

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 ?

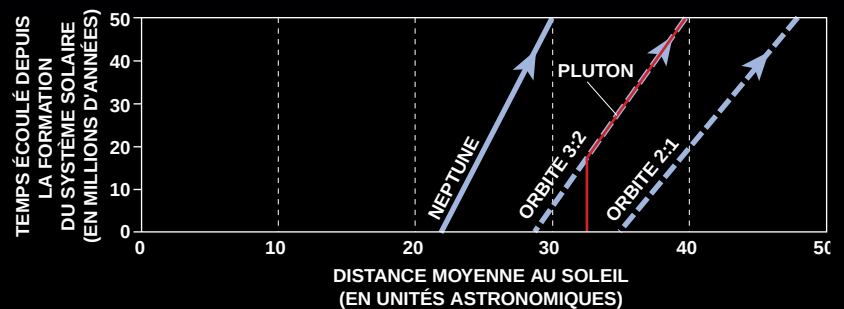
Jusqu'à ces dernières années, les seuls objets planétaires connus au-delà de Neptune étaient Pluton et son satellite, Charon. D'ailleurs, pour les théories dominantes de l'origine du Système

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).



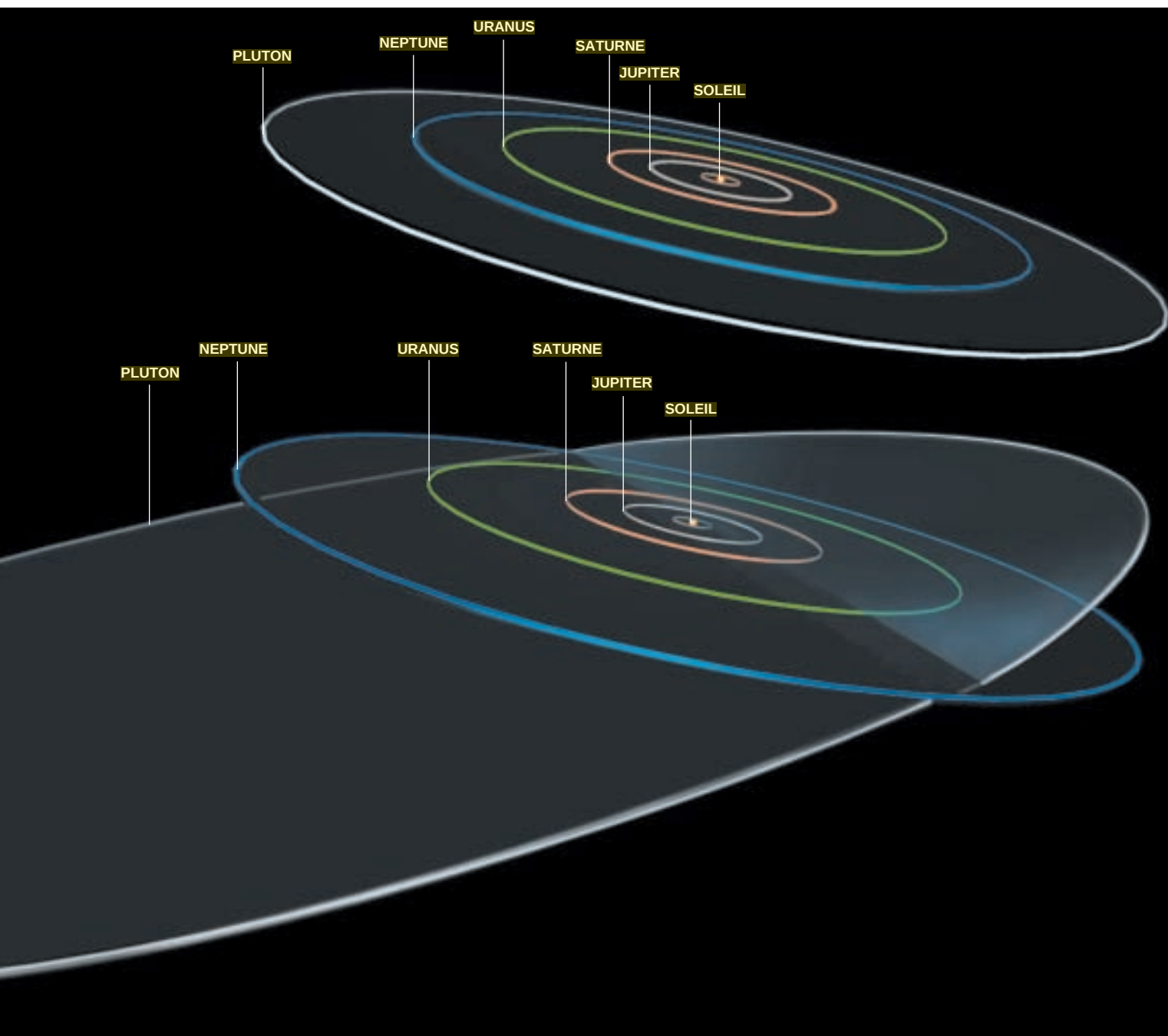
2. LA MIGRATION PLANÉTAIRE est illustrée par ces deux représentations du Système solaire, la première au moment de la formation des planètes (*en haut, à droite*), la seconde aujourd'hui (*en bas à droite*). On pense que l'orbite de Jupiter a légèrement rétréci, tandis que les orbites de Saturne, d'Uranus 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.

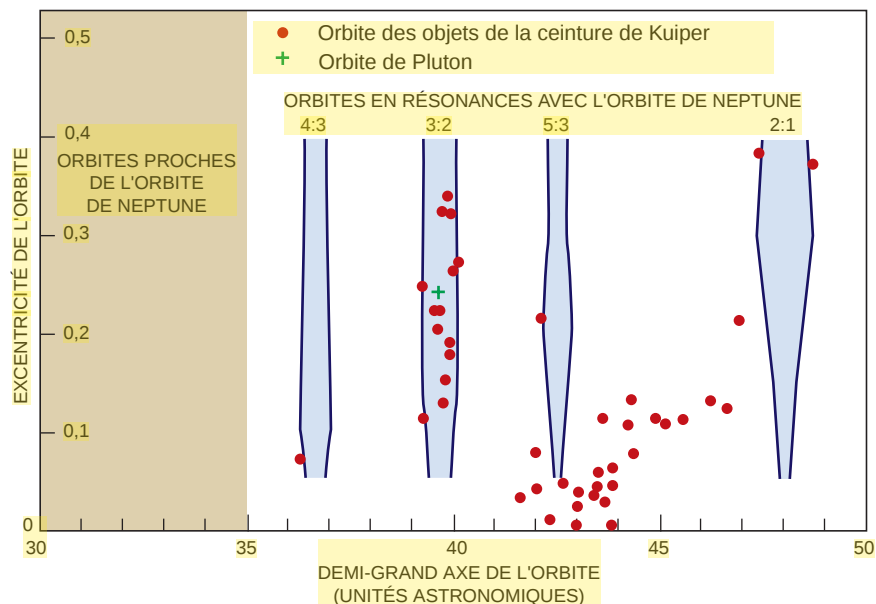
Or, l'orbite de Pluton, bien qu'elle croise celle de Neptune, est protégée d'un trop grand rapprochement avec la géante gazeuse par un mécanisme de résonance : Pluton effectue deux révolutions autour du Soleil quand Neptune en fait trois ; on dit que l'orbite de Pluton est en résonance 3:2 avec l'orbite 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

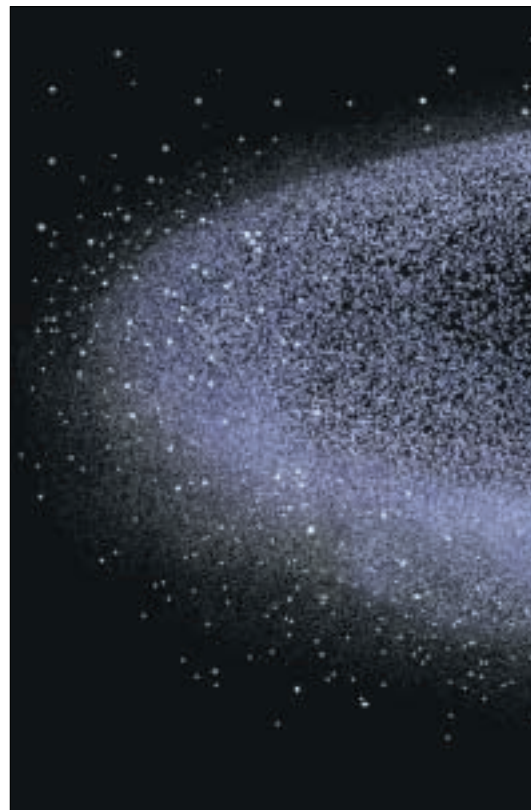
du Soleil) est toujours très au-dessus du plan de l'orbite de Neptune, ce qui garantit la stabilité orbitale à long terme de Pluton. Des simulations des mouvements orbitaux des planètes externes, tenant compte des effets de leurs perturbations mutuelles, indiquent que cette relation entre les orbites 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