

# Pluton et les objets transneptuniens : les nouvelles frontières du Système Solaire

**Emmanuel Lellouch**  
**Observatoire de Paris**

La décennie 1990 a vu la découverte d'une nouvelle catégorie d'objets dans le Système Solaire. En 1992, les astronomes David Jewitt et Lane Luu de l'Université d'Hawaii détectèrent un objet, baptisé 1992 QB1, à 41.2 Unités Astronomiques (UA) du Soleil, donc plus loin que Pluton – qui se trouve actuellement à environ 31 UA. La découverte de cet objet extrêmement ténu (de magnitude 23.5, soit environ 1500 fois moins lumineux que Pluton) fut suivie dans les années suivantes de centaines de découvertes semblables – on compte à ce jour près de 1000 objets – ce qui permet d'affirmer qu'il existe toute une population de petits corps au delà de l'orbite de Neptune : les objets transneptuniens, appelés aussi les « objets de la ceinture de Kuiper » en l'honneur de celui qui dès 1952 avait postulé son existence. Cette famille d'objets a une importance particulière dans notre compréhension de l'origine du Système Solaire car ils représentent probablement les débris de la formation planétaire, et d'autre part, de part leur très grande distance au Soleil, ils ont sans doute subi moins d'évolution que les objets plus internes comme les planètes et la ceinture d'astéroïdes située vers 3 UA. L'existence de cette cohorte d'objets prouve que le Système Solaire extérieur est beaucoup plus riche qu'on ne le pensait auparavant (Fig. 1). En particulier, l'« anomalie » représentée par Pluton, petit corps rocheux isolé au-delà des planètes géantes, est mise dans une perspective complètement nouvelle.

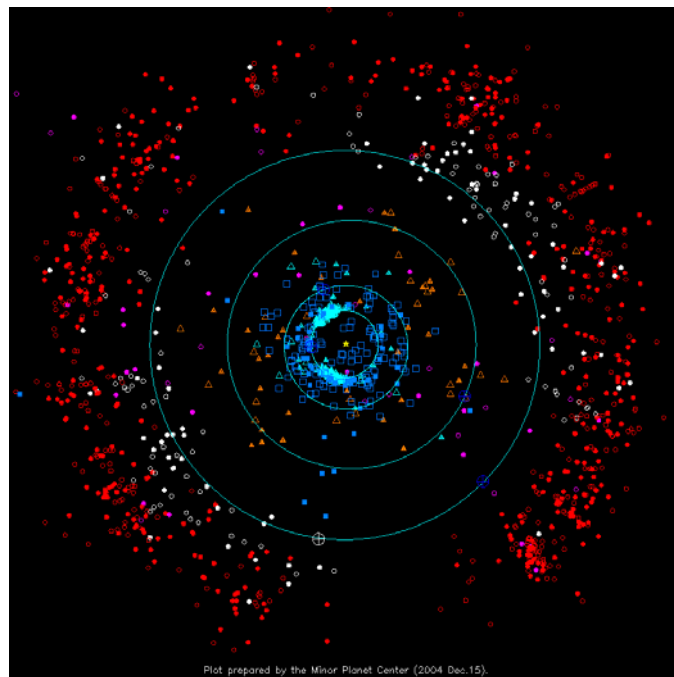


Fig.1. Un « instantané » du Système Solaire extérieur à une date particulière (15 Dec. 2004). Les cercles figurent les orbites des planètes géantes. Chacun des points représente soit un objet « transneptunien », soit un objet apparenté (Centaures, comètes)

Les objets observés à ce jour ne représentent encore que la fraction émergée de l'iceberg. On estime ainsi qu'il y aurait environ 40000 objets de plus de 100 km entre 30 et 50 UA, environ 1 milliard d'objets de taille « cométaire » (1-10 km) et peut-être 1 objet de la taille de Pluton.

### Propriétés orbitales

Si la physique de ces objets reste encore très mal connue, eu égard à la difficulté de caractériser physiquement des corps aussi faibles, notre compréhension de leurs propriétés orbitales et dynamiques a au contraire fait des progrès spectaculaires ces 13 dernières années. On sait ainsi qu'on peut classifier les objets transneptuniens (TNO) en trois ou quatre catégories dynamiques, selon les propriétés de leurs orbites. On distingue ainsi (i) les objets « classiques », qui tournent sur des orbites circulaires ou peu elliptiques, avec des distances moyennes au Soleil comprises entre 40 et 48 UA (ii) les objets « résonnants » : ces objets sont en résonance avec Neptune, au sens où leur période de révolution orbitale est commensurable à celle de Neptune. Une sous-catégorie est constituée par les « Plutinos » (i.e. « petits Plutons ») qui comme Pluton, sont en résonance 3:2 avec Neptune, c'est-à-dire qu'ils effectuent 2 révolutions autour du Soleil pendant que Neptune en fait 3. Ces objets ont des excentricités notables (0.1-0.3, 0.25 pour Pluton) et des inclinaisons parfois importantes par rapport au plan de l'écliptique (jusqu'à 20°, 17° pour Pluton – cf. Fig.2) (iii) les objets « diffusés », qui se caractérisent par des orbites très elliptiques (excentricité > 0.5), de type quasi « cométaires », et souvent très inclinées. Ces objets ont des orbites qui les amènent jusque dans la région des planètes géantes, mais qui s'étendent aussi jusqu'à des centaines d'unités astronomiques (iv) enfin, quelques objets du disque diffusé ont des propriétés orbitales si extrêmes qu'on peut considérer qu'ils forment une famille à part : il s'agit de corps qui sont tellement éloignés du Soleil qu'ils ne s'approchent même pas des planètes géantes. Le prototype en est Sedna (nom officiel de l'objet initialement désigné par 2003 VB12, dont la distance au Soleil, actuellement de 90 UA, l'amène à des distances variant entre 76 et 943 UA sur une période de 11600 ans !

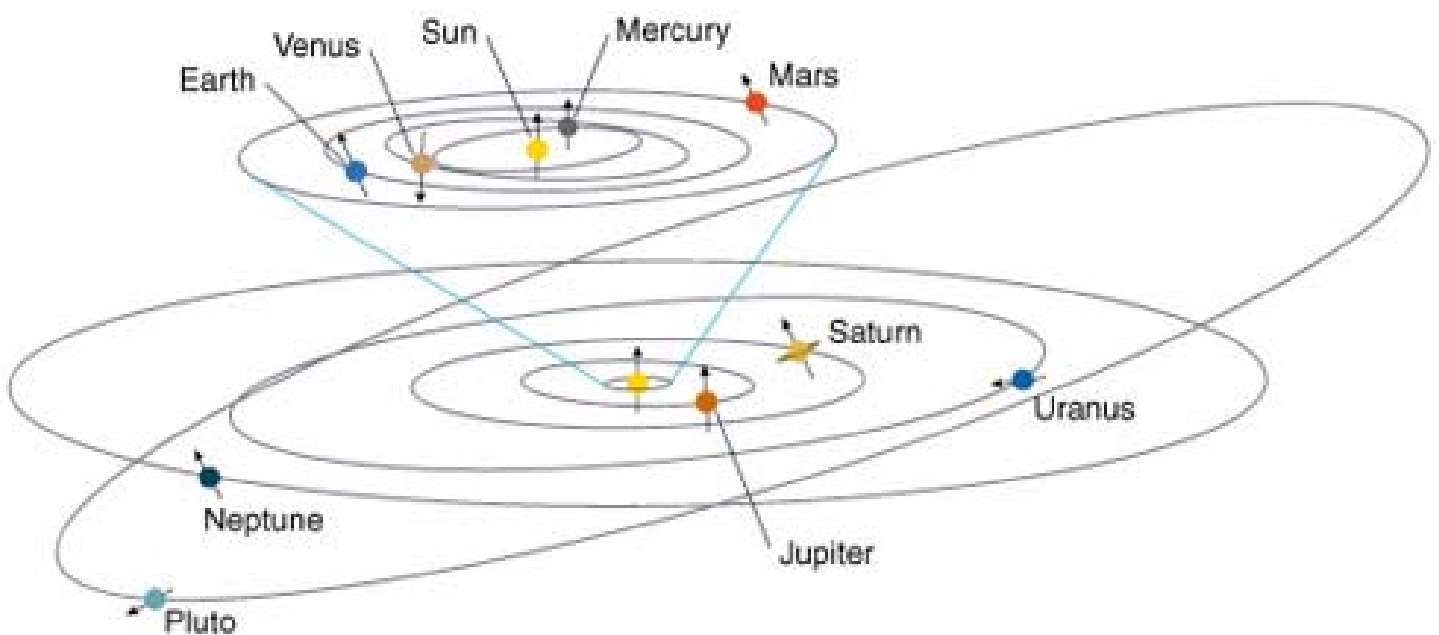


Fig. 2. Les orbites des 9 planètes autour du Soleil. L'orbite de Pluton est fortement inclinée.

A cette description, il faut encore ajouter deux familles d'objets apparentées. Les Centaures sont des objets intermédiaires « croisant » au voisinage des planètes géantes. Leurs orbites sont assez elliptiques et ont des demi-grands axes compris entre 5 et 30 UA. Ces orbites sont peu stables – elles ne se maintiennent sur guère plus de quelques millions d'années. Certains de ces objets montrent des signes d'activité cométaire. Ces Centaures, qui proviendraient de perturbations dynamiques sur les objets de la Ceinture de Kuiper, seraient eux-mêmes la source de certaines comètes à courte période, en particulier les comètes dites de la famille de Jupiter (comètes peu inclinées sur l'écliptique et de périodes de 5 à 20 ans).

La représentation des trajectoires des TNO dans un diagramme demi-grand axe – excentricité fait clairement apparaître les différents types d'objets. La Fig. 3a représente un tel diagramme pour des demi-grands axes inférieurs à 50 UA. On y aperçoit clairement les objets résonnants. La résonance 3:2 est particulièrement peuplée, et certains objets y atteignent des excentricités très importantes, mais d'autres résonances sont également occupées. Les objets classiques ont également bien visibles à 40-48 UA, avec peu d'excentricité. Les objets diffusés, eux, ne sont visibles que si l'on considère des valeurs plus élevées du demi-grand axe, comme cela est montré sur la Fig. 3b. On voit alors que les seuls objets pouvant avoir un demi-grand axe élevé sont ceux qui ont aussi une très forte excentricité. Autrement dit, il n'existe pas d'objets sur des orbites circulaires à des distances supérieures à 50 UA. Cette « troncature du disque » est une contrainte très significative pour notre compréhension de la formation de la Ceinture de Kuiper.

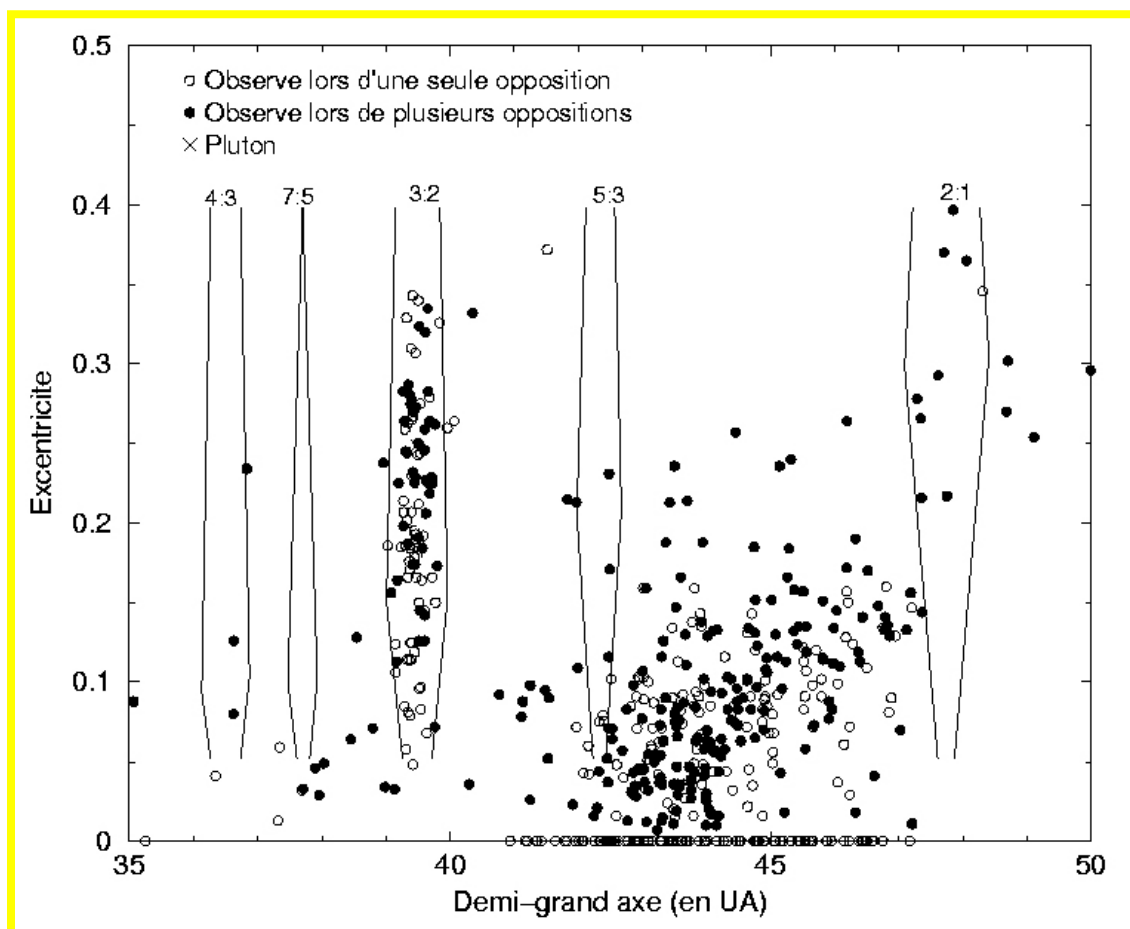


Fig. 3a. Les orbites des TNO dans un diagramme demi-grand axe excentricité, jusqu'à 50 AU

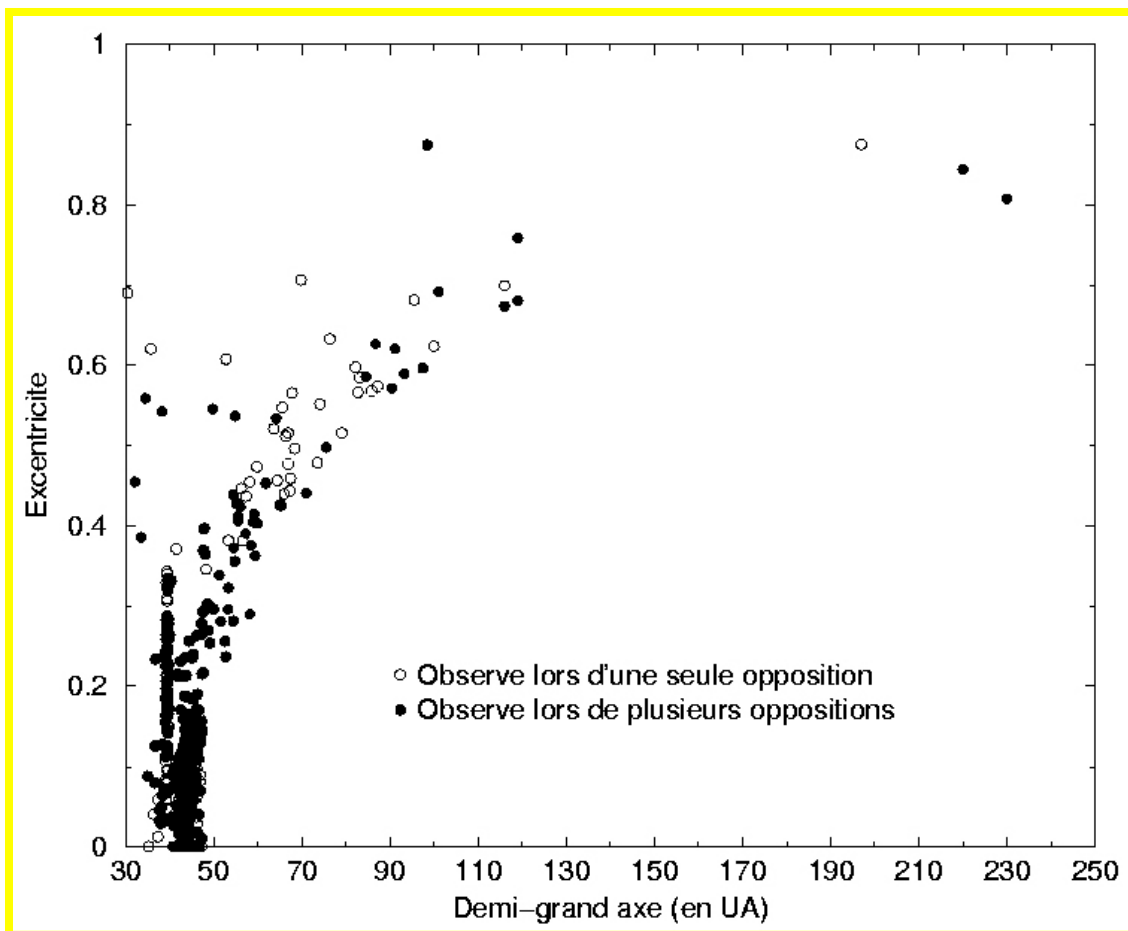


Fig. 3b. Les orbites des TNO dans un diagramme demi-grand axe excentricité, jusqu'à 250 AU. Le disque diffusé apparaît. Les objets « très diffusés » comme Sedna (demi-grand axe = 509 UA, excentricité = 0.85) seraient repoussés très loin à droite du diagramme

Comme on l'a dit, la masse totale estimée pour la ceinture de Kuiper n'est que de quelques dixièmes de masse terrestre. C'est en fait très peu et conduit à une densité de masse beaucoup plus faible qu'au niveau des planètes géantes, ce qu'on ne comprend pas bien selon l'idée qu'on se fait d'une nébuleuse protoplanétaire dont la densité décroissait régulièrement avec la distance au Soleil. Ceci, plus le fait qu'une telle densité est trop faible pour conduire à la formation d'objets dont certains atteignent le millier de kilomètres, nous laisse penser que la ceinture de Kuiper était bien plus massive dans le passé, peut-être d'un facteur 100. On pense que deux types de mécanismes ont pu conduire à une telle « érosion » : les perturbations gravitationnelles de Neptune et les collisions entre objets. Bien qu'il subsiste de considérables incertitudes, un scénario possible de formation et de structuration de la ceinture de Kuiper est le suivant (Fig. 4). Les objets trans-neptuniens se forment à partir d'un disque initialement dense au voisinage des planètes géantes. La « migration » des planètes, c'est-à-dire la variation de leur distance au Soleil au cours de leur histoire, a ensuite fortement perturbé la distribution des TNO, notamment ceux qui se sont formés « à l'intérieur » de l'orbite de Neptune. Ceux-ci, bousculés par le déplacement vers l'extérieur d'Uranus et Neptune, ont du être diffusés un peu dans toutes les directions. Certains se sont retrouvés au-delà de Neptune sur des orbites assez excentriques et inclinées. D'autres ont été carrément éjectés aux confins du Système Solaire, soit directement, soit via un passage par Jupiter. Ils peuvent actuellement contribuer à ce grand réservoir de comètes qu'est le nuage de Oort à 40.000-100.000 UA du Soleil. Les objets formés « à l'extérieur » de l'orbite de Neptune ont subi un sort moins violent, le déplacement progressif de Neptune les ayant simplement poussés vers l'extérieur et « capturés » dans les résonances. Enfin, la « troncature du disque » s'interprète soit comme

la fin de l'influence gravitationnelle de Neptune, soit comme l'effet d'une perturbation extérieure : le passage d'une étoile vers 800 UA aurait éjecté les objets se trouvant au-delà de 30 UA, le bord du disque se déplaçant ensuite vers l'extérieur avec la migration de Neptune. Certains se retrouvent actuellement sur des orbites hors d'influence gravitationnelle de Neptune, comme c'est le cas de Sedna.

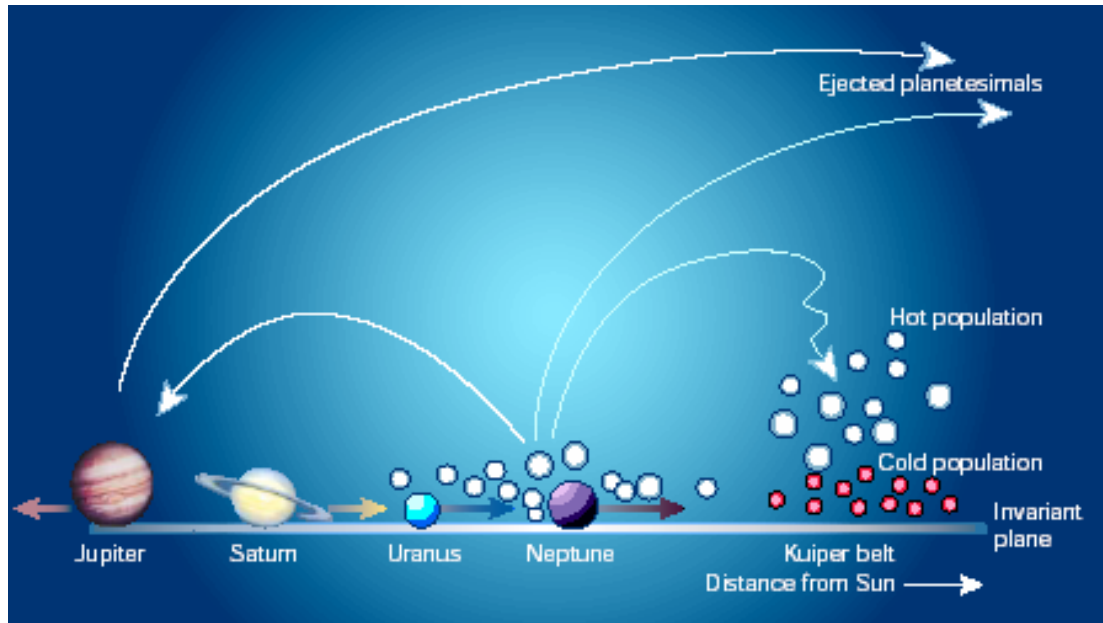


Fig. 4. Un scénario possible de formation de la ceinture de Kuiper

### La physique des objets transneptuniens

Caractériser physiquement un objet nouvellement découvert signifie être capable de répondre à des questions simples telles que : quelle est sa taille, sa forme, son aspect visuel, sa « couleur » ? De quoi se compose sa surface ? Quelle est sa température ? A-t-il une atmosphère, des satellites ? Dans la plupart des cas (et sauf dans le cas de Pluton, le plus gros et le mieux connu des TNO), ces questions sont encore sans réponse. Néanmoins, les premiers éléments se mettent en place, et il est assez intéressant de constater que les progrès actuels suivent, avec quelques décennies de décalage, ceux réalisés sur Pluton entre 1950 et 1990.

La question la plus fondamentale, celle de la taille des objets, est l'une des plus difficile à trancher. Sauf dans le cas exceptionnel où l'objet est assez gros pour qu'on puisse directement mesurer sa taille (Quaoar a ainsi un diamètre de 1200 km), le problème est que la mesure de la luminosité de l'objet ne suffit pas à déterminer sa taille en raison de l'ambiguïté liée au caractère plus ou moins réfléchissant de sa surface (son « albédo »). Ainsi il est instructif de noter que le diamètre de Pluton, initialement estimé à 4000 à 12000 km, n'est en réalité que de 2400 km. La solution à ce problème est de mesurer à la fois la brillance visible et le flux thermique de l'objet, ce qui fournit à la fois le diamètre, l'albédo et la température moyenne de l'objet. Très peu de TNO (seuls les plus gros et les plus proches) ont pu être mesurés de cette façon, avec des diamètres de 600 à 1200 km environ. Les plus gros TNO connus à ce jour auraient donc la taille du satellite de Pluton, Charon.

Il est en revanche facile de prouver que la surface des objets de Kuiper est non-uniforme, et que ces objets tournent sur eux-mêmes rapidement (périodes de rotation de l'ordre de 10 heures). Ceci est prouvé par l'existence des « courbes de lumière », ou luminosité de l'objet

en fonction du temps, qui montrent des variations régulières. Celles-ci indiquent soit que l'objet n'est pas sphérique, soit qu'il présente des taches d'albédo, avec des régions sombres et des régions brillantes (Fig. 5).

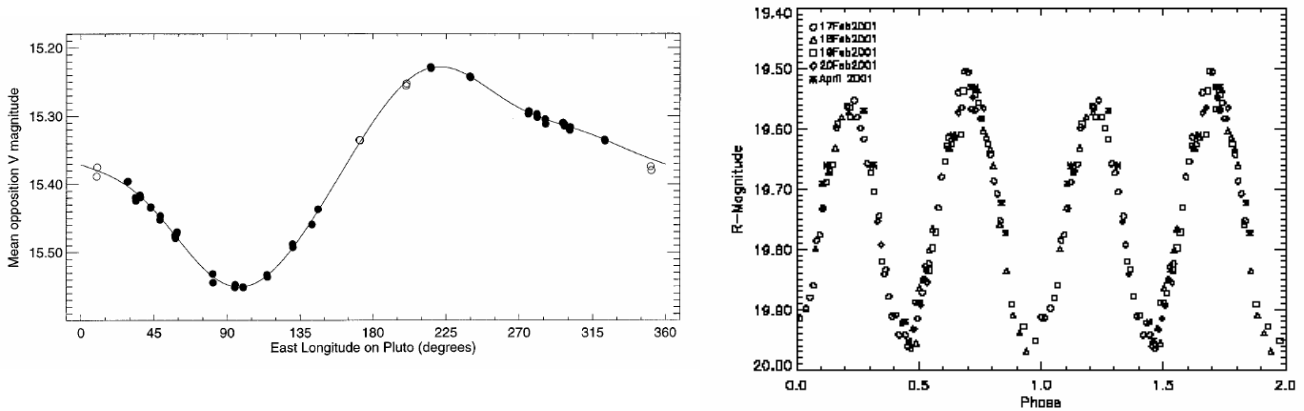


Fig. 5. La « courbe de lumière » de Pluton (à gauche), de période 6.4 jours, et celle de Varuna (à droite), de période 6.3 heures. La courbe de Pluton est due à des taches d'albédo. Celle de Varuna serait due à une forme allongée de l'objet, ce qui est surprenant compte tenu de la grande taille de l'objet (640 km).

Un résultat majeur obtenu dans les cinq dernières années est l'existence d'un nombre déjà assez important (typiquement une dizaine) de TNO possédant des satellites. On connaît depuis 1978 l'existence de Charon. Le couple Pluton-Charon était considéré comme unique dans le Système Solaire, en ce sens que 1) les deux corps se présentent mutuellement toujours la même face 2) la rapport des masses entre les 2 corps n'est que de 8 à 1. Notons au passage que la découverte de Charon en 1978 fut par chance suivie d'une période d'éclipses mutuelles des deux objets (entre 1985 et 1990) qui permirent de réaliser les premières cartes d'albédo de Pluton. Pour les objets transneptuniens, le premier système pour lequel on découvrit un satellite est 1998 WW31 (Fig. 6). Le rapport des masses entre le primaire et le secondaire est estimé à 2 :1. On peut donc véritablement parler de système double !

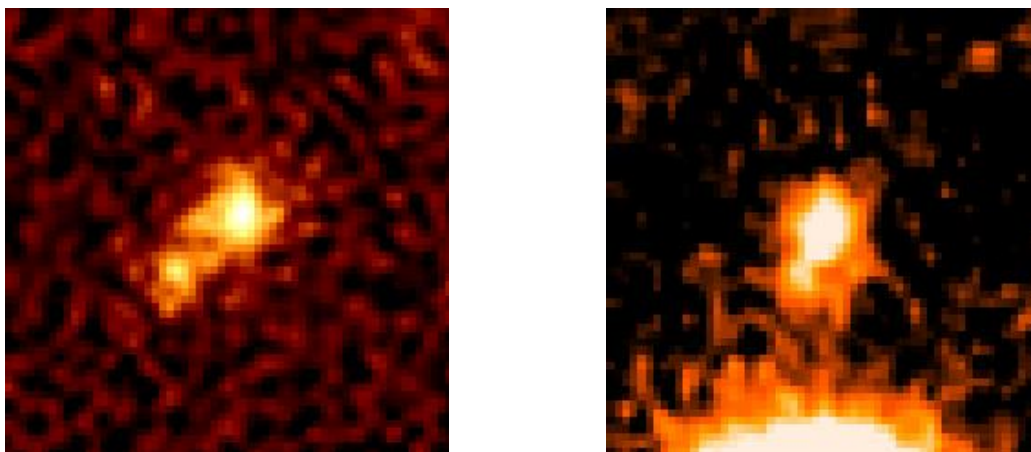


Fig. 6. La découverte du satellite de l'objet 1998 WW31. Les deux clichés ont été obtenus le 23 et le 6 décembre 2000. On voit clairement que l'orientation de l'objet secondaire par rapport au primaire a changé, ce qui prouve que les deux corps tournent l'un autour de l'autre. La tache brillante en bas du second cliché est une étoile de champ .

Compte tenu des biais observationnels et des difficultés de détection, on estime qu'environ 15 % des TNO auraient des satellites.

Un autre sujet de recherches important concerne les couleurs de ces objets. La « couleur » est ici définie de manière générale comme un rapport de réflectivités à deux longueurs d'onde. On constate qu'il existe dans la ceinture de Kuiper une plus grande diversité de couleurs que dans les autres familles d'objets du Système Solaire, par exemple la ceinture principale d'astéroïdes ou les noyaux cométaires. Certains TNO sont neutres – ils ont la même couleur que le Soleil, d'autres sont aussi rouges que Mars. Un gros effort vise actuellement à essayer de corréliser les couleurs aux propriétés orbitales des objets. La tendance la plus claire semble apparaître au sein des TNO « classiques » : les objets d'inclinaison orbitale plus élevée sont plutôt plus neutres, ceux d'inclinaison plus faible sont plutôt plus rouges. On pense que la diversité de couleur reflète la compétition entre différents processus d'évolution, et non des différences intrinsèques : en effet des processus tels que l'irradiation des surfaces par des particules énergétiques tendent à rougir et assombrir les surfaces. En revanche, les collisions entre objets et l'activité cométaire tendent à exposer du matériau interne frais et plus neutre.

A l'exception de Pluton (Fig. 7), pour lequel les spectres infrarouges montrent clairement la présence de plusieurs glaces en surface ( $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ), la composition de surface des objets transneptuniens reste très mal connue, en raison de la difficulté extrême d'obtenir des spectres diagnostics de qualité suffisante. Seul Quaoar semble montrer clairement la signature de la glace cristalline (Fig. 8), un résultat particulièrement intéressant qui indique que l'objet a subi un épisode de réchauffement après sa formation.

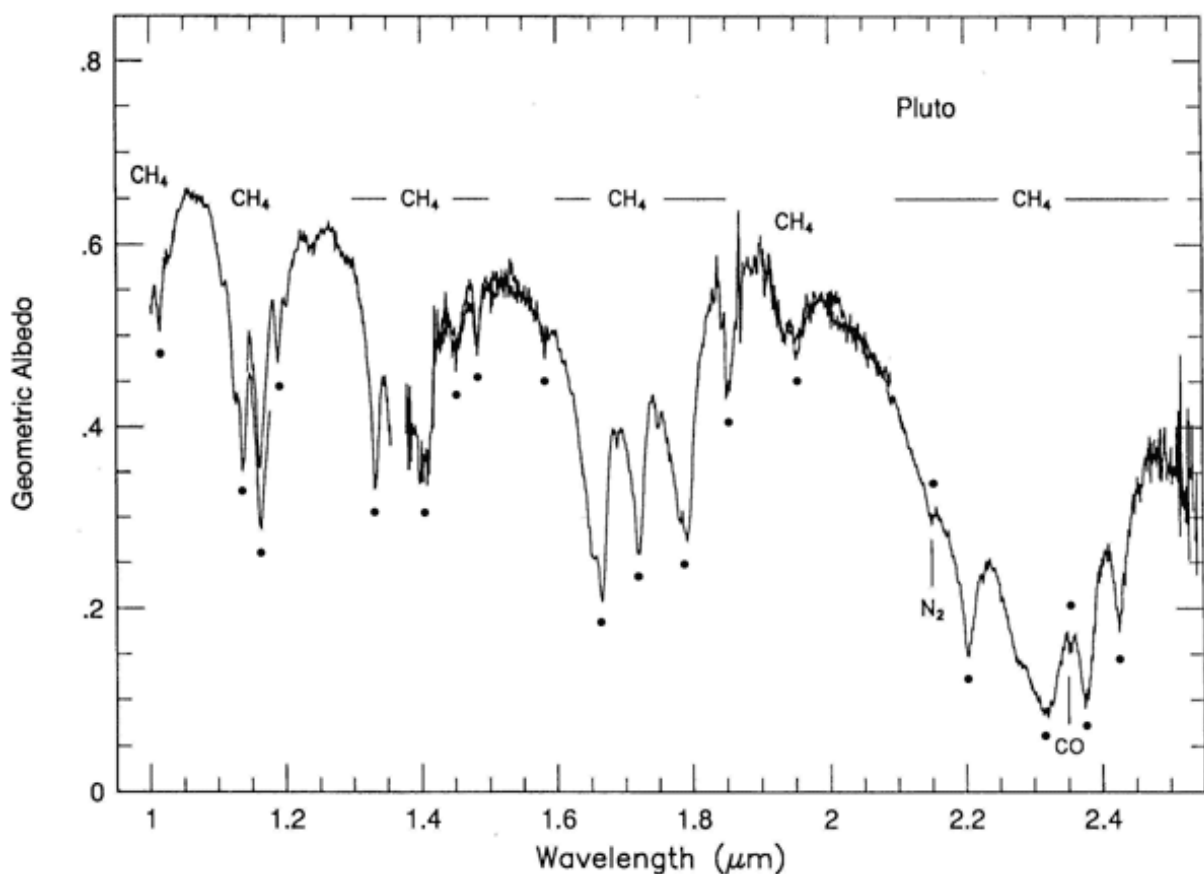


Fig. 7. Le spectre infrarouge de Pluton, montrant la présence de glaces de méthane, azote, monoxyde de carbone en surface. La glace d'eau est également détectée.



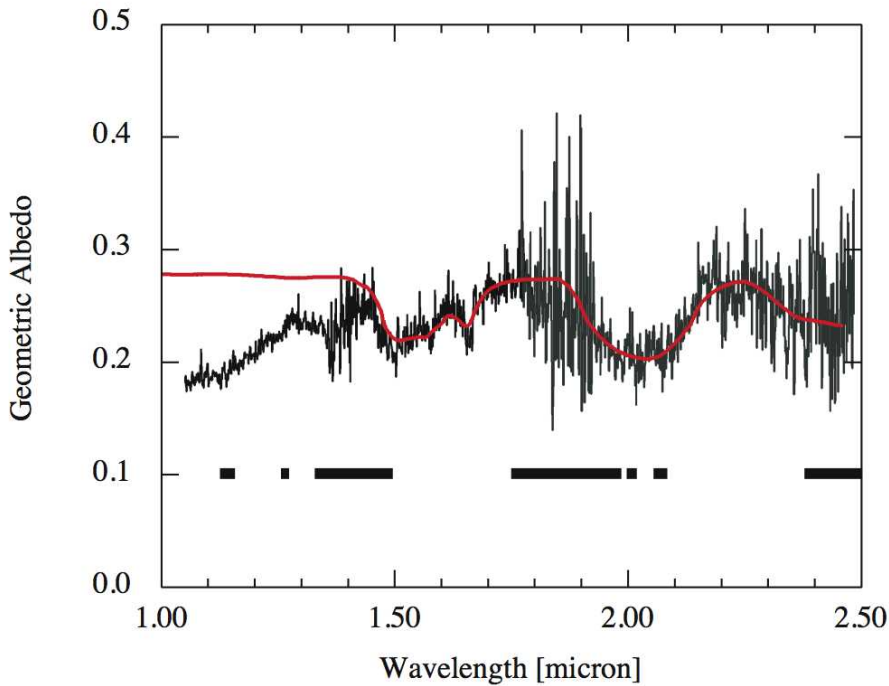


Fig. 8. Le spectre de Quaoar, montrant les bandes d'absorption de la glace d'eau cristalline.

On en sait encore moins sur la présence possible d'atmosphères autour de ces objets. Notons cependant que le scénario est a priori peu probable compte tenu du faible champ de gravité de ces petits corps. Seul Pluton possède une atmosphère ténue, de pression environ 5 microbar, découverte par occultation stellaire (passage d'une étoile derrière la planète, dont les couches atmosphériques réfractent peu à peu le signal stellaire). Cette atmosphère d'azote est en équilibre avec la glace en surface. De manière assez étonnante, alors que Pluton est en train de s'éloigner du Soleil, on a observé que la pression au sol a augmenté ces 15 dernières années, alors qu'on pensait que le refroidissement conduirait au contraire à la condensation de l'atmosphère au sol.

On espère apprendre beaucoup plus sur ces objets grâce à la mission New Horizons de la NASA. Cette mission doit être lancée en janvier 2006, et rejoindre le couple Pluton-Charon en 2016. Par la suite, elle doit effectuer le survol d'un ou plusieurs objets transneptuniens (qui restent à définir) entre 2016 et 2020. La sonde sera munie d'un système de caméras, d'un spectromètre infrarouge et d'un spectromètre ultraviolet. Les observations du système Pluton-Charon seront nécessairement limitées à un passage rapproché (une capture en orbite n'est pas envisageable) et dureront une centaine de jours.

Il apparaît que la découverte de la ceinture de Kuiper a remis le cas de Pluton complètement en perspective. Il est tout aussi clair que au moins du point de vue dynamique, Pluton est fortement relié aux objets transneptuniens. Même si on sait trop peu de choses encore sur la physique des objets de Kuiper, et comment elle se compare à celle de Pluton, on considère maintenant que Pluton et Charon « font partie de la famille ». Toutefois, cela ne signifie pas nécessairement que le statut de planète de Pluton doit être remis en cause et l'Union Astronomique Internationale n'a pas pris de décision à cet égard. Ceci doit plutôt nous amener à nous interroger sur la notion de planète : une définition « objective » est-elle



possible, et y a-t-il, au-delà des 9 planètes bien connues, des objets que l'on devrait alors légitimement qualifier de planète ? Nous aborderons le débat.

### **Quelques références :**

#### **Sites web :**

<http://jmm.free.fr> , et suivre les liens vers les différents objets. Très bon site en français

[www.cfa.hawaii.edu/users/jewitt/kb.html](http://www.cfa.hawaii.edu/users/jewitt/kb.html). The site de David Jewitt. Excellent, le plus complet

<http://pluto.jhuapl.edu>. Le site de la mission New Horizons. Excellent, important matériel d' « éducation »

<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/Unusual.html>. Le site de l'IAU, pour la liste à jour des objets

[www.spacedaily.com/news/outerplanets\\_04b.html](http://www.spacedaily.com/news/outerplanets_04b.html). Pour un avis autorisé (A. Stern) sur la notion de planète. Accessible aussi à partir du site de la mission New Horizons.

#### **Article :**

Les objets de Kuiper , par C. de Bergh et J. Romon. L'Astronomie, no 115 (Janvier 2001)

#### **Livres :**

Pluto and Charon : ice world on the ragged edge of the Solar System, de A. Stern et J. Mitton

Beyond Pluto, de J. Davies