

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

## Épisode 5 : le mouvement des satellites galiléens de Jupiter

Dans ce cinquième épisode, nous allons voir les évolutions apportées dans la Connaissance des temps au mouvement des satellites galiléens de Jupiter.

### L'évolution des éphémérides des satellites galiléens de Jupiter : de la cinématique à la dynamique

Les éphémérides des satellites galiléens étaient nécessaires pour les prédictions des éclipses des satellites par Jupiter. Ces éclipses étant fondamentales pour la détermination des longitudes sur Terre, elles seront publiées très tôt dans la CDT (à partir du volume pour 1690, cf. figure 1). Les éclipses de Io sont publiées du volume pour 1690 jusqu'au volume pour 1693. Elles disparaissent à partir de l'édition pour 1694 puis réapparaissent à partir de l'édition pour 1698, cette « éclipse » n'étant pas explicable. Dans la CDT pour 1726, un article détaille la notion d'éclipse qu'il divise en deux temps, immersion et émergence qui correspondent à l'entrée dans l'ombre du satellite, et à sa sortie. Il donne aussi les temps de révolution

autour de la planète de chacun d'entre eux, et les données techniques nécessaires à l'observation : Il faut « une lunette d'approche de 10 pieds et une pendule réglée sur le moyen mouvement et mise sur le Soleil, quelques temps avant ou après l'observation ». L'auteur explique ensuite, que deux observateurs qui seraient situés sur deux longitudes différentes feraient le constat d'une différence dans l'heure du phénomène. Ainsi l'observation du phénomène, permet, après avoir réduit le temps en degrés et minutes, de donner la différence des longitudes entre les deux lieux d'observations. Rappelons que nous sommes en plein dans la période de développement de méthodes pour la création d'une carte de France, et que la détermination des longitudes en est un des socles. L'observation et la prédiction des éclipses des satellites galiléens sont donc primordiales et ne vont cesser d'être développées dans la période suivante.

Lettre d'information de l'IMCCE https://www.imcce.fr/lettre-information/ : Le feuilleton

JANVIER.		JANVIER.	
Emerfions.		Emerfions.	
jours, heur. min.		jours, heur. min.	
2	8 45 mat.	27	5 20 mat.
4	8 13 mat.	28	9 48 foir.
5	9 41 foir.	30	4 17 foir.
7	4 9 foir.		
9	10 37 mat.		
11	5 5 mat.		
12	11 33 foir.		
14	6 2 foir.		
16	0 30 foir.		
18	6 58 mat.		
20	1 26 mat.		
21	7 54 foir.		
23	2 23 foir.		
25	8 31 mat.		

FEBVRIER.		MARS.	
Emerfions.		Le 5 & 7 ☉.	
jours, heur. min.		jours, heur. min.	
1	10 46 mat.		
3	5 14 mat.		
4	11 43 foir.		
6	6 11 foir.		

AVRIL.		MAY.	
Immerfions.		Immerfions.	
jours, heur. min.		jours, heur. min.	
2	1 0 foir.	18	1 30 foir.
4	7 29 mat.	20	7 59 mat.
6	1 58 mat.	22	2 27 mat.
7	8 27 foir.	23	8 55 foir.
9	2 56 foir.	25	3 24 foir.
11	9 25 mat.	27	9 52 mat.
13	3 54 mat.	19	4 20 mat.
14	10 24 foir.	30	10 49 foir.
16	4 53 foir.		
18	11 22 mat.		
20	5 51 mat.		
22	0 20 mat.		
23	6 49 foir.		
25	1 18 foir.		
27	7 46 mat.		
29	2 15 mat.		
30	8 44 foir.		

MAY.		JUIN.	
Immerfions.		Immerfions.	
jours, heur. min.		jours, heur. min.	
2	3 12 foir.	1	5 17 foir.
4	9 41 mat.	3	11 45 mat.
6	4 10 mat.	5	6 13 mat.
7	10 39 foir.	7	0 42 mat.
9	5 7 foir.	8	7 10 foir.
11	11 36 mat.	10	1 33 foir.
13	6 4 mat.	12	8 6 mat.
15	0 33 mat.	14	2 34 mat.
16	7 1 foir.	15	9 2 foir.
		17	3 31 foir.
		19	9 59 mat.
		21	4 27 mat.
		22	10 55 foir.
		24	5 23 foir.
		26	11 51 mat.
		28	6 20 mat.
		30	0 48 mat.

FIGURE 1 – Éclipses de Io dans la CDT pour 1690

À partir de 1730, la CDT inclut les **prévisions des éclipses** des quatre satellites. Les éphémérides seront continuellement améliorées et les tables de Cassini vont remplacer celles de Maraldi, les mouvements étant toujours modélisés par des modèles cinématiques. Cependant, des améliorations sont venues de la meilleure connaissance des inégalités qui décrivent la différence entre le mouvement vrai et un mouvement uniforme. Les prédictions d'éclipses seront alors données à la seconde de temps la plus proche au lieu de la minute la plus proche.

À partir de 1735, une nouveauté est introduite dans la CDT : si les prédictions d'éclipses sont facilement

publiables, les éphémérides de positions (utiles pour identifier les satellites pour leur observation) sont difficiles à publier du fait de la vitesse des satellites : lo fait une révolution en environ un jour et demi ! La CDT a publié des graphiques de positions très utiles (figure 2 : configurations des satellites galiléens de jour en jour en 1735) qui seront publiés quasiment en continu (avec une interruption de 1760 à 1767) jusqu'en 1979 dans la CDT et de 1795 à aujourd'hui dans **l'annuaire du Bureau des longitudes**. La présentation des configurations sera modifiée à partir du volume pour 1961, remplaçant la succession journalière de points par une courbe continue (figure 2) beaucoup plus facile à utiliser.

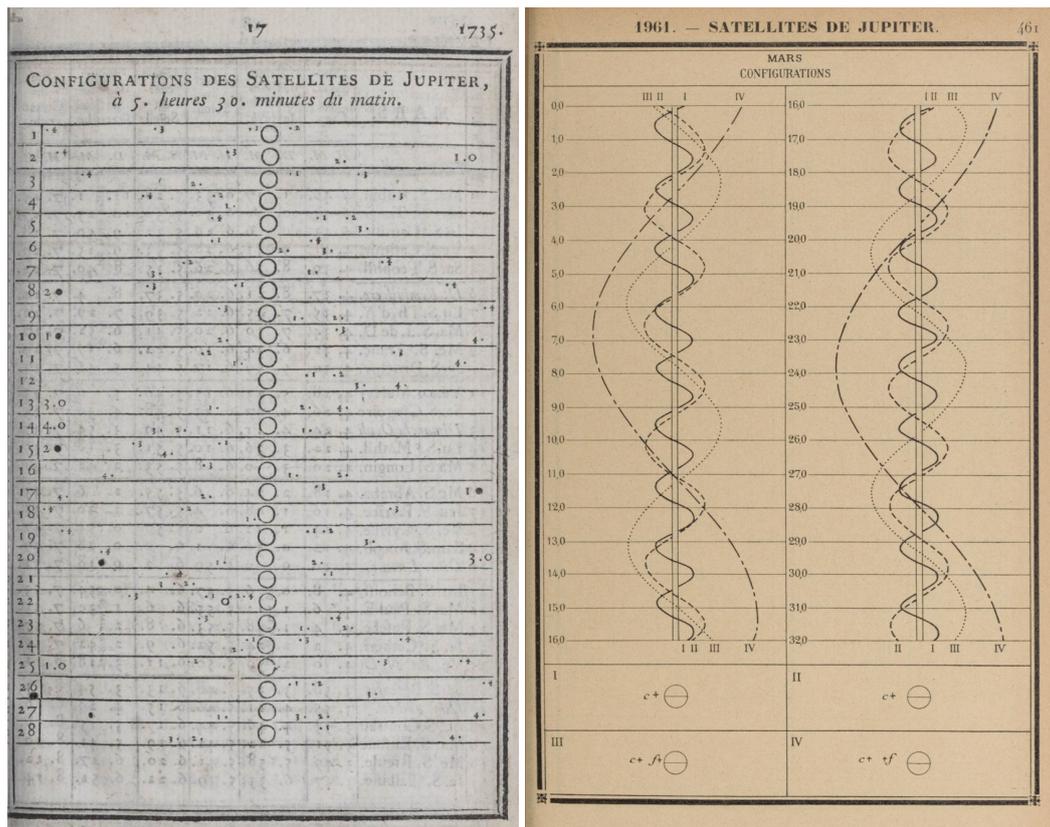


FIGURE 2 – Configurations des satellites galiléens dans la CDT pour 1735 (à gauche) et pour 1961 (à droite)

Dans le **volume pour 1760**, les astronomes étaient conscients de la mauvaise qualité des éphémérides fondées sur la cinématique, y compris même certaines inégalités : Lalande écrit que «les inclinaisons et les nœuds des orbites éprouvent des variations qui sont encore peu connues». De plus, les mauvaises éphémérides de Jupiter ont une influence sur celles des satellites d'où des erreurs sur les prédictions d'éclipses et des erreurs dans la détermination des longitudes. Des observations d'éclipses ont été faites continuellement et publiées dans la CDT (voir en particulier la figure 3 qui illustre la méthode de détermination des longitudes). D'une part, dans un lieu dont la longitude est inconnue, l'observation permet de calculer cette longitude et d'autre part, dans un lieu dont la longitude est connue, l'observation permet d'améliorer les éphémérides du satellite observé.

À partir de 1760, les tables de Wargentin remplacent celles de Maraldi. Elles seront la source des éphémérides des satellites galiléens de l'édition pour 1760 à l'édition pour 1793. Les tables de Wargentin correspondant à Callisto sont publiées dans la CDT pour 1766. La révolution se produit dans le volume pour 1789 dans lequel fut publiée une **communication de Laplace** à l'Académie des sciences où l'on peut lire l'intérêt de l'utilisation des lois de la gravitation pour modéliser le mouvement de Saturne, de Jupiter et de ses satellites. Il fait référence à Bailly qui a abandonné la cinématique pour la dynamique pour la modélisation du mouvement des satellites de Jupiter. Des années seront nécessaires avant de résoudre les problèmes liés à la résolution des équations dynamiques du mouvement.

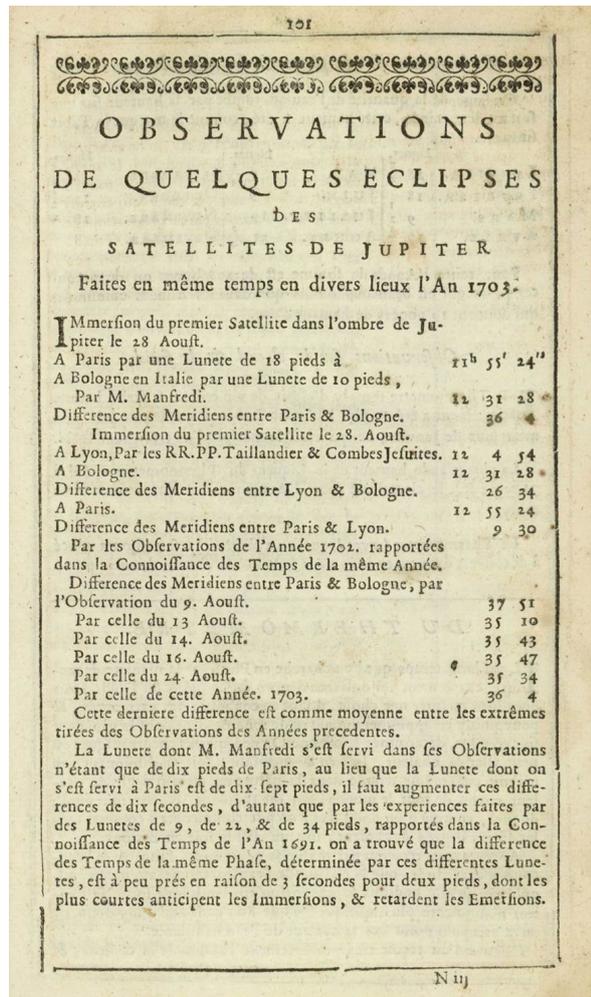


FIGURE 3 – Observations des éclipses des satellites de Jupiter donnant les longitudes des sites d'observation

À partir des éditions pour 1793 (pour Io) et pour 1794 (pour les trois autres satellites), et jusqu'à l'édition pour 1840 les tables de Delambre, fondées sur les travaux théoriques de Laplace, remplaceront celles de Wargentin. Damoiseau améliorera ensuite les éphémérides et ses tables, éventuellement complétées par Schulhof et Todd, seront la source des éphémérides des satellites jusqu'à l'édition pour 1914.

Dans le **volume pour 1891** les occultations des satellites par la planète sont introduites, calculées à partir des tables publiées par Woolhouse dans le Nautical Almanac de 1835. Les éléments elliptiques des satellites (qui décrivent les orbites) sont introduits depuis l'édition pour 1897 jusqu'à l'édition pour 1913. Ils proviennent des tables de Damoiseau.

Notons que dans la CDT pour 1807, certaines données physiques des satellites apparaissent telles que la taille (cf. figure 4). Ces données ont été déduites du passage des satellites sur le disque de Jupiter. Le temps utilisé par un satellite pour pénétrer complètement sur le disque de la planète permet de calculer sa taille grâce à sa vitesse déterminée par la mécanique céleste. Les valeurs obtenues étaient supérieures aux valeurs actuelles, sauf pour Callisto supposé trop petit.

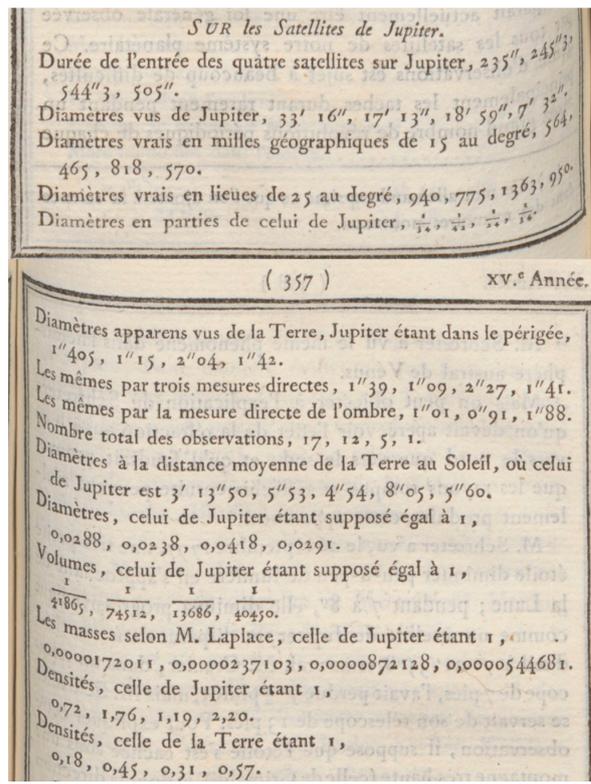


FIGURE 4 – Données physiques sur les satellites de Jupiter dans la CDT pour 1807 (an XV)

Pour les satellites galiléens, seules les prédictions d'éclipses ont été publiées dans la CDT sans les éphémérides de positions tabulées, contrairement aux planètes pour lesquelles l'ascension droite et la déclinaison ont été publiées avec une précision croissante d'année en année. En fait, trouver les satellites dans le ciel équivaut à trouver Jupiter. Cependant, les satellites doivent être identifiés autour de la planète car ils sont quatre, très semblables dans un télescope. Si des graphiques ont été publiés montrant les positions relatives des satellites jour après jour (figure 2), en 1763, une **méthode pour calculer les positions** a été publiée dans la CDT : elle a été utilisée pour construire un instrument (le jovilabe, voir figure 5) fait avec des disques mobiles et une alidade montrant les positions des satellites. Cependant, Delambre conteste ces méthodes artisanales et prône le calcul.

Dans la CDT pour 1808, il débute ainsi : « *On a imaginé divers instrumens pour trouver la position respective des quatre satellites ; dont plusieurs éphémérides présentent les configurations pour tous les jours de chaque mois. Une longue pratique m'a confirmé dans la persuasion où j'ai toujours été, que de tous les instrumens, le plus commode, le plus général, le plus sûr et même le plus expéditif, c'est le calcul. Ainsi, dans l'intention d'abrégier, autant qu'il est possible, le travail des calculateurs de la Connaissance des tems, j'ai formé les tables auxquelles, après plusieurs essais, je crois avoir enfin donné la disposition la plus avantageuse la plus propre à prévenir les erreurs* » avant d'expliquer longuement sa méthode (page 379 et suivantes).

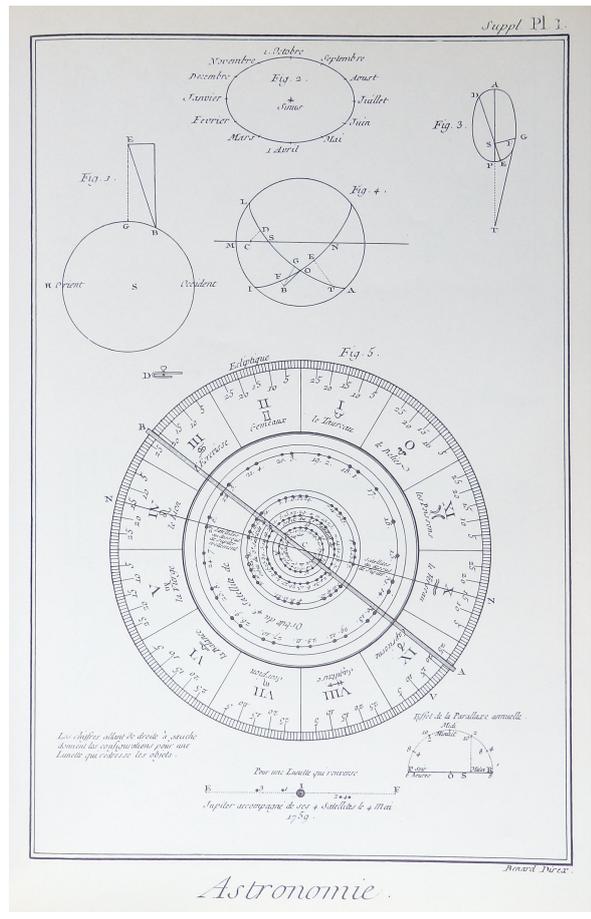


FIGURE 5 – Exemple de jovilabe issu de l’encyclopédie de Denis Diderot

La dynamique est devenue très efficace pour les planètes puisque Le Verrier a pu calculer les positions d’une planète hypothétique, jamais observée (Neptune) grâce à la mécanique céleste. Le problème restait cependant difficile pour les satellites galiléens qui se perturbent mutuellement et la première théorie dynamique réelle des satellites a été faite par R.A. Sampson et sera publiée en 1921.

Cette théorie a été adaptée par Andoyer en 1918 afin de produire des éphémérides qui seront conservées dans la CDT jusqu’en 1985 (la table 5 présente les différents modèles dynamiques utilisés dans les éphémérides).

Depuis l’édition pour 1915, la CDT a la responsabilité de calculer, à partir des nouvelles tables de Sampson (*Tables of the four great satellites of Jupiter*, Londres 1910), des éphémérides détaillées des satellites galiléens. Ce travail sera exécuté par Schulhof qui intègre dans cette édition des éléments permettant de calculer des positions individuelles de ces satellites. À partir de l’édition pour 1919, la disposition des éphémérides et la méthode de calcul sont modifiées suite à l’adaptation des tables de Sampson par Andoyer. Cette disposition sera conservée jusqu’à l’édition pour 1979. À partir de l’édition pour 1970, le calcul des éphémérides est effectué non plus d’après les tables de Sampson mais d’après sa théorie analytique jusqu’en 1985 (la table 1 présente les différents modèles dynamiques utilisés dans les éphémérides).

Il est intéressant de relever que ce n’est pas toujours le même modèle théorique qui sera utilisé dans le même volume de la CDT pour les prédictions d’éclipses, celles de passages et d’occultations, pour le calcul des configurations (qui n’a pas besoin de précision) et pour les éléments comme cela est par exemple précisé dans le volume pour 1897.

Il faut noter que, pour les autres satellites connus, des données telles que les élongations et des éléments permettant de calculer des positions ont été fournies de 1891 à 1915. Suite à un accord international (Congrès international des éphémérides astronomiques, Paris, 23-26 octobre 1911), les satellites galiléens sont confiés au Bureau des longitudes qui les publie dans la CDT à partir de 1915 (comme nous l’avons écrit plus haut) tandis que les autres satellites naturels sont confiés à l’Astronomical Almanac britannique.

Dans le même temps, l’argument de temps dans la CDT, qui était le temps moyen de Paris, est devenu le temps moyen de Greenwich suite à des accords internationaux. Cependant, l’argument du temps dans les éphémérides des satellites galiléens est resté le temps uniforme utilisé par Sampson dans sa théorie.

L’émergence de l’ordinateur électronique va complètement changer le contenu de la CDT. En 1980 apparaît une nouvelle forme de la CDT : les tables de positions disparaissent et toutes les éphémérides sont données sous la forme de développements en polynômes de Tchebychev des coordonnées différentielles X et Y par rapport au centre de la planète. Les positions peuvent être facilement calculées avec des calculatrices de poche. Les configurations et les phénomènes des satellites sont désormais publiés dans un supplément à la CDT et dans l’annuaire du Bureau des longitudes. Une autre réforme importante apparaît en 1984 : l’argument du temps des éphémérides va changer du fait de la meilleure connaissance de la rotation de la Terre. Le «temps uniforme» est abandonné au profit du Temps Terrestre (TT) construit avec le Temps Atomique International (TAI). Étonnamment, le modèle de Sampson était toujours utilisé pour les éphémérides des satellites galiléens avec son échelle de temps. Cependant, le modèle théorique a été amélioré (Lieske, 1978) puis réajusté aux observations (Arlot, 1982), comparé à de nouvelles observations et a produit des éphémérides plus précises. À partir de 2008 on utilisera les tables issues d’une intégration numérique (Lainey et al., 2006) avec le Temps Terrestre comme argument du temps. Afin de publier moins de données avec la même précision que les polynômes de Tchebychev, des fonctions mixtes mélangeant des polynômes et des fonctions périodiques ont été introduites d’abord dans les suppléments à la CDT pour 1985, puis dans la CDT elle-même, de l’édition pour 1996 à l’édition pour 2005. De plus, de l’édition pour 1996 à l’édition pour 2005, les suppléments à la CDT donnent les prédictions des phénomènes des satellites suivant une représentation polynomiale en fonction d’une variable temporelle (Thuillot, 1983).

Les progrès constants des ordinateurs et de la manière d'obtenir les éphémérides via Internet ont entraîné de nombreux changements dans la CDT année après année. À partir de 2006, les éphémérides imprimées dans la CDT sont revenues à des positions tabulées (des élongations pour les satellites) non pas pour l'interpolation mais pour vérifier les calculs effectués

par les utilisateurs sur leur ordinateur personnel. La CDT est maintenant publiée et accessible **sous forme électronique** avec des données de test, des logiciels et des explications sur les sources et la fabrication des éphémérides. Un **site web** de l'IMCCE est dédié aux calculs des éphémérides des planètes et **des satellites naturels**.

Dates	Phénomènes	Configurations	Positions	Modèle théorique
1690-1693	Éclipses de Io	non	non	Cassini
1694-1697	non	non	non	-
1698-1729	Éclipses de Io	non	non	Cassini
1730-1731	Éclipses des 4 satellites	non	non	Cassini
1732-1734	idem	non	non	Maraldi
1735-1759	idem	oui	non	Maraldi
1760-1767	idem	non	non	Wargentin
1768-1792	idem	oui	non	Wargentin
1793	idem	oui	non	Delambre-Wargentin
1794-1840	idem	oui	non	Delambre
1841-1879	idem	oui	non	Damoiseau
1880-1890	idem	oui	non	Damoiseau-Schulhof
1891-1896	Éclipses et occultations des 4 satellites	oui	non	Damoiseau-Schulhof-Woolhouse
1897-1914	idem	oui	Élongations des autres satellites	Damoiseau-Todd-Woolhouse
1915-1918	idem	oui	Éléments pour le calcul des positions	Sampson-Schulhof
1919-1969	idem	oui	idem	Sampson-Andoyer
1970-1979	idem	oui	idem	Sampson
1980-1983	non	non	Polynômes de Tchebychev	Sampson
1984-1995	non	non	idem	Sampson-Lieske-Arlot
1996-2005	non	non	Fonctions mixtes	Sampson-Lieske-Arlot
2006-2007	non	non	Élongations	Sampson-Lieske-Arlot
2008-2018	non	non	Élongations	Lainey

TABLE 1 – Évolution de la forme des éphémérides des satellites galiléens de Jupiter dans la Connaissance des temps