

# La Connaissance des temps : un journal scientifique publié depuis 1679

## Épisode 3 : Le mouvement des planètes de Laplace à 1980

Dans ce troisième épisode, nous continuons notre exploration des progrès des éphémérides de la Connaissance des temps et allons voir l'évolution de Laplace à 1980.

### Les travaux de Laplace

Au cours des années 1770-1825, Pierre-Simon Laplace étudie les conséquences de l'application de la loi de la gravitation de Newton sur le mouvement des corps du Système solaire et résout plusieurs problèmes concernant les théories planétaires. Il énonce, le premier, le théorème de l'invariabilité des grands axes, étudie la stabilité du Système solaire, donne le développement de la fonction perturbatrice à l'ordre 3, puis 5 des excentricités et inclinaisons, ainsi que des formules permettant de calculer les perturbations planétaires. Il donne aussi, en 1785, une formulation remarquable de la « grande inégalité » Jupiter-Saturne.

Les astronomes étaient depuis longtemps intrigués par les irrégularités des moyens mouvements de Jupiter et Saturne montrées par l'observation. S'appuyant sur ses travaux et ceux de Lagrange et Poisson sur l'invariabilité des grands axes et des moyens mouvements, Laplace fait l'hypothèse que ces irrégularités sont dues à des termes périodiques de période de l'ordre de plusieurs centaines d'années. Il déduit des observations la quasi-commensurabilité des moyens mouvements des deux planètes dans le rapport 2/5 et montre que les variations de ces moyens mouvements sont dues à des termes périodiques liés aux longitudes moyennes de Jupiter et Saturne. Il évalue à 919 ans la période de cette grande inégalité et à 1249" et 2924" les amplitudes correspondantes dans les longitudes de Jupiter et Saturne, respectivement. Dans l'addition à la CDT 1789, un article intitulé *Sur les moyens mouvements de Saturne, de Jupiter & de ses Satellites* présente un *Communiqué à l'Académie le 10 Mai 1786 par M. De La Place* dans lequel Laplace écrit que la période de cette inégalité est « d'environ 877 ans et d'amplitude 1200" » pour la longitude de Jupiter et 2810" pour celle de Saturne. Les valeurs données par les théories planétaires modernes sont 935 ans pour la période de la grande inégalité et 1183" et 2912" pour les amplitudes correspondantes des perturbations sur les longitudes moyennes des deux planètes.

Les travaux de Laplace ont aussi concerné le mouvement de la Lune. Il calcule, en particulier, les accélérations séculaires de la longitude moyenne de la Lune, puis des longitudes du nœud et du périhélie de la Lune. Dans l'addition de la CDT 1790,

dans un article intitulé *Sur l'équation séculaire de la Lune*, il l'estime l'accélération séculaire de la longitude moyenne à 11.135", valeur qu'il ramènera ensuite à 10.18". Comme l'explique Chapront-Touzé en 1997 (*Introduction aux éphémérides*, EDP Sciences, Paris 1998), les accélérations séculaires de Laplace ne tiennent compte que de la contribution des variations séculaires de l'excentricité de l'orbite terrestre et sont très différentes des valeurs réelles (-4.7763" pour l'accélération séculaire de la longitude moyenne issue des théories récentes ELP, par exemple). La parution des ouvrages de Laplace est annoncée dans les additions à la CDT. L'addition à la CDT pour 1798 annonce la parution de l'*Exposition du système du Monde*. Celle de la CDT pour 1801 annonce le début de l'impression de son *Traité de Mécanique Céleste*, la parution de cet ouvrage étant annoncée dans l'addition à la CDT pour 1802.

### Les tables du Soleil et des planètes issues des travaux de Laplace

La plupart des tables du Soleil et des planètes utilisées dans la CDT durant la première moitié du dix-neuvième siècle sont issues des travaux de Laplace, comme le montre la table 1 qui donne les sources et l'argument des éphémérides du Soleil et des planètes publiées dans la CDT depuis 1809. C'est le cas des tables du Soleil de Delambre publiées en 1806, des tables de Mercure, Vénus et Mars de Lindenau et des tables de Jupiter et Saturne de Bouvard publiées en 1808 puis en 1821, après que Laplace eut corrigé une erreur de signe dans les termes du cinquième ordre en excentricité de la grande inégalité. Bouvard publia également en 1821 des tables d'Uranus. Pour construire ses tables, il disposait de quarante années d'observations méridiennes régulières, de 1781, année de la découverte d'Uranus par Herschel, à 1820 et d'une vingtaine d'observations anciennes échelonnées entre 1690 et 1771, effectuées par Flamsteed, Bradley, Mayer et Lemonnier qui avaient pris la planète pour une étoile fixe. Bouvard construisit ses tables en partant des expressions analytiques données par Laplace pour les perturbations d'Uranus par Jupiter et Saturne. Il ne put représenter par les mêmes formules les anciennes observations et les modernes et décida de

rejeter les observations anciennes et de baser ses tables uniquement sur les observations méridiennes. Malgré cela, ses tables ne tardèrent pas à montrer un écart croissant avec les observations ultérieures. La

représentation du Soleil et des planètes dans la CDT subit, lors de la première moitié du dix-neuvième siècle, des modifications d'un autre ordre.

TABLE 1 – Sources et arguments du temps des éphémérides du Soleil et des planètes dans la CDT à partir de 1760 : TVP est le Temps vrai de Paris, TMP, le Temps moyen de Paris, GMT, le Temps moyen de Greenwich, TULV, le Temps uniforme de Le Verrier et TT le Temps terrestre construit à partir du Temps atomique international TAI appelé TDT jusqu'en 1991.

Dates	Échelle de temps	Soleil	Mercure	Venus	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune	
1760	TVP	La Caille	Cassini			Cassini				
1761-1762	Idem	La Caille	Halley			Halley				
1763-1767	Idem	La Caille	Cassini			Cassini				
1768-1770	Idem	La Caille	Lalande	Halley		Jeaurat	Halley			
1771	Idem	La Caille	Lalande	Halley		Jeaurat	Lalande			
1772-1774	Idem	La Caille	Lalande			Lalande				
1775	Idem	Mayer	Lalande			Lalande				
1776	Idem	La Caille	Lalande			Lalande				
1777-1788	Idem	Mayer	Lalande			Lalande				
1789-1790	Idem	Mayer	Lalande			Lalande		Nouet		
1791	Idem	Mayer	Lalande			Lalande + Delambre				
1792	Idem	Mayer	Lalande			Delambre		Nouet		
1793-1834	TVP	Delambre	Lalande			Delambre				
1835-1862	TMP	Delambre	Lindenau			Bouvard				
1863	Idem	Mathieu	Lindenau			Bouvard			Kowalski	
1864	Idem	Le Verrier		Lindenau		Bouvard			Kowalski	
1865-1870	Idem	Le Verrier		Le Verrier		Bouvard			Kowalski	
1870-1876	Idem	Le Verrier				Bouvard			Newcomb	
1877-1878	Idem	Le Verrier				Bouvard			Newcomb	
1879-1883	Idem	Le Verrier				Le Verrier			Newcomb	
1884-1911	Idem	Le Verrier							Le Verrier	
1912-1915	Idem	Le Verrier					Gillot			
1916-1917	GMT	Le Verrier					Gillot			
1918-1924	Idem	Le Verrier				Gillot				
1925-1983	TULV	Le Verrier				Gillot				
1984-2006	TT	Bretagnon (VSOP82)				Bretagnon-Simon (VSOP82/TOP82)				
2007-2013	Idem	Fienga et al. (INPOP06)								
2014 →	Idem	Fienga et al. (INPOP10)								

À partir de 1835, le Temps solaire moyen de Paris remplace le Temps solaire vrai de Paris comme argument des éphémérides. À partir de 1838, les éphémérides sont publiées corps par corps. Elles sont journalières pour le Soleil, de trois jours en trois jours pour Mercure, de six jours en six jours pour Vénus et Mars, de huit jours en huit jours pour Jupiter, de dix jours en dix jours pour Saturne et de quinze jours en quinze jours pour Uranus. D'autres coordonnées sont introduites : latitude du Soleil, temps sidéral au midi moyen, rayon vecteur des planètes. En 1863, les éphémérides deviennent journalières pour Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne et de quatre jours en quatre jours pour Uranus et Neptune.

## La découverte de Neptune

Les travaux qui ont conduit Le Verrier à découvrir Neptune sont exposés dans leur intégralité dans l'addition à la CDT 1849, dans un article intitulé *Recherches sur les mouvements de la planète Herschel (dite Uranus)*. En 1845, les écarts entre les positions d'Uranus données par les tables de Bouvard et celles données par l'observation atteignent 2'. À la demande d'Arago, Le Verrier s'attaque au problème. Il calcule les perturbations d'Uranus par Jupiter et Saturne au deuxième ordre des masses et apporte des corrections aux tables de Bouvard de l'ordre de 40" sur la longitude d'Uranus. Il compare ensuite sa théorie aux observations et améliore les constantes d'intégration. Il ramène ainsi les écarts entre la théorie et les observations

méridiennes d'Uranus à 20", ce qui reste néanmoins trop important.

Le Verrier recherche alors les perturbations qu'apporterait sur Uranus une planète située à peu près dans le plan de l'écliptique et, en première approximation, à une distance moyenne du Soleil double de celle d'Uranus (d'après la loi empirique de Titius-Bode). Il arrive à ramener les résidus en longitude entre théorie et observations à moins de 5.4" pour les observations méridiennes et à moins de 20" pour les observations anciennes, avec une planète perturbatrice de demi-grand axe 36,1539 unités astronomiques et de masse 0,000 107 masse solaire. Il estime, pour le 1<sup>er</sup> janvier 1847, la longitude héliocentrique de la planète perturbatrice à 326° 32' et le rayon vecteur à 33,06 unités astronomiques. Le Verrier communique, le 18 septembre 1846, la position de la planète à l'astronome allemand Galle qui l'observe à près de un degré de la position prévue par Le Verrier, le 23 septembre 1846. On sait que l'astronome anglais Adams aurait résolu le problème un peu avant Le Verrier, mais ses résultats furent publiés après la découverte de la planète. La position calculée par Adams différait de celle observée par Galle de 2° 27'. Des premières observations de Neptune et d'une observation ancienne de Lalande qui avait observé la planète comme une étoile fixe en 1795, on put déduire les éléments elliptiques de son orbite.

On put aussi calculer la masse de la planète en partant des observations de son satellite Triton découvert en 1846 par Lassell, peu après la planète. Les résultats de ces observations différaient sensiblement des valeurs prévues par Le Verrier et Adams comme le montre la table 2 due à Tisserand (1889). Tisserand remarque que la période des observations méridiennes correspond à un intervalle de temps où les perturbations mutuelles d'Uranus et Neptune sont sensibles. Il montre que les forces perturbatrices calculées par Le Verrier ont des directions voisines des directions réelles, que les valeurs adoptées pour l'excentricité et le demi-grand axe rendraient leur intensité trop faible, mais que cela est compensé en partie par la valeur trop forte de la masse de Neptune, ce qui a permis à Le Verrier et à Adams de représenter correctement le lieu héliocentrique de Neptune. Le Verrier désirait ardemment que la planète qu'il venait de découvrir porte son nom. C'est ce qui explique la note assez hypocrite, qu'il a placée **au bas de la première page de son article** : « *Dans mes publications ultérieures, je considérerai comme un strict devoir de faire disparaître complètement le nom d'Uranus, et de ne plus appeler la planète que du nom de HERSCHEL. Je regrette vivement que l'impression déjà avancée de cet écrit ne m'ait pas permis, dès à présent, de me conformer à une détermination que j'observerai religieusement dans la suite* ».

TABLE 2 – Comparaison entre les éléments elliptiques et la masse de Neptune entre la première observation et les valeurs prédites par Le Verrier et Adams (d'après Tisserand en 1889)

Éléments	Observations	Le Verrier	Adams
Demi-grand axe (en au)	30,0367	36,1539	37,2474
Excentricité	0,008719	0,107610	0,120615
Longitude du périhélie	47° 12'	284° 06'	299° 11'
Masse (en masse solaire)	0,000 056	0,000 107	0,000 150

## Les tables de Le Verrier, Newcomb et Gaillot

Après ce coup de maître, Le Verrier reprend complètement le problème du mouvement du Soleil et des planètes principales et construit les théories et les tables de ces corps. Il présente, notamment, sa théorie de Mercure dans un **article de l'addition à la CDT pour 1848**, intitulé *Théorie du Mouvement de Mercure*. Gaillot, collaborateur de Le Verrier, améliorera ensuite les théories des quatre grosses planètes Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. À peu près à la même époque, les travaux théoriques de Hansen donnent naissance à la théorie de Neptune de l'astronome russe Kowalski et, surtout, à la théorie globale des planètes de Newcomb. Les tables de Le Verrier et Gaillot ont été utilisées dans la CDT jusqu'en 1984, mais on peut constater, en examinant la table 1, que les tables de Kowalski, puis celles de Newcomb, ont été les sources des éphémérides de Neptune publiées dans la CDT de 1863 à 1883. Il est amusant de noter que les tables

du mouvement de Neptune ne sont introduites **dans la CDT qu'en 1863** pour des raisons budgétaires (**réponse donnée par Mathieu**, en 1860, à des critiques virulentes de Le Verrier sur la CDT, **citée par Bigourdan**). Pour Uranus, les tables de Newcomb ont été utilisées de 1877 à 1883. À l'époque de Le Verrier et Gaillot, la CDT va peu à peu acquérir une forme qu'elle conservera jusqu'en 1979. En 1877, **les coordonnées rectangulaires du Soleil** sont introduites et les éphémérides d'Uranus et Neptune deviennent journalières. Les éléments moyens des huit planètes principales, d'après Le Verrier et Gaillot, et ceux des planètes telluriques d'après Newcomb sont introduits en 1914 (**Newcomb corrigé par Ross**), pour Mars, à partir de 1920. L'argument des éphémérides du Soleil et des planètes devient le Temps solaire moyen de Greenwich en 1916, puis le Temps universel TU (c'est-à-dire le Temps solaire moyen de Greenwich + 12 h), en 1925. D'une manière plus précise, cet argument est le temps uniforme de Le Verrier tiré de la théorie du Soleil de Le Verrier. Il est, en fait, très proche du Temps des éphémérides TE.