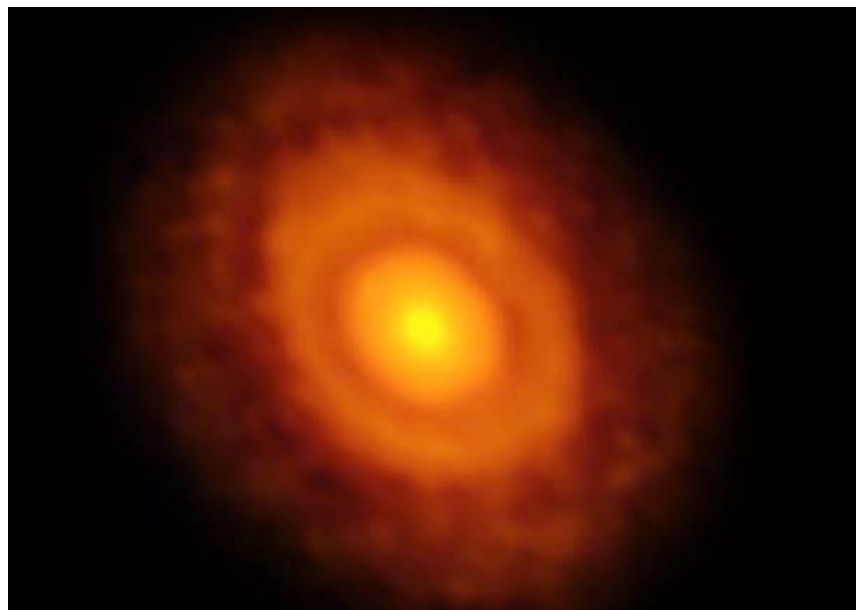
Par ailleurs, des planétésimaux se sont accumulés dans la ceinture principale d'astéroïdes du fait de résonances gravitationnelles avec Jupiter. D'après le modèle, les corps rocheux étaient déjà présents dans cette région tandis que les astéroïdes riches en glace se sont formés au-delà de l'orbite actuelle de Jupiter et se sont implantés dans la ceinture lors de la migration de la planète gazeuse vers l'extérieur.

Le scénario du grand tack semble convaincant. Pourtant, nous ne parvenons pas à faire le lien avec l'autre grand mystère restant du Système solaire, à savoir l'absence totale de planètes en deçà de l'orbite de Mercure. Au regard des autres systèmes, qui ont des superterres sur des orbites serrées, le nôtre donnerait presque l'impression d'avoir été évié. Pourquoi ? Il semble étrange que le Système solaire n'ait pas connu le mode de formation planétaire le plus couramment observé ailleurs dans le cosmos.

En 2015, deux d'entre nous (Konstantin Batygin et Gregory Laughlin) ont étudié quelles seraient les conséquences du grand tack sur un hypothétique cortège de superterres en orbite tout près du Soleil. Notre conclusion est qu'elles n'auraient pas survécu.

En effet, avec son effet chasse-neige alors qu'elle dérivait vers la partie interne du Système solaire, Jupiter aurait perturbé les orbites circulaires et ordonnées des planétésimaux rencontrés en chemin. Elle les aurait expédiés, telle une nuée désordonnée, sur des trajectoires entrecroisées. Certains des planétésimaux seraient entrés violemment en collision et auraient ainsi produit de nombreux débris, entraînant une cascade de nouvelles collisions et fragmentations. La migration de Jupiter vers l'intérieur a vraisemblablement érodé la population de planétésimaux, les réduisant essentiellement à l'état de rochers, cailloux et sable.

Sous l'effet du broyage collisionnel et des frottements avec le gaz du disque protoplanétaire interne, les planétésimaux qui s'érodaient et se fragmentaient ont freiné et se sont donc rapprochés en spirale du Soleil. En tombant, ils auraient été facilement capturés dans des résonances gravitationnelles, s'accumulant dangereusement près



© ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/L. Cieza

LE DISQUE PROTOPLANÉTAIRE de l'étoile V883 Orionis, observé par le radiotélescope ALMA, met en évidence, pour la première fois, la ligne de glace [l'anneau sombre le plus proche du centre] qui sépare la région interne, pauvre en eau, de celle à l'extérieur, où les conditions de température et de pression permettent la formation de glace d'eau.

des trajectoires d'éventuelles superterres primordiales en orbite proche du Soleil.

Cela aurait été une mauvaise nouvelle pour ces planètes, qui auraient été brutalement assaillies par des essaims parasites de débris et auraient perdu progressivement de l'énergie. L'effet net est que les planètes auraient ralenti et changé d'orbite pour amorcer des spirales de chute dans le Soleil. Nos simulations suggèrent qu'aucune de ces planètes hypothétiques n'aurait survécu plus de quelques centaines de milliers d'années après le début de la cascade de collisions.

Une « grande attaque » de Jupiter

Ainsi, il est possible que le grand tack de Jupiter et Saturne ait lancé une véritable « grande attaque » sur une population de planètes primordiales proches du Soleil. Et en disparaissant dans l'étoile, ces anciennes superterres auraient laissé derrière elles une région vide dans la nébuleuse solaire, dans la zone qui s'étend à peu près jusqu'à l'orbite actuelle de Mercure. Par conséquent, l'incursion de Jupiter dans le Système solaire primordial aurait produit un anneau relativement étroit de débris rocheux, à partir duquel les quatre planètes telluriques se sont formées quelques centaines de millions d'années plus tard. L'enchaînement des événements aléatoires nécessaire pour produire une chorégraphie aussi subtile suggère que les petites planètes rocheuses de type tellurique (et peut-être la vie elle-même) seraient assez rares dans le cosmos.

■ BIBLIOGRAPHIE

K. Batygin et M. Brown, **Evidence for a distant giant planet in the solar system**, *Astronomical Journal*, vol. 151, n° 2, 2016.

M. Lemonick, **La longue traque de la planète X**, *Pour la Science*, n° 461, mars 2016.

K. Batygin et G. Laughlin, **Jupiter's decisive role in the inner Solar System's early evolution**, *PNAS*, vol. 112[14], pp. 4214-4217, 2015.

A. Morbidelli, **Dynamical evolution of planetary systems**, dans T. D. Oswalt *et al.* (éd.), *Planets, Stars and Stellar Systems*, vol. 3, pp. 63-109, Springer, 2013.

K. J. Walsh *et al.*, **A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration**, *Nature*, vol. 475, pp. 206-209, 2011.

Quand Jupiter et Saturne ont fini par se frayer le chemin du retour après leur incursion dans le système interne, le disque environnant de gaz et de poussière était sur le déclin. La paire résonante Jupiter-Saturne a fini par rencontrer Uranus et Neptune récemment formées, ainsi peut-être qu'un autre corps de taille similaire. Les interactions avec le gaz aidant, le duo dynamique a enfermé ces géantes plus modestes dans des résonances orbitales.

Ainsi, juste au moment où l'essentiel du gaz du disque disparaissait, la région interne du Système solaire ne comportait probablement qu'un anneau de débris rocheux au voisinage de l'orbite actuelle de la Terre.

Dans la région externe, un groupe compact et résonant d'au moins quatre planètes géantes occupait des orbites presque circulaires, la plus proche se situant à peu près au niveau de l'orbite actuelle de Jupiter et la plus lointaine environ à mi-chemin de l'actuelle orbite de Neptune. Au-delà de l'orbite la plus externe, les planétésimaux glacés du disque externe s'étendaient jusqu'aux confins du Système solaire.

Puis, en plusieurs centaines de millions d'années, les planètes telluriques se sont formées, et les planètes externes jadis agitées se sont assagies, trouvant une stabilité que l'on aurait pu croire définitive. Mais le hasard en a voulu autrement : ce n'était pas encore la phase finale de l'évolution du Système solaire.

Le grand tack et la grande attaque contemporaine ont préparé le terrain à un dernier sursaut de violence interplanétaire dans l'histoire ancienne du Système solaire, une touche finale qui place le cortège planétaire dans une configuration très proche de celle d'aujourd'hui, des milliards d'années plus tard. Ce dernier sursaut est connu sous le nom de grand bombardement tardif. Durant cette période (il y a entre 4,1 et 3,8 milliards d'années), le Système solaire s'est momentanément transformé en stand de tir, théâtre d'un mitraillage permanent par des planétésimaux. Nous en voyons encore aujourd'hui les cicatrices avec les énormes cratères qui criblent la surface de la Lune.

En collaboration avec plusieurs collègues de l'observatoire de la Côte d'Azur à Nice, en 2005, l'un d'entre nous (Alessandro Morbidelli) a conçu le modèle dit de Nice pour expliquer comment les interactions des planètes géantes ont pu produire le grand bombardement tardif. Là où le grand tack prend fin, le modèle de Nice prend la relève.

À la fin du grand tack, les planètes géantes étaient en résonance les unes avec les autres sur des orbites proches et ressentaient aussi les tiraillements gravitationnels des planétésimaux glacés au-delà de leurs orbites. Malgré les résonances, elles étaient en fait en équilibre précaire, au bord de l'instabilité. En cumulant leurs effets sur des millions d'orbites et des centaines de millions d'années, les tiraillements insignifiants des planétésimaux externes ont peu à peu décalé le mouvement des géantes, grignotant lentement le délicat équilibre des résonances qui les liaient. Le point de

Le grand tack de Jupiter et Saturne aurait déclenché la grande attaque, à laquelle d'éventuelles superterres n'auraient pas survécu

basculer correspond au moment où l'une des géantes est sortie de la configuration de résonance avec une autre, détricotant l'équilibre et déclenchant une série chaotique de perturbations qui a légèrement poussé Jupiter vers l'intérieur tout en éparpillant les autres plus à l'extérieur.

Dans un bref intervalle cosmique de quelques millions d'années, le Système solaire externe a ainsi subi une inconfortable transition, passant d'un état ramassé et quasi circulaire à une vaste configuration désordonnée, caractérisée par des planètes qui suivent d'immenses orbites de forte excentricité. Les interactions des planètes géantes étaient si violentes qu'une ou plusieurs d'entre elles ont pu être dispersées, éjectées vers l'espace interstellaire.

Si l'évolution dynamique s'était arrêtée là, l'architecture du Système solaire externe aurait bien reproduit les tendances observées avec les exoplanètes géantes, dont beaucoup décrivent des orbites excentriques autour de leur étoile. Mais le disque de planétésimaux glacés qui était à l'origine du désordre a aussi contribué à le supprimer par ses interactions ultérieures avec les orbites excentriques des planètes géantes. Un à un, la plupart des planétésimaux en orbite proche ont été éjectés par Jupiter et les autres planètes géantes, ce qui a progressivement ponctionné de l'énergie orbitale des planètes et rendu à nouveau circulaires leurs orbites. Une partie des planétésimaux

ont donné lieu au grand bombardement tardif, d'autres ont été éjectés au-delà de la portée gravitationnelle du Soleil et une petite fraction d'entre eux se sont maintenus sur des orbites liées, formant l'anneau de débris glacés situé aujourd'hui au-delà de l'orbite de Neptune, la ceinture de Kuiper.

Des travaux d'observation patients nous révèlent petit à petit la structure complète de la ceinture de Kuiper, et des caractéristiques inattendues se dévoilent peu à peu. En particulier, les astronomes ont repéré un motif particulier parmi les objets les plus lointains de la ceinture de Kuiper. Malgré des distances au Soleil variées, les orbites de ces objets sont regroupées dans une certaine région, comme s'ils étaient tous soumis à une même perturbation de grande ampleur.

Des simulations numériques effectuées par Konstantin Batygin et Michael Brown, de l'Institut de technologie de Californie, ont montré que cette situation se produit naturellement s'il existe une neuvième planète, une dizaine de fois plus massive que la Terre et évoluant sur une orbite très excentrique autour du Soleil, avec une période d'environ 20000 ans. Une telle planète a peu de chances de s'être formée si loin, mais on peut en rendre compte si l'on suppose qu'il s'agit d'une exilée, éjectée d'une orbite plus rapprochée dans l'enfance du Système solaire (voir l'encadré pages 25-27).

À la recherche de la neuvième planète

Si l'existence de cette planète autour du Soleil était confirmée, cela resserrerait fortement les contraintes de notre vision du Système solaire. En ce moment même, les astronomes se préparent à mettre à contribution certains des plus grands télescopes afin de rechercher activement cette hypothétique planète.

L'histoire du Système solaire qui s'esquisse ainsi, avec les restructurations parfois brutales du grand tack, de la grande attaque et du modèle de Nice, et l'existence soupçonnée d'une planète supplémentaire, promet de devenir l'une des plus belles réussites de la science moderne, et sans contester l'une des plus belles histoires qui puissent jamais être contées. ■



LES RAYURES NOIRES ornant la robe d'un tigre constituent une sorte de code-barres, qui permet d'identifier l'individu de façon certaine.

Mieux recenser les tigres pour les sauver

Ullas Karanth

Les techniques de suivi des populations de tigres ont connu de grands progrès au cours des dernières années. Encore faut-il que les organismes chargés de la protection du grand félin asiatique les appliquent.

Le grand félin *Panthera tigris* rôde dans le Malnad – le « Pays des pluies ». Quand j'étais écolier dans cette zone de collines boisées de l'État du Karnataka, au sud-ouest de l'Inde, le tigre me fascinait, mais je n'en avais jamais vu. Les nombreux rituels hindous figurant ce grand fauve alimentaient ma fascination. Au cours du grand festival d'automne, le Dasara, des danseurs interprétaient par exemple le *hulivasha*, la danse rituelle du tigre. Le corps peint de motifs ocre, blancs et noirs, ils imitaient au rythme des battements de tambours les gracieux mouvements du félin, célébrant ainsi une tradition propre au Karnataka. Pour autant, l'avenir du tigre était sombre : tandis qu'éleveurs de bétail et chasseurs tuaient les derniers tigres sauvages, les bûcherons abattaient sans relâche les arbres des forêts afin d'en tirer du bois de construction. À tel point qu'une fois adolescent, dans les années 1960, j'ai abandonné tout espoir de voir un jour de mes propres yeux un tigre sauvage.

Quelques années plus tard, cependant, un événement inattendu se produisit : en réponse aux pressions grandissantes des partisans de la protection de l'environnement, Indira Gandhi, notre Première ministre de l'époque, fit voter des lois strictes. Plusieurs réserves naturelles furent établies. Dans

L'ESSENTIEL

- Aujourd'hui, l'aire de répartition des tigres ne représente plus que 7 % de sa surface historique.
- La survie du tigre, *Panthera tigris*, repose sur une cinquantaine de populations concentrées, qu'il faut suivre en permanence et protéger.
- Toutefois, de nombreux organismes de protection comptent leurs tigres par des méthodes désuètes, qui ne produisent pas de résultats dignes de confiance.
- L'exploitation statistique et systématique des images enregistrées par des pièges photographiques fournit des estimations plus fiables, à même d'orienter les actions.

les décennies qui suivirent, la protection du tigre prit de l'ampleur. De nombreux pays en interdirent la chasse. Ils tentèrent de concilier le besoin qu'ont les tigres de disposer de vastes espaces forestiers et la pression humaine sur cet habitat. L'Inde a fait mieux que la plupart des autres nations concernées : bien que son territoire n'englobe que 20 % de l'habitat résiduel de *P. tigris*, 70 % des tigres du monde y vivent. Étant donné les pressions exercées dans ce pays par ses 1,2 milliard d'habitants, la pauvreté persistante et le développement de l'activité industrielle, ce n'est pas un mince exploit.

L'habitat des tigres s'est réduit de 93 %

En dépit de tous ces efforts, les populations de tigres n'ont cessé de décliner à travers l'Asie. Il y a seulement deux siècles, la zone habitée par les tigres sauvages s'étendait des roselières de la mer Caspienne aux forêts tropicales humides d'Indonésie, en passant par la taïga sibérienne. Aujourd'hui, cet immense espace a perdu 93 % de sa surface. Seules quelques populations isolées persistent au sein d'une poignée de pays. Et les seules qui ont des chances raisonnables de redressement n'occupent que 0,5 % de l'aire de répartition initiale du tigre.