
Bulletin de l'Union des Physiciens

Association des professeurs de Physique et de Chimie

Histoire de la découverte du système solaire *II - Dynamique*^{*}

par Jean SIVARDIÈRE
CEA - Département de Recherche Fondamentale
sur la Matière Condensée - SPSMS
38054 Grenoble Cedex 9

Dans un premier article (I), nous avons décrit la découverte progressive des propriétés géométriques et cinématiques du système solaire. Dans cette deuxième partie, nous abordons la découverte de ses propriétés dynamiques, qui débute avec Newton, et les développements de la mécanique céleste.

1. DE NEWTON A CAVENDISH

1.1. La gravitation universelle

Les Grecs et Copernic ne s'intéressaient qu'à la géométrie et à la cinématique des mouvements planétaires. Allant au-delà des travaux de Galilée, Descartes, Huygens et Hooke (1635-1703) [1], Newton (1642-

* N.D.L.R. : La première partie de cet article (I - Géométrie et cinématique) a été publiée dans le B.U.P. n° 773 - avril 1995.

1727) énonça en 1687 les trois lois de la dynamique et les utilisa pour démontrer, à partir des trois lois empiriques de Képler, que le mouvement des planètes est dû à la force de gravitation s'exerçant entre deux corps et variant en $1/r^2$ en fonction de leur distance r : cette variation avait déjà été suggérée par Hooke, Halley et Huygens. La réciproque fut démontrée en 1710 par Jacob Herman (1668-1733), un élève remarquable et injustement oublié de Jacques Bernoulli, et la démonstration fignolée la même année par Jean Bernoulli (1667-1748) : le mouvement d'une planète sous l'influence de la force de gravitation du Soleil se fait selon les lois de Képler qui, dorénavant, n'apparaissent plus comme indépendantes les unes des autres. Herman utilisa les nouvelles méthodes analytiques publiées par Leibniz (1646-1716) en 1684-1686, et introduisit l'invariant dynamique du mouvement de Képler connu aujourd'hui sous le nom de vecteur de Laplace (ce vecteur est parallèle au grand axe, son module est proportionnel à l'excentricité de l'orbite).

Une valeur très approximative (à 15 % près) du rayon de la Terre fut utilisée par Newton dès 1666 pour comparer les forces agissant sur la Lune et sur les corps situés à la surface de la Terre, et étayer ainsi son hypothèse de la gravitation universelle qui unifie les mécaniques terrestre et céleste. La valeur de R_T fut affinée en 1669-1670 grâce aux mesures géodésiques réalisées par Picard et Malvoisine entre Paris et Amiens, ce qui permit à Newton d'améliorer sensiblement l'accord entre sa théorie et l'observation.

1.2. Les succès de Newton

Newton expliqua un grand nombre de phénomènes. Il prédit la variation de la pesanteur avec l'altitude, que Halley chercha en vain à mettre en évidence, ainsi que l'aplatissement ε de la Terre selon l'axe polaire (Huygens avait prédit lui aussi un aplatissement, Cassini au contraire un allongement). La valeur $1/230$ de ε calculée par Newton à partir de la variation de l'accélération de la pesanteur entre le pôle et l'équateur terrestres (mise en évidence en 1672 par Richer) fut ramenée à $1/300$ par Clairaut (1742) pour tenir compte de l'inhomogénéité de la Terre, en bon accord avec les mesures géodésiques effectuées en 1735 par La Condamine et Bouguer au Pérou, près de Quito (aujourd'hui en Équateur), et Clairaut et Maupertuis en Laponie. Laplace confirma le résultat à partir du mouvement de la Lune. Newton esqua également la théorie des marées terrestres, qui sera développée par Laplace, et celle de la précession des équinoxes, qui sera explicitée, avec celle de

la nutation découverte par Bradley, par d'Alembert en 1748 et affinée un siècle plus tard par Poinsot.

Par ailleurs Newton utilisa la troisième loi de Képler pour évaluer la masse relative des planètes dont au moins un satellite était connu, c'est-à-dire la Terre, Jupiter et Saturne. Soit une planète de masse M (supposée négligeable devant la masse M_S du soleil), de période de révolution T et de grand axe orbital a , possédant un satellite de masse m_s (supposée négligeable devant celle de la planète), de période T_s et de grand axe orbital a_s . G étant la constante de la gravitation :

$$\frac{a^3}{T^2} = G (M_S + M) / 4 \pi^2 \approx G M_S / 4 \pi^2$$

$$\frac{a_s^3}{T_s^2} = G (M + m_s) / 4 \pi^2 \approx G M / 4 \pi^2$$

Newton en déduisit le rapport M/M_S , et le rapport des densités de la planète et du Soleil.

1.3. La mesure de G

Newton avait réussi à calculer la valeur g du champ de pesanteur à la surface de la Terre en démontrant que l'influence de la Terre, supposée parfaitement sphérique, peut être remplacée par celle d'une masse égale placée en son centre : $g = G M_T / R_T^2$. Comme il supposait que la densité moyenne d de la Terre était de l'ordre de 5 à 6, il aurait pu en déduire une valeur de la constante G de gravitation proche de la valeur réelle, puisque $d = 5.52$. Notons que la connaissance de G n'était pas indispensable au développement de la mécanique céleste.

Une première mesure expérimentale de G ne fut réalisée qu'un siècle plus tard, par l'astronome anglais Maskelyne en 1774, qui étudia l'écart angulaire, de l'ordre de $10''$, entre un fil à plomb et la verticale géographique résultant de l'attraction gravitationnelle d'une montagne d'Écosse dont le volume, la densité et la masse étaient évalués sommairement (Bouguer, lors de sa mission au Pérou, avait tenté une expérience semblable à proximité du Chimborazo). Au cours du XVIII^e siècle, on mesura g au sommet d'une montagne conique et on compara la valeur obtenue à la valeur théorique à la même altitude en l'absence de montagne afin d'obtenir G . On compara également les valeurs de g données par les oscillations d'un pendule à la surface de

la Terre et au fond d'un puits de mine. Mais les résultats restèrent imprécis.

En 1798, Cavendish (1731-1810) fit une première mesure, statique, de G en laboratoire, à l'aide d'une balance de torsion [2] (en réalité, il était intéressé non par la valeur de G , mais par la masse de la Terre qu'on peut en déduire). L'expérience est délicate car la force de gravitation mise en jeu est extrêmement faible, et il faut tenir compte de nombreux phénomènes parasites [3] tels que courants d'air, variations de température, influence du champ magnétique terrestre, ... Une mesure plus précise, dynamique, a été effectuée par Boys en 1894. Une autre expérience statique, dite de la balance, fut imaginée par Cavendish et perfectionnée en 1881 par von Jolly : deux poids égaux sont placés sur les plateaux d'une balance, puis une masse très importante est disposée sous l'un d'eux ; pour rétablir l'équilibre, une petite masse doit être ajoutée sur l'autre plateau.

1.4. Les masses de la Terre, du Soleil et des planètes

La relation de Newton entre g , G et R_T fournit immédiatement la masse de la Terre et sa densité moyenne [4]. Cette densité étant nettement supérieure à celle de la croûte terrestre (3.2), on en déduisit que la Terre possédait un noyau lourd. On n'imagina longtemps, comme Newton, qu'une croissance continue de densité de la surface au centre de la Terre, et c'est seulement en 1896 que le géophysicien allemand Wiechert présenta un modèle précis pour la structure interne de la Terre : un noyau métallique de rayon 4 970 km et de densité 8.2 entouré d'une croûte rocheuse d'épaisseur 1 400 km [5]. Ce modèle fut amélioré en 1906 par Oldham puis Gutenberg à la suite des premières mesures sismologiques qui avaient confirmé l'existence d'une discontinuité de densité, dite discontinuité de Wiechert.

Une fois connue la masse de la Terre, l'application de la troisième loi de Képler fournit la masse absolue du Soleil, puis celles des planètes - Mars, Jupiter, Saturne, Uranus - possédant au moins un satellite, dès que la distance planète-satellite fut connue. Les satellites de Mars, Phobos et Deimos, ont été découverts par l'astronome américain Hall en 1877 ; le cinquième de Jupiter par Barnard en 1892 ; les principaux satellites de Saturne par Huygens en 1655 (Titan et l'anneau), Cassini en 1671, 1672 et 1684, et Herschel en 1789 ; ceux d'Uranus par Herschel en 1787, et Lassell en 1851.

Notons au passage que l'utilisation de la troisième loi de Képler permet d'estimer également la masse du noyau de la Galaxie (Voie Lactée). Les observations du hollandais Oort en 1927 ont mis en évidence la rotation différentielle de la Galaxie : le Soleil tourne autour du centre de la Galaxie, à une distance de 27 000 années-lumière et avec une période de deux cent cinquante millions d'années. On en déduit que la masse du noyau est d'environ 10^{41} kg, soit environ cent milliards de fois celle du Soleil.

1.5. Les masses de la Lune et des systèmes doubles

La masse de la Terre étant connue, et supposée très supérieure à celle de la Lune, il est possible de déterminer celle de la Lune. Le barycentre G du système Terre-Lune (on sait aujourd'hui qu'il est à 4 660 km du centre de la Terre, donc à l'intérieur de celle-ci) décrit une ellipse de Képler autour du Soleil, et la Terre décrit autour de lui une petite ellipse. Il en résulte une petite oscillation de la direction apparente du Soleil, d'amplitude égale au rapport $GL/TS = 6.5''$. De cette inégalité mensuelle du Soleil, on déduit la distance GL, d'où la masse de la Lune et sa densité moyenne $d = 3.3$, légèrement supérieure à celle de la croûte terrestre. La précision est meilleure si on remplace le Soleil par un objet plus rapproché, tel que l'astéroïde Eros.

Divers systèmes doubles sont connus outre le système Terre-Lune : le système Pluton-Charon, et les étoiles doubles (les premières furent découvertes par William Herschel et son fils John). Considérons une étoile double isolée telle que Sirius, dont la distance fut donnée par Bessel (qui pressentit en 1850 l'existence d'un compagnon plus obscur de l'étoile brillante, observé en 1862) : son centre des masses a un mouvement rectiligne uniforme et chaque composante a un mouvement elliptique autour de lui. On peut déterminer le mouvement relatif des deux composantes et sa période (on sait évaluer l'inclinaison du plan du mouvement), d'où la masse totale du système à partir de la troisième loi de Képler. Le rapport des grands axes des orbites individuelles par rapport au centre des masses fournit le rapport des deux masses. Une méthode analogue s'applique au système Pluton-Charon, dont on a pu montrer très récemment qu'il constitue une véritable planète double.

1.6. Les anneaux des planètes

L'anneau de Saturne a été entrevu par Galilée en 1610, identifié comme tel par Huygens en 1655, et étudié par Cassini qui découvrit la division séparant les anneaux A et B (l'allemand Encke découvrit en

1837 la division de l'anneau A ; l'anneau intérieur C a été mis en évidence en 1850 par l'américain Bond). En 1850, Roche (1820-1883) montra que si un satellite est trop proche d'une planète, il est déchiqueté par les forces de marée (gradient de gravité) : la « limite de Roche » est égale à 2.44 fois le rayon R de la planète pour un satellite de même densité qu'elle. La théorie est bien satisfaite pour Saturne : le rebord extérieur de l'anneau est à la distance 2.3 R du centre de la planète, et le satellite le plus proche, Mimas, à la distance 3.11 R .

En 1802, Laplace vérifia que, s'il était solide, l'anneau serait en position instable. Cassini avait suggéré en 1675 que l'anneau était formé d'une multitude de petits satellites : Maxwell prouva en 1859 qu'il n'est ni solide, ni liquide, mais peut effectivement être considéré comme un gaz de particules indépendantes, stable devant les perturbations dues aux satellites, ce que confirma la découverte en 1895 par Keeler et indépendamment par Deslandres, par spectrographie, de la rotation différentielle de l'anneau. Poincaré démontra que si une planète est entourée d'un essaim de satellites, leurs collisions inélastiques mutuelles tendent à les répartir en un anneau équatorial. Les anneaux des autres planètes géantes ont été découverts respectivement en 1977 (anneaux filiformes d'Uranus), 1979 (Jupiter) et 1985 (arcs de matière de Neptune, anneau extérieur de Jupiter) [6].

2. LE DÉVELOPPEMENT DE LA MÉCANIQUE CÉLESTE

2.1. La théorie des perturbations

Képler savait déjà que Jupiter et Saturne ne suivaient qu'approximativement ses lois, ce que confirma Halley en 1675. Newton comprit à son tour que les orbites planétaires ne sont qu'approximativement elliptiques car chaque planète, outre l'attraction du Soleil, est soumise à l'influence, beaucoup plus faible, de toutes les autres planètes, et il montra que, par suite, une orbite planétaire peut être décrite comme une « ellipse » qui précède lentement dans son plan. Il esquaissa ainsi la théorie des perturbations, indispensable pour expliquer les mouvements précis des planètes, des satellites, des comètes et de la Lune, et prédire les éclipses.

La théorie des perturbations fut développée par ses successeurs. Halley (1656-1742), Clairaut (1713-1765), Maupertuis (1698-1759), d'Alembert (1717-1783), Euler (1707-1783), Lagrange (1736-1813), Laplace (1749-1827), puis Olbers (1758-1840), Gauss (1777-1855), Poisson (1781-1840), Bessel (1784-1846), Hamilton (1805-1865),

Jacobi (1804-1851), Le Verrier (1811-1877), Newcomb (1835-1909), Poincaré (1854-1912), ... firent du système solaire un extraordinaire champ de vérification des lois de la mécanique classique. Cependant certaines observations n'ont pu être expliquées qu'en renonçant à ces lois (mouvement de Mercure) ou en faisant intervenir des phénomènes physiques non gravitationnels (dissipation d'énergie par effets de marées, constitution physique des comètes, pression de la radiation solaire).

2.2. Les comètes

On considéra longtemps les comètes comme des phénomènes atmosphériques, leur caractère cosmique n'ayant été reconnu qu'au XVI^e siècle, par Appian, Cardan et Tycho-Brahé : ce dernier montra que la comète de 1577 était bien plus éloignée de la Terre que la Lune. Képler, Hévélius et Cassini n'avaient pas réussi à trouver les lois du mouvement des comètes [7], [8]. Étudiant la Grande Comète de 1680, Newton comprit que les comètes sont de petits astres en révolution périodique autour du Soleil sur des orbites elliptiques très excentriques. Halley, en 1705, montra que les comètes apparues en 1531, 1607 et 1682 avaient à peu près les mêmes éléments orbitaux, et il les considéra comme un astre unique dont il prédit le retour au périhélie en 1758 : Clairaut et Lalande affinèrent la prédiction en tenant compte des effets perturbateurs de Jupiter et Saturne. L'observation le 12 mars 1759 de ce retour, prévu pour le 15 avril à trente jours près, confirma de manière spectaculaire la validité des lois de Newton et des méthodes de la mécanique céleste (la prévision du retour de 1835 à trois jours près fut encore plus fine), et prouva une fois pour toutes l'appartenance des comètes au système solaire.

La comète de Lexell, observée en 1770, ne fut jamais revue bien que son orbite ait indiqué que sa période était courte : le phénomène fut expliqué par la suite par la théorie des perturbations, développée entre temps par Laplace, Olbers (1797) et Gauss. La comète d'Encke, la première comète périodique à avoir été découverte (en 1818, par Pons) depuis celle de Halley, a une période de trois ans : elle présente des accélérations irrégulières qui n'ont été expliquées que très récemment en faisant intervenir sa constitution physique.

Analysant les orbites les plus excentriques des comètes, les hollandais Van Woerkom et Oort ont montré en 1950 que les comètes proviennent du «nuage de Oort», anneau situé aux confins du système solaire, à environ cinquante mille unités astronomiques du Soleil : elles

sont injectées dans le système solaire sous l'influence de perturbations stellaires, sur des orbites quasi-paraboliques ; certaines sont capturées par Jupiter et prennent alors un mouvement elliptique périodique dans un plan peu incliné sur celui de l'écliptique [9], un impact est même possible comme en juillet 1994.

2.3. Les points de Lagrange

Alors que le problème de deux corps en interaction de gravitation est aisément intégrable, le problème de trois corps (énoncé par Euler dès 1727) ne l'est pas, comme l'a démontré Poincaré en 1895. En étudiant le mouvement de la comète de Halley, Clairaut avait abordé un cas particulier simple et assez facile à traiter approximativement : celui où l'un des trois corps possède une masse négligeable. Clairaut, d'Alembert et Euler étudièrent aussi le système plus compliqué Soleil-Jupiter-Saturne : Euler introduisit pour cela, en 1748, la méthode dite de la variation des constantes. Ce n'est qu'au XIX^e siècle que Le Verrier et Newcomb s'attaqueront au mouvement de l'ensemble des planètes.

En 1772, Lagrange étudia un cas particulier intégrable du problème des trois corps et prédit l'existence, sur une orbite planétaire, de deux «points de libration», formant chacun un triangle équilatéral avec la planète et le Soleil, où une petite masse peut se trouver en équilibre : à partir de 1906, on découvrit effectivement les astéroïdes Achille (Wolf, 1906) et Patrocle, puis des amas d'astéroïdes - les planètes grecques et troyennes - aux deux points de Lagrange de l'orbite de Jupiter. On a découvert récemment que les points de Lagrange de Thétis, satellite de Saturne, sont eux aussi occupés par de petits compagnons.

2.4. Inégalités périodiques et séculaires

En 1773, Laplace prouva la stabilité du système solaire [10], c'est-à-dire l'invariabilité à long terme des grands axes des orbites planétaires, conséquence de leur faible excentricité et des faibles inclinaisons des plans orbitaux les uns sur les autres. Ce résultat fut confirmé et précisé par Lagrange, puis en 1809 par Poisson. Puis, en 1776, Laplace montra que les éléments des orbites képlériennes peuvent varier de deux manières différentes en fonction du temps et distingua ainsi les **inégalités périodiques** (des grands axes, des excentricités, de l'inclinaison des plans orbitaux), dont la période est de quelques années ou dizaines d'années et qui sont dues aux positions relatives des

planètes sur leurs orbites, et les **inégalités séculaires** (de la position des nœuds et des périhélies), dont la période est de quelques milliers ou millions d'années et qui sont dues aux orientations relatives des plans orbitaux.

2.5. Les résonances de Laplace

Laplace démontra que des phénomènes de résonance peuvent stabiliser certaines configurations des corps en gravitation (comme on le verra en 2.6, ils peuvent aussi donner lieu à des instabilités). C'est le cas de Jupiter et Saturne, dont les périodes de révolution sont dans un rapport voisin de 2/5 ; de l'astéroïde Toro et de la Terre, en résonance 8/5 ; des astéroïdes des groupes Hilda et Thulé, accumulés sur les orbites en résonance 2/3 et 3/4 respectivement avec Jupiter (ainsi que des planètes grecques et troyennes, en résonance 1/1) ; de trois satellites galiléens de Jupiter entre eux, comme l'a montré Laplace (les périodes de Io, Europe et Ganymède sont de 1.75, 3.5 et 7 jours, donc dans le rapport 1-2-4 : leurs positions moyennes sont liées par la relation $n_1 - 3n_2 + 2n_3 = 0$; si deux sont en conjonction, le troisième est en opposition), et de certains couples de satellites de Saturne tels que Titan et Hypérion en résonance 3/4.

2.6. Les astéroïdes

Les astéroïdes ont de très faibles masses et sont très sensibles à l'influence de Jupiter : ils permettent, comme les comètes, une bonne vérification de la théorie des perturbations. En 1800, Gauss réussit à calculer l'orbite complète de Cérés à partir du petit arc déterminé par Piazzi, et à prédire son retour périodique (il inventa à cette occasion la méthode des moindres carrés) : grâce à lui, Cérés put être retrouvé le 31 décembre 1801. Après ce succès spectaculaire qui rappelle celui de la prédiction de Halley, Gauss récidiva avec Pallas. Olbers remarqua alors que les orbites de Cérés et Pallas avaient un point commun, ce qui renforça son hypothèse de l'existence d'une planète ayant explosé pour leur donner naissance : il en déduisit l'orbite probable d'autres débris de cette planète, et découvrit ainsi Junon.

La ceinture des astéroïdes s'étend de 2.2 à 3.3 unités astronomiques du Soleil, sa masse totale est environ le dixième de celle de la Terre. Mais sa densité n'est pas uniforme : l'américain Kirkwood découvrit en 1867 l'existence d'orbites très peu occupées, les «lacunes de Kirkwood», et vérifia que les périodes correspondantes sont des fractions simples (2/7, 1/3, 3/8, 2/5, 3/7, 4/9, 1/2) de la période de

Jupiter [11]. Cette structure n'a été expliquée que très récemment par des perturbations résonantes de Jupiter : alors que les orbites proches de la planète sont stabilisées par résonance, les orbites peu occupées (plus éloignées) sont en fait chaotiques ; elles peuvent rencontrer Mars qui absorbe peu à peu les astéroïdes et météorites correspondants (les orbites des Apollons sont elles aussi chaotiques). De manière analogue, Neptune pourrait un jour expulser Pluton de son orbite actuelle sous l'effet d'une résonance 3/2.

Les satellites Mimas, Encélade et Thétys créent de même une lacune dans l'anneau de Saturne (qui n'est autre que la division de Cassini qui sépare les anneaux A et B) sous l'effet d'une résonance 1/2, 1/3 et 1/4 respectivement ; Mimas est responsable de la division de Encke de l'anneau A par résonance 3/5, et de la division entre les anneaux B et C par résonance 1/3. En 1965, le tchèque Kresak a montré que la distribution des comètes périodiques présente aussi des lacunes de Kirkwood.

2.7. Les étoiles filantes et météorites

La nature astrale des étoiles filantes et météorites, comme celle des comètes, ne fut pas immédiatement comprise : selon Lavoisier, les météorites étaient des pierres terrestres altérées par la foudre. Mais le physicien allemand Chladni émit en 1794 l'hypothèse qu'il s'agissait d'objets célestes, ce qui fut confirmé en 1803 par Biot, qui contrôla une chute de météorites ou «bolides». Le célèbre chimiste suédois Berzelius démontra lui aussi l'origine extraterrestre des météorites.

En 1834, Olmsted et Twining montrèrent que les étoiles filantes sont des particules dont l'orbite coupe celle de la Terre et, en 1866, Schiaparelli prouva que les Perséïdes avaient la même orbite qu'une certaine comète, d'où l'idée que les météorites proviennent de la désagrégation des comètes. Comme on l'a vu, les météorites peuvent être aussi des astéroïdes possédant des orbites chaotiques.

2.8. Les découvertes de Neptune et Pluton

Après l'explication précise des mouvements de Jupiter et Saturne par Laplace et la redécouverte de Cérés grâce à Gauss, la découverte de Neptune fut un autre grand succès de la théorie des perturbations. Dès 1821, un assistant de Laplace, Bouvard (1767-1843), observa des irrégularités dans le mouvement d'Uranus, sans pouvoir les expliquer par les perturbations dues aux planètes connues à l'époque : la

différence entre les positions calculée et observée pouvait atteindre 2' à certaines dates. Airy (1801-1892), Arago, Bessel et d'autres soupçonnèrent vite l'existence d'une planète transurannienne responsable des irrégularités inexplicables. La loi de Bode fut utilisée pour fixer le rayon de son orbite, et donc sa période : restait à déterminer sa masse et sa phase sur son orbite. La masse de Neptune fut tout d'abord conjecturée par Adams (1819-1892) et Le Verrier (1811-1877) quand ils prédirent indépendamment la position de cette planète [12]. La distance de la «troublante d'Uranus» au Soleil dut être ramenée de quarante à trente unités astronomiques après la découverte de la planète par Galle le 23 septembre 1846, dès réception des indications de Le Verrier, à 1° de la position prédite, et sa masse (estimée à 35 M_T) réduite d'un facteur deux après la découverte du satellite Triton par l'anglais Lassell un mois plus tard (le deuxième satellite, Néréide, a été trouvé seulement en 1949 par Kuiper). La découverte de Neptune est donc en partie due au hasard, l'erreur sur sa distance compensant en quelque sorte l'erreur sur sa masse.

Le mouvement de Neptune ne pouvant à son tour être expliqué correctement par les perturbations des planètes connues, Le Verrier puis Flammarion cherchèrent sans succès à localiser une éventuelle planète transneptunienne. Pluton fut finalement découverte en 1930 par Tombaugh, à 6° de la position prédite, à la suite des calculs effectués quinze ans plus tôt indépendamment par Pickering (1846-1919) et Lowell (1855-1916), mais sa masse conjecturée (un peu inférieure à M_T) était beaucoup trop grande : la découverte du satellite Charon par Christy en 1978 ($a_s = 20\,000$ km et $T_s = 6$ jours) a fourni une détermination plus vraisemblable de la masse du système Pluton-Charon ($M_T/500$) sur la base de la troisième loi de Képler. Du même coup, on doit considérer que la découverte de Pluton fut davantage le résultat d'une exploration systématique que celui d'un calcul, et imaginer l'existence d'une planète plus lointaine et plus massive que Pluton afin d'expliquer le mouvement de Neptune [13], [14], [15].

2.9. Les masses des planètes sans satellite

Les masses des planètes sans satellite connu - Mercure, Vénus et, pendant longtemps, Mars - sont, comme celles des astéroïdes, difficiles à évaluer. Elles ont été obtenues en étudiant les perturbations qu'apportent à leurs mouvements la présence des autres planètes. Celles de Vénus et de Mercure le furent seulement par Le Verrier, puis en 1895 par l'astronome américain Newcomb à partir de l'observation du système Mercure-Vénus-Terre. La masse de Mercure ($0.045 M_T$) obte-

nue par Newcomb a été sérieusement révisée par la suite ($0.056 M_T$). La masse précise du système Terre-Lune (rapportée à celle du Soleil) a été obtenue par Rabe en 1950, puis par Lieske en 1968, à partir du mouvement d'Eros.

On remarque que les masses des planètes sont négligeables devant celle du Soleil, qui représente 99.87 % de la masse du système solaire : celle de Jupiter n'en est que le millième environ. C'est la raison pour laquelle le mouvement d'une planète est très correctement décrit par les lois de Képler valables pour une planète isolée (en particulier le rapport a^3/T^2 de la troisième loi est pratiquement indépendant de la planète), l'effet des autres planètes pouvant se calculer par des méthodes perturbatives et se décrire comme une précession lente de l'ellipse de Képler : ainsi l'orbite de la Terre précède de 1.7° par siècle sous l'influence principale de Jupiter. L'approximation képlérienne est au contraire beaucoup moins valable pour les satellites de Jupiter, leur mouvement (comme celui de la Lune) étant fortement influencé par le Soleil.

2.10. Le mouvement de la Lune

Le mouvement de la Lune est très complexe. Le phénomène de la libration avait déjà été expliqué correctement par Galilée. En 1692, Cassini énonça trois lois décrivant ce mouvement et relatives à la période propre (égale à la période sidérale) et à l'orientation de l'axe de rotation propre : elles seront interprétées par Lagrange, Laplace et Poisson, qui en déduiront les valeurs des moments principaux d'inertie de la Lune.

A la suite des travaux de Newton, la théorie naissante du problème des trois corps permit à Clairaut, d'Alembert et Euler de décrire le mouvement du périée, fortement influencé par le Soleil. Clairaut émit à cette occasion l'hypothèse que la force de gravitation en $1/r^2$ s'exerçant entre deux corps devait être complétée par un faible terme «magnétique» en $1/r^4$; à la suite des travaux de d'Alembert, il montra que cette hypothèse était inutile.

Découverte par Halley en 1695, évaluée à $20'$ par siècle par Dunthorne en 1749 puis à $24'$ par Airy, l'accélération séculaire du mouvement moyen de la Lune fut expliquée par Laplace en 1787 à partir de la diminution séculaire de l'excentricité de l'orbite terrestre,

et ce résultat fut considéré alors comme un triomphe de la théorie newtonienne.

En 1859 cependant, Adams montra que les calculs de Laplace étaient insuffisamment précis et ne rendaient compte que de la moitié - soit 12' par siècle - de l'accélération séculaire de la Lune, et ce résultat fut confirmé par Delaunay (1816-1872). Le mystère ne fut éclairci que beaucoup plus tard. Spencer Jones montra en 1939 que les effets de marées sont responsables d'un ralentissement séculaire de la rotation diurne de la Terre. On prédit à cette époque les irrégularités de la rotation diurne, dues aux oscillations de l'axe polaire par rapport au globe terrestre, aux mouvements saisonniers de l'atmosphère (Stokyo), ainsi qu'aux mouvements réguliers ou accidentels du magma terrestre (Spencer Jones) : ces irrégularités ont été mesurées en 1936 par Stokyo grâce à l'horloge à quartz, puis à partir de 1950 grâce à l'horloge atomique [16].

Le mouvement de la Lune fut étudié également par Hansen (1853), puis par Hill (1877) et Brown (1919) qui reprirent une méthode exposée par Euler en 1768. Brown considéra jusqu'à mille quatre cent dix-sept termes de perturbations. Les méthodes perturbatives développées à ce propos furent appliquées au mouvement des planètes.

2.11. Le mouvement de Mercure

A la fin du XIX^e siècle, la théorie newtonienne s'était imposée depuis longtemps, mais elle laissait encore subsister trois énigmes : les accélérations irrégulières de la comète d'Encke, l'accélération séculaire de la Lune, et le mouvement du périhélie de Mercure. En 1859, Le Verrier constata une avance du périhélie de Mercure, qui ne pouvait être expliquée par les perturbations des planètes connues : l'écart entre théorie (527") et expérience était de 39" par siècle (valeur corrigée à 43" par Newcomb), soit environ 0.1" par révolution. Il mit aussi en évidence une précession plus lente des périhélies de Vénus, de la Terre et de Mars.

De nombreuses hypothèses furent avancées pour rendre compte de cet écart. Le Verrier imagina en 1859 l'existence d'une planète «intramercurielle», Vulcain, qui ne fut jamais observée, ou d'une ceinture d'astéroïdes ; le météorologiste hollandais Buys-Ballot, qui étudiait les variations périodiques de la température atmosphérique, suggéra en 1860 que le Soleil possédait des anneaux, susceptibles d'influencer Mercure ; par analogie avec la théorie électrodynamique

de Weber, Zöllner et Tisserand considérèrent en 1872 l'influence possible des vitesses des astres sur leur interaction gravitationnelle ; Newcomb envisagea en 1894 l'hypothèse, due à l'américain Hall (1828-1909), d'une force de gravitation en $1/r^{2+\varepsilon}$ (le paramètre ε étant de l'ordre de 10^{-7}) ; l'allemand Seeliger avança en 1906 l'existence d'un nuage de matière entourant le Soleil et responsable, par diffusion, de la « lumière zodiacale », reprenant une hypothèse émise en 1683 par Cassini (ce nuage est formé de particules de moins de cent micromètres de diamètre et de masse trop faible pour qu'il puisse influencer Mercure).

La précession des orbites de Mercure, de Vénus, de la Terre et de Mars a pu finalement être expliquée parfaitement par la théorie de la relativité générale d'Einstein [17], publiée fin 1915, à condition d'admettre que l'aplatissement du Soleil, très difficile à mesurer, joue un rôle négligeable. Le déplacement du périhélie du micro-astéroïde Icare, découvert en 1949, qui s'approche plus près du Soleil que Mercure et dont l'orbite est très excentrique, a fourni en 1968 une autre vérification de la théorie d'Einstein [18] mais n'a pas permis d'écarter une modification de la relativité générale proposée par Brans et Dicke en 1961.

3. L'HISTOIRE DU SYSTÈME SOLAIRE

3.1. L'origine du système solaire

Le premier modèle de formation du système solaire fut introduit par Kant en 1755. Dans l'univers rempli de matière, les régions les plus denses attirent la matière environnante qui se concentre sous l'effet des forces de gravitation. Si une telle région est initialement en rotation, elle s'aplatit sous forme d'un disque à l'intérieur duquel des concentrations secondaires de matière sont à l'origine des planètes. Laplace, en 1796 puis en 1824, imagina un modèle voisin : une nébuleuse primitive chaude dont la vitesse de rotation augmente lorsqu'elle se refroidit et se contracte, jusqu'à éjection d'une série d'anneaux donnant ensuite naissance aux planètes évoluant dans des plans orbitaux très voisins, la partie centrale de la nébuleuse continuant à se contracter et devenant le Soleil.

L'hypothèse de Laplace fut soumise au calcul par Roche, qui justifia l'apparition d'anneaux successifs au cours de la contraction de la nébuleuse. Elle fut cependant critiquée en 1884 par Faye, qui

souligna son incompatibilité avec le mouvement rétrograde d'Uranus et des satellites extérieurs des grosses planètes. Robinet en 1861 puis Fouché en 1884 montrèrent son incompatibilité avec la conservation du moment cinétique. D'autres critiques, basées sur les temps d'évolution de la nébuleuse, furent avancées par George Darwin, le fils du célèbre naturaliste, et par Kirkwood [19].

Le modèle évolutionniste de Laplace fut rejeté en 1905 par Chamberlin, le Soleil contenant 99 % de la masse du système solaire et seulement 1 % de son moment cinétique. Chamberlin et Moulton envisagèrent alors un modèle «catastrophiste» selon lequel une étoile, en s'approchant du Soleil, lui aurait arraché, par effet de marée, un filament de matière à l'origine des planètes. Ce modèle, initié par le naturaliste Buffon (1707-1788) en 1749 (une comète aurait heurté le Soleil), fut développé vers 1920 par Jeans et Jeffreys. Il expliquait pourquoi l'essentiel de la masse du système solaire est concentré dans le Soleil, mais on montra qu'un filament stable n'aurait pu s'étendre au-delà de deux rayons solaires et se serait dispersé avant de se refroidir.

On est finalement revenu depuis 1940 au modèle de la nébuleuse, en le perfectionnant (Weiszäcker, ter Haar, Kuiper, ...) [20]. Les planètes géantes se seraient formées par condensation gravitationnelle de la matière entourant le Soleil, les planètes telluriques par accréation de planétoïdes lors de collisions à faible vitesse : la présence de Jupiter aurait empêché l'accréation de la ceinture des astéroïdes (Safronov, 1972), hypothèse inverse de celle d'Olbers [21].

L'origine de la Lune est toujours discutée [22]. Selon Darwin, la Lune, qui ne cesse de s'éloigner de la Terre sous l'effet des marées, aurait été éjectée par le manteau terrestre après la formation du noyau (la «cicatrice» serait l'Océan Pacifique). Cette hypothèse a été approfondie par Poincaré qui a étudié la brisure de symétrie d'une masse en rotation rapide et sa fission possible, mais elle a été critiquée en 1909 par Moulton, qui a souligné l'insuffisance du moment cinétique du système Terre-Lune. D'autres modèles ont été imaginés récemment : capture d'une ancienne planète proche de la Terre (Gerstenkom, 1955), formation simultanée de la Terre et de la Lune par accréation (Ruskol, 1960).

3.2. L'évolution du système solaire

Les astronomes se sont également interrogés sur l'évolution du système solaire depuis sa formation. Le système planétaire et la plupart

des satellites présentent une grande stabilité à long terme, car les perturbations sont faibles et ne provoquent que des oscillations périodiques autour des orbites moyennes : ce résultat fut démontré, comme on l'a vu, par Laplace. On admet cependant aujourd'hui que les astéroïdes, les comètes et certains satellites peuvent évoluer loin de leur lieu de formation [23]. Ainsi Pluton, dont l'orbite traverse celle de Neptune, serait un ancien satellite de Neptune transféré sur une orbite solaire alors que d'autres satellites ont vraisemblablement été capturés (Triton par Neptune et peut-être la Lune par la Terre). Très récemment, à la suite des travaux précurseurs de Poincaré sur le problème des trois corps en interaction gravitationnelle, on a compris que le système solaire est en fait un système chaotique : l'évolution à très long terme des planètes intérieures (de Mercure à Mars) obéit aux lois déterministes de la mécanique newtonienne, mais - contrairement au point de vue de Laplace - elle ne peut être prévue faute d'une connaissance parfaitement précise de leurs conditions initiales [24].

L'arrangement ordonné des planètes décrit par la loi de Titius-Bode est-il une coïncidence, ou a-t-il une explication dynamique ? Selon Hills [25], cette loi traduit l'évolution d'un système de masses placées dans le champ d'une masse dominante avec des conditions initiales quelconques : au bout d'un certain temps, les périodes des masses deviennent commensurables de telle sorte que leurs perturbations réciproques soient minimisées, et la configuration stable résonante qui s'établit satisfait la loi de Titius-Bode.

En fait, cette loi s'interprète plus généralement si on admet que le disque proto-solaire ou proto-planétaire est invariant par rotation autour de son axe et invariant d'échelle, c'est-à-dire ne possédant pas de longueur caractéristique. Dubrulle et Graner [26] ont montré que, quel que soit le mécanisme physique qui provoque la fragmentation du disque en planètes ou satellites, le rapport des rayons de deux orbites successives a une valeur constante c . Les nombreux mécanismes introduits précédemment [27] pour expliquer la loi de Titius-Bode supposent implicitement l'existence de cette symétrie d'échelle et n'auraient donc qu'un rôle secondaire : seule la constante c en dépend. La loi ne renseigne donc pas sur l'état initial du système solaire.

CONCLUSION

Les épisodes historiques que nous venons de présenter permettent de mieux comprendre l'état des connaissances actuelles sur le système

solaire qu'un simple exposé factuel, mais aussi d'illustrer les relations entre astronomie et physique.

Jusqu'à Newton compris, c'est l'astronomie qui est à l'origine des progrès de la physique - lois de la mécanique, gravitation, vitesse de la lumière - car elle présente des phénomènes simples. Puis ce fut au contraire la physique «terrestre» qui fit progresser l'astronomie : les mesures terrestres de la vitesse de la lumière permirent une meilleure connaissance de la distance Terre-Soleil à partir de la constante d'aberration ; l'analyse spectrale et la photométrie ouvrirent la voie à l'étude physique du Soleil et des planètes. C'est ainsi que, suivant la suggestion de Gill, le déplacement Doppler des raies du spectre solaire dû à la révolution de la Terre a été utilisé en 1905 pour mesurer la parallaxe solaire.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. NAUENBERG : «*Hooke, orbital motion and Newton's Principia*», Am. J. Phys. 62, 331 (1994).
- [2] B.-E. CLOTFELTER : «*The Cavendish experiment as Cavendish knew it*», Am. J. Phys. 55, 210 (1987).
- [3] L. EVERETT : «*Gravitation, relativity and precise experimentation* (Trieste), North Holland, Amsterdam (1975).
- [4] P. GUINTINI : *Les planètes*, Que Sais-je n° 383, PUF (1949).
- [5] S.-G. BRUSH : «*Discovery of the Earth's core*», Am. J. Phys. 48, 705 (1980).
- [6] A. BRAHIC : «*Les anneaux des planètes*», La Recherche 17, 40 (janvier 1986) ; B. SICARDY : «*Les anneaux de Neptune*», La Recherche 25, 22 (janvier 1994).
- [7] P. MAGNIEN : «*La comète de Halley est de retour*», B.U.P. n° 676, 1285 (juillet 1985). Voir aussi L. SIMON : «*La comète de Halley est-elle l'étoile de Noël ?*», La Recherche 17, 854 (juin 1986).
- [8] A. BORK : «*Newton and comets*», Am. J. Phys. 55, 1089 (1987).
- [9] M. FESTOU et P. LAMY : «*Les comètes*», La Recherche 12, 46 (janvier 1981).
- [10] S.-L. JAKI : «*The five forms of Laplace cosmogony*», Am. J. Phys. 44, 4 (1976).
- [11] Ch. FROESCHLE et C. FROESCHLE : «*Les astéroïdes*», La Recherche 17, 1520 (1986).

- [12] H.-M. LAI et coll. : «*Perturbation of Uranus by Neptune : a modern perspective*», Am. J. Phys. 58, 946 (1990).
- [13] A. BRAHIC : «*Pluton et son satellite*», La Recherche 99, 380 (avril 1979).
- [14] F. MIGNARD et D. BONNEAU : «*Aux confins du système solaire : Pluton et Charon*», La Recherche 123, 738 (juin 1981).
- [15] W.-G. HOYT : «*Planets X and Pluto*», Am. J. Phys. 48, 583 (1980).
- [16] J. WHAR : «*Les variations de la rotation de la Terre*», La Recherche 17, 1174 (1986).
- [17] N.-T. ROSEVEARE : *Mercury's perihelion from Le Verrier to Einstein*, Clarendon Press, Oxford (1992).
- [18] I. SHAPIRO : «*Icarus : further confirmation of the relativistic perihelion precession*», Phys. Rev. Letters 20, 1517 (1968) et R.-H. DICKE : «*Solar oblateness and general relativity*», Phys. Rev. Letters 18, 313 (1967).
- [19] J.-P. VERDET : *Une histoire de l'astronomie*, Seuil, Paris (1990).
- [20] H. ALFVEN : «*L'origine et l'évolution du système solaire*», La Recherche 28, 929 (novembre 1972) et H. REEVES : «*L'origine du système solaire*», La Recherche 6, 808 (octobre 1975).
- [21] G. WETHERILL : «*La formation de la Terre par accréation de planétoïdes*», Pour la Science 46, 12 (août 1981).
- [22] A.-P. BOSS et W. BENZ : «*L'origine de la Lune*», La Recherche 18, 38 (janvier 1987).
- [23] D.-W. HUGHES : «*Comets and asteroids*», Contemp. Phys. 35, 75 (1994).
- [24] Voir «*Fausse note dans l'harmonie des sphères*», Pour la Science 202, 22 (août 1994).
- [25] C. MURRAY : «*Is the solar system stable ?*», New Scientist (25 novembre 1989).
- [26] B. DUBRULLE et F. GRANER : «*Pas de mystère dans le système solaire*», La Recherche 25, 262 (février 1994).
- [27] J.-G. HILLS : «*Dynamic relaxation of planetary systems and Bode's law*», Nature 225, 840 (1970) et C.-J. RANSOM : «*Bode's law and the origin of the solar system*», Am. J. Phys. 48, 4 (1980).