



Quasar 95

Une Histoire des Ephémérides

Présentation novembre 2008

Sommaire

1.	Introduction.....	2
2.	La variable temps :.....	2
2.1	Le temps usuel :.....	2
2.2	Le temps des astronomes :.....	2
3.	Les �ph�m�rides à travers les siècles.....	3
3.1	L'antiquité et le moyen âge :.....	3
3.2	Les Tables Alphonsines.....	3
3.3	Les Tables de Copernic.....	4
3.4	Les Tables Rudolphine.....	4
3.5	L'âge d'or de l'astronomie :.....	5
3.5.1	Le 18�me siècle.....	5
3.5.2	Le 19�me siècle.....	5
3.5.3	Le 20�me siècle.....	5
4.	Les �ph�m�rides du Bureau des Longitudes.....	6
5.	Les �ph�m�rides spécialisées :.....	7
5.1	Les tables nautiques :.....	7
5.2	Les �ph�m�rides des satellites :.....	7
6.	La présentation des données.....	9
6.1	La présentation classique.....	9
6.2	Modernisation de la présentation :.....	9

1. Introduction

Depuis très longtemps, l'homme a une relation particulière avec le ciel. Le ciel règle l'organisation de la vie et par conséquent semble participer à notre destin. Par extension, les hommes ont parfois été tentés de corrélérer la position des astres avec le déroulement de leur vie et pourquoi pas de lui demander de lever le voile de son destin. Cette idée a pu être confortée par le fait que certains astres avaient un comportement erratique, un peu à la manière du déroulement d'une existence humaine. Suivant la même logique, si le cours des astres est corrélé avec la vie des hommes, leur destin, c'est-à-dire leur futur est corrélé avec les positions futures des astres. Avec cette idée, l'astrologie était née, et avec elle une importante demande concernant la position future des astres.

Pour répondre à cette demande, les plus lettrés essayèrent de prévoir la position des astres, et en particulier de ceux qu'on qualifiait d'errants : les planètes. Cette activité pu devenir une sorte de commerce dans la mesure où les prédictions étaient par essence de nature *éphémère*. On appela donc ces recueils de prédictions de positions astronomiques des « éphémérides ». Le temps passant, on trouva à ces ouvrages d'autres applications que l'astrologie. Ce furent la simple quête de savoir pour ceux qu'on a longtemps appelé des « géomètres » puis ce fut au tour des marins de trouver des applications pratiques à la connaissance de la positions des astres.

Après avoir rappelé quelques notions sur le temps, on donne dans ce texte un aperçu historique sur les éphémérides.

2. La variable temps¹ :

De base, une éphéméride astronomique est un ensemble de tableaux décrivant la position des astres non fixes dans le ciel au cours du temps, c'est-à-dire jour par jour au cours de l'année et parfois avec un intervalle de temps se mesurant en heures. Il résulte de cette définition que la première colonne d'une page d'éphéméride est nécessairement le *temps*. Quelle échelle de temps doit-on utiliser pour bâtir une éphéméride ?

La question n'est pas simple et a reçu de nombreuses réponses au cours des siècles, et plus particulièrement au 20^{ème} siècle.

2.1 Le temps usuel :

En France, la première échelle de temps fut le *temps solaire vrai local*. Ce temps se lit directement sur le *cadran solaire*. Ce temps fut en usage jusqu'à la fin du 18^{ème} siècle. Ce temps présente des irrégularités qui atteignent jusqu'à 30 minutes par an par rapport à un *temps uniforme* et 50 secondes sur la durée du jour. En 1816, on lui substitua le *temps solaire moyen* qui est le *temps solaire vrai* auquel on ajoute *l'équation du temps* pour le rendre plus uniforme. Ce temps restait local et lorsqu'il était 10h00 à Paris, il était 10h22 à Strasbourg et 9h33 à Brest. Pour des raisons pratiques, on substitua à ce *temps local* le *temps solaire moyen de Paris*.

En 1891, on adopta le *temps civil* qui était le *temps solaire moyen de Paris* augmenté de 12 heures. Il est intéressant de noter que ce *temps civil* n'est toujours pas complètement rentré dans l'usage puisqu'on continue à dire 2 heures de l'après-midi pour 14 heures. En 1884 à la conférence de Washington, on prit le méridien de Greenwich comme méridien international ainsi que *l'heure solaire moyenne de Greenwich* (GMT) qui s'y rattachait. Le temps universel (TU) est par définition GMT+12. (Les anglais continuent à parler d'heures AM et PM).

En 1955 les premières horloges atomiques apparaissent. En 1978, ayant construit des horloges atomiques plus régulières que les astres, on introduisit le TAI (Temps Atomique International) et le TUC (Temps Universel Coordonné). Le TUC est un TU qui suit le TAI à moins d'une seconde près.

2.2 Le temps des astronomes :

Les astronomes n'ont pas attendu l'apparition des horloges atomique pour élaborer un temps le plus uniforme possible...

Dès la fin du 17^{ème} siècle, les astronomes utilisent le *temps uniforme* de Newton, et c'est la mécanique de Newton qui dit quel mouvement est uniforme et quel mouvement ne l'est pas. Ainsi, la mécanique prévoit une durée de l'année qui peut légèrement varier pour différentes raisons alors que la rotation de la terre sur elle-même ne présente pas (en 1^{ère} approximation) d'irrégularité. Un tel constat conduirait rapidement à prendre comme unité de temps le jour sidéral ou tout autre sous multiple. Cependant, des considérations pratiques

¹ Le lecteur intéressé pourra consulter (sur <http://www.astrosurf.com/quasar95>) l'exposé sur le temps.

conduisent à prendre comme unité le jour solaire moyen, donc indirectement de réintroduire la rotation de la Terre autour du Soleil. Ces considérations, et surtout la mise en évidence d'irrégularités dans la rotation terrestre ont conduit les astronomes à bâtir un temps un peu abstrait appelé *temps des éphémérides* (TE) Pour faire simple, ce temps est celui qui est « *en accord avec les calculs de mécanique céleste* ». Le principal défaut du TE est d'être délicat à mesurer et à manipuler. Aujourd'hui, compte tenu des observations réalisées au cours des 40 années écoulées, on a conclu que le TE et le TAI présentaient la même uniformité et on les relie par la formule :

$$TE = TAI + 32.184 \text{ secondes.}$$

3. Les éphémérides à travers les siècles

3.1 L'antiquité et le moyen âge :

Dans l'Antiquité et au Moyen Âge, l'astronomie a pour but de prédire les positions du Soleil, de la Lune et des planètes. À cet effet, les astronomes élaborent des éphémérides, ou tables, fondées sur le système géocentrique de Ptolémée. Vers 900, par exemple, l'astronome arabe al-Battani, établi en Mésopotamie, construit des tables relativement précises mais d'utilisation difficile.

À la renaissance, à côté des éphémérides assez techniques, vont apparaître les *almanachs* (mot d'origine arabe) qui mélangent des données astronomiques simples telles que les phases de la Lune ou la durée du jour avec des renseignements plus pratiques concernant l'agriculture ou la santé. Ces ouvrages connaîtront jusqu'à la première moitié du 20^{ème} siècle un succès étonnant.

3.2 Les Tables Alphonsines

Progressivement, le centre de l'astronomie remonte vers l'Andalousie, où plusieurs tables de précisions inégales et souvent concurrentes vont voir le jour : tables hachémites, tables de Tolède... Pour remettre de l'ordre, en 1248, le roi de Castille et de León Alphonse X demande à quelques astronomes arabes dirigés par un savant juif, Isaac ben Sid, de dresser de nouvelles tables, les *Tables alphonsines*; achevées en 1252, et qui furent imprimées à Venise jusqu'en 1483. D'après certains auteurs, ces tables auraient été revues vers 1320 par trois astronomes parisiens. Ces tables supplanteront rapidement les précédentes. Simples tableaux de chiffres, elles nécessitaient un mode d'emploi, ou Canons, qui furent rédigés par Jean de Saxe en 1327. L'ensemble a joui d'une très large diffusion jusqu'au milieu du 16^{ème} siècle, notamment pour des usages astrologiques. (L'astrologie étant alors jugée indispensable à la conduite des affaires publiques et privées aussi bien qu'aux traitements médicaux). On trouve dans ces tables des données sur les étoiles visibles à l'œil nu la Lune, le Soleil et les planètes connues à l'époque. Calculées pour le méridien de Tolède, elles renferment, outre des renseignements à caractère religieux :

- L'équation des jours (qui est devenue notre *équation du temps*).
- Le moyen mouvement des étoiles fixes (par l'effet de la précession).
- Les moyens mouvements de la Lune.
- Les *passions* des planètes, c'est à dire leurs stations, rétrogradations et progressions.
- Les dates d'entrée du Soleil dans les signes du zodiaque.
- Les conjonctions des planètes.
- Les éclipses de Lune.

On notera que l'amplitude totale des oscillations du midi vrai, par rapport au midi moyen, est évaluée à 32 m et 52 s, tandis qu'elle ne dépasse pas 30 m et 53 s. Cette petite différence tient aux valeurs un peu fortes utilisées pour l'excentricité et l'obliquité de l'écliptique.

Dans ces Tables Alphonsine, la durée de l'année est fixée à 365 jours, 5h 49m 16s, estimation qui excède de seulement 26 secondes la durée exacte.

On réalisera dès le 15^{ème} siècle que ces tables fournissent des positions erronées de plusieurs degrés, en raison, notamment, d'un choix incorrect de la période de précession des équinoxes (49000 ans au lieu de 26000 ans); d'autres tables deviennent alors nécessaires. Ce seront d'abord les éphémérides de Regiomontanus, qui ne couvrent cependant que la période 1475-1506.

L'astronome florentin Paolo Toscanelli les corrigea après les mesures qu'il put faire à Florence avec le gnomon qu'il construisit dans le dôme de l'église Santa Maria del Fiore.

3.3 Les Tables de Copernic

Le nombre des tables astronomiques est toujours allé, depuis, en croissant, surtout après que Copernic (1473 – 1543) eût fait connaître le nouveau système du monde et donné à l'astronomie, par cette découverte, un essor et une précision qu'elle n'avait encore jamais connus. Lui-même publia en 1543, (à titre posthume) dans son *De revolutionibus orbium coelestium*, une nouvelle collection de tables de mouvements célestes, qui ne lui avaient pas coûté moins de trente années d'observations et d'études. Successivement corrigées et augmentées par les observations de ses disciples, elles devinrent les plus correctes de toutes celles qui paraissaient à l'époque.

3.4 Les Tables Rudolphine

Les travaux de Kepler aboutissent après de longues années d'effort à la découverte des 3 célèbres lois du mouvement des corps autour du Soleil. Les lois de Kepler donnaient des résultats si précis pour l'époque, qu'en 1601, l'empereur Rodolphe II demanda à Tycho Brahe et à Kepler d'établir de nouvelles tables astronomiques, appelées Tables Rudolphine. Tycho Brahe meurt en 1601 et Kepler poursuit son œuvre. A partir des observations de Tycho Brahe et de ses propres calculs, Kepler publie les Tables Rudolphine (à partir de 1576), en l'honneur de son protecteur Rodolphe II. Ces tables incluent le mouvement elliptique des planètes. Ces tables furent aussi publiées à Linz en 1627 et réimprimées à Paris en 1650.

A la même époque (1572), l'Eglise de Rome réforme le calendrier qui devient « Grégorien ».

La précision des Tables Rudolphine fut démontrée de façon éclatante en 1631, 3 ans après la mort de Kepler, quand, le 7 novembre, selon les prédictions des tables Rudolphine, l'astronome Pierre Gassendi fut le premier à observer Mercure passer devant le Soleil en utilisant les positions données par les Tables Rudolphine.



Celles qui parurent à la même époque ou dans les années qui suivirent ne firent guère que les reproduire sous une forme quelquefois plus commode. Elles avaient pour auteurs Christian Reinhart (*Tabulae astronomicae*, 1630); Philippe Lansberg (*Tabulae motuum*, 1632); Ismaël Boulliaud (*Astronomia philolaica*, 1645); Marie Cunitz (*Urania propitia*, 1650); B. Riccioli (*Tabulae novae*, 1665), etc.

3.5 L'âge d'or de l'astronomie :

Commencé à la fin du 17^{ème} siècle, l'astronomie va faire en Europe des progrès immenses, notamment aux 18^{ème} et 19^{ème} siècles. Cet essor extraordinaire va à la fois s'appuyer sur des éphémérides de plus en plus précises mais surtout être acteur de cette précision accrue.

3.5.1 Le 18^{ème} siècle.

Pour succéder aux Tables Rudolphine et à leurs nombreux avatars, il faut citer les Tables Carolines, dues à Street, (en hommage à Charles II) . Ces tables furent publiées d'abord à Londres, en 1661, puis à Nuremberg, en 1705. Les astronomes ne les délaissèrent que pour les Tables de La Hire, parues en 1687 et complétées en 1702 sous le titre de *Tabulae astronomicae Ludovici magni*. Elles furent détrônées à leur tour par celles que donna Cassini, en 1740, dans ses *Eléments d'astronomie*, et celles-ci par les Tables de Halley, qui parurent à Londres en 1749 et qui demeurèrent les plus parfaites jusqu'à la publication des Tables de Lalande, en 1771.

Outre ces tables générales, il a été construit, en outre, au 18^{ème} siècle, un grand nombre de tables spéciales : tables du Soleil de Lacaille; tables de la Lune de Mayer, publiées par le Bureau des longitudes, et tables de la Lune de Mason, employées par les calculateurs du Nautical Almanak.

3.5.2 Le 19^{ème} siècle.

Au commencement du 19^{ème} siècle, nous avons eu principalement les tables du Soleil de Delambre, celles de la Lune de Burckhard, les tables de Jupiter et de Saturne de Bouvard, les tables de satellites de Jupiter de Damoiseau. Le nombre s'en est encore multiplié ensuite, notamment grâce aux progrès théoriques réalisés de nombreux astronomes au premier rang desquels il faut citer Lagrange et Laplace. Dans le même temps la publication des ouvrages augmente de façon notable dans toute l'Europe. Parmi les plus importantes publications, il convient de citer celles publiées par le Bureau des longitudes dans son *Annuaire* et dans la *Connaissance des temps* (voir plus loin). Elles serviront de guide aux praticiens de la navigation et de la géodésie, elles permettront aussi aux astronomes, par la découverte de petits écarts entre leurs indications et les faits observés, de perfectionner les théories et à l'occasion, de les rectifier. Dans la seconde moitié du 19^{ème} siècle, ce sont toujours les théories de Laplace qui permettront à Le Verrier puis à Gaillot de publier des tables d'une grande précision. A la fin de ce siècle, on verra aussi des astronomes non européens s'intéresser à la mécanique céleste et publier des tables. C'est en particulier le cas de l'américain Simon Newcomb (1835 – 1909). En 1870, en visite à Paris, il quitte la ville assiégée mais réussit à se procurer des résultats d'observations sur une période bien plus importante que ceux dont il disposait en Amérique. Au congrès de 1896, il est admis par la communauté des astronomes que se sont les constantes élaborées par Newcomb qui sont les meilleures. Ces publications de tables sont accompagnées de progrès sur la plan théorique, notamment avec les travaux de Félix Tisserant pour les planètes et de Hansen et Delaunay pour les théories lunaires.

3.5.3 Le 20^{ème} siècle.

La fin du 19^{ème} siècle voit à la fois le triomphe éclatant des sciences dures telles que la mécanique et l'astronomie, mais aussi les premiers questionnements qui conduiront aux lézards dans l'édifice de la physique et ouvriront la voie à la physique moderne du 20^{ème} siècle à laquelle l'astronomie va prendre une part déterminante. Le 20^{ème} siècle est donc caractérisé d'abord par de profondes remises en cause de l'espace et du temps durant le premier quart du siècle. Pour la seconde moitié du siècle, c'est l'apparition de calculateurs électroniques qui va changer le visage de la mécanique céleste et donc celui des éphémérides. Ce sont les Américains du *Naval Observatory* qui les premiers se lanceront dans l'intégration numérique des équations différentielles régissant le système solaire. Par la suite, on a mis en place des méthodes mixtes de résolution du problème à N corps qui ont à la fois l'avantage de la stabilité à long terme de l'approche analytique et la puissance de l'approche numérique.

4. Les éphémérides du Bureau des Longitudes

On fait dans cette section une sorte de « zoom » sur un ouvrage d'éphémérides parue pour la première fois il y a plus de trois siècles et qui est toujours publiée aujourd'hui, la *Connaissance des Temps*.

Cet ouvrage périodique est apparu pour la première fois en France au milieu du 17^{ème} siècle et mérite une mention particulière dans la mesure où il est encore édité de nos jours. L'ouvrage paraît en 1679 (5 ans avant les *Principia* !) sous le nom :

« *La Connoissance des Temps ou calendrier et éphémérides du lever & coucher du Soleil, de la Lune & des autres planètes* ».

Dans la préface, l'auteur Joachim Dalencé (1640-1707) nous explique que « *l'éphéméride a été épuré de toutes ces choses ridicules dont ces sortes d'ouvrages ont été remplis jusqu'à présent* ». Dalencé conserva le privilège de publier jusqu'en 1685. A cette époque, c'est Piccard qui effectue la plupart des calculs. Après avoir été confié à Lefebvre puis à Lieutaud, le privilège d'éditer cet ouvrage fut confié à l'académie des Sciences, même si Lieutaud continua à en effectuer les calculs jusqu'en 1726. Parmi les astronomes qui poursuivirent cette tâche, il faut citer Lalande de 1760 à 1776 et Méchain de 1788 à 1795. Lalande fit des calculs à partir des meilleures données disponibles à l'époque : Les Tables de l'abbé de La Caille pour le Soleil et celles de Halley pour les planètes. Comme pour la Lune, ces tables sont construites par ajustement à partir d'observations et d'un petit nombre de termes donnés par la théorie. Les calculs de Lalande seront utilisés jusqu'en 1808. A cette époque, l'argument des éphémérides est le *temps solaire vrai à Paris*.

Le *Bureau des Longitudes* (BDL) a été fondé sous la révolution par la Convention nationale (La première *assemblée nationale*) le 25 juin 1795. Les principaux buts étaient de résoudre les problèmes astronomiques liés à la détermination de la longitude en mer, stratégique à l'époque (d'où son nom), de calculer et publier les éphémérides (Appelés par continuité : *la Connaissance des Temps*) et un *annuaire*, c'est-à-dire une sorte de *calendrier officiel* « propre à régler ceux de la République », d'organiser des expéditions scientifiques dans les domaines voisins tels que la géophysique et enfin d'être un comité consultatif pour des problèmes scientifiques. L'Observatoire de Paris fût placé sous la tutelle du Bureau des Longitudes de 1795 à 1854.

Au cours des années 1770-1825, Laplace étudie les conséquences de la loi de gravitation et fait progresser la mécanique céleste d'une façon remarquable. Ces travaux progressivement vont permettre d'accroître la précision des éphémérides. Une des grandes avancées de Laplace sera d'expliquer la *grande inégalité* Jupiter-Saturne. Ayant observé que les périodes de ces astres sont dans le rapport 2/5 (11.86 ans/29.46 ans = 2/5 à 0.67% près!), il cherche une résonance à très longue période. Il montre ainsi que cette inégalité de période 919 ans est due à une résonance d'argument ($5.\lambda_{\text{Sat}} - 2.\lambda_{\text{Jup}}$), les λ étant les longitudes moyennes.

En 1821, Bouvard publia les tables d'Uranus fondées, d'une part sur 40 ans d'observation (à la lunette méridienne) et surtout sur les théories analytiques (1800) de Laplace. Disposant d'observation² de 1690 à 1771, il tenta à l'aide de ses modèles de retrouver par le calcul les coordonnées mesurées mais dut y renoncer compte tenu de la précision incertaine de ces données.

A partir de 1835, le *Temps solaire moyen* de Paris remplace le *Temps solaire vrai* de Paris dans les éphémérides.

Pendant la première moitié du 19^{ème} siècle, malgré les progrès importants apportés par les théories de Laplace, on constate une lente dérive sur la longitude d'Uranus. En 1845, cet écart atteint 2' et Arago demande à Le Verrier de regarder le problème. Ayant repris et étendu l'ensemble des calculs de perturbation causés par Jupiter et Saturne, il ramène l'écart Calcul/Observation à 20'' ce qui est encore trop. Le Verrier envisage alors l'existence d'une planète perturbatrice située à une distance double de celle d'Uranus au Soleil (suivant la loi de Titus-Bode). La planète sera trouvée par Galle pratiquement à l'endroit indiqué. On l'appela Neptune. Tisserand montrera plus tard (1889) que la précision de cette découverte est due à la compensation partielle de plusieurs erreurs fortuites.

Après ce coup de maître, Le Verrier reprend complètement la théorie des planètes du Système solaire, aidé un peu plus tard par Gaillet qui améliorera encore les modèles de Le Verrier, notamment pour les grosses planètes.

² Bien que découverte en 1781, Uranus avait été observé auparavant par Flamsteed, Bradley et Mayer qui l'avaient prise pour une étoile.

Depuis 1961, le service de calcul et de mécanique céleste assure la publication annuelle de la *Connaissance des temps*. Au début du 20^{ème} siècle, l'ouvrage adopte une forme qu'il conservera jusqu'en 1979. En 1911, il est décidé au cours d'une conférence internationale que chaque nation resterait libre du choix de ses sources. En France, les éphémérides publiées font références aux théories de Le Verrier et de Gaillot pour les planètes et à des sources américaines pour la Lune. A partir de 1980, la présentation des éphémérides subit une profonde transformation puisqu'on passe de simples tableaux numériques qu'il faut interpoler à des données sous forme de polynômes de Tchebychev qui facilitent l'interpolation numérique pour une date arbitraire.

Autres publications du BDL :

Outre l'ouvrage *Connaissance des Temps* qui fournit les éphémérides avec le maximum de précision, le BDL, devenu l'IMCCE (Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides) publie :

- L'annuaire du Bureau des longitudes de contenu plus abordable et de précision moins grande.
- Des Ephémérides Nautiques.
- (Des Ephémérides Aéronautiques).

5. Les éphémérides spécialisées :

5.1 Les tables nautiques :

Pour se positionner en mer, les marins ont fait traditionnellement usage de tables, principalement pour l'établissement du point et pour les relèvements. Tous les navires de quelque importance avaient, à bord, la *Connaissance des temps*.

Pour être utile à la détermination de la position en mer, il faut non seulement connaître la position des astres mais aussi faire quelques calculs auxiliaires. A la fin du 19^{ème} siècle, on a introduit un certain nombre de tables qui facilitaient les calculs.

Les Tables de Decante (parues de 1889 à 1892), donnent, directement, pour une latitude et une heure données, l'azimut d'un astre de déclinaison connue. Cependant, ces tables ne sont utilisables que pour les latitudes comprises entre les cercles polaires et pour les déclinaisons des astres n'excédant pas 48°. Les Tables de Perrin, sont, bien que plus condensées, beaucoup plus générales, mais elles exigent quelques calculs préliminaires. Signalons encore, pour le même usage, les tables de G. Pouvreau (1885) et celles d'E. Serres (1891).

Au 20^{ème} siècle, avant l'apparition de calculatrices fiables, les marins utilisaient les célèbres tables américaines HO-249 (en 3 volumes). Utilisées dans les années 60-70, ces tables étaient à l'origine destinées à l'aviation. Ces tables contiennent toutes les combinaisons possibles entre position estimée, déclinaison et angle horaire local. En France, le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) avait fait diffuser les tables de *Dieumegard et Bataille* qui sont l'équivalent des tables américaines en « plus léger ».

5.2 Les éphémérides des satellites :

Les satellites de Jupiter :

A partir de l'observation des 4 plus gros satellites de Jupiter par Galilée en 1609, on se rend compte que la Lune n'est pas le seul satellite du système solaire et on commence à produire des éphémérides des satellites de Jupiter. Au début, on se contente de bâtir des prévisions à partir de l'observation des éclipses en essayant de trouver des fonctions périodiques et des coefficients qui s'accordent le mieux possible avec la réalité des observations (Galilée, Hodierna, Borelli). En pratique, on fait une analyse purement cinématique. Un peu plus tard, Cassini puis Halley, Bradley et Wargentin amélioreront les modèles à partir de l'observation des éclipses.

Un peu plus tard, on essaiera de se servir des théories issues des lois de la gravitation pour représenter les mouvements des satellites, ce problème étant considéré comme voisin de celui du mouvement de la Lune. Le premier à s'y intéresser est Newton qui avait travaillé sur le mouvement de la Lune. Il sera suivi d'Euler, puis Bailly qui utilisera les travaux théoriques de Clairaut. Les progrès suivants seront dus à Lagrange qui met au point une méthode de prévision à long terme et surtout de Laplace qui reprendra les travaux de ses prédécesseurs en les améliorant largement, notamment en mettant en évidence les phénomènes de résonance. C'est Delambre qui le premier construira des tables (éphémérides) à partir des théories de Laplace. Il faut

noter qu'entre les calculs théoriques et les éphémérides utilisables, on doit faire de nombreuses transformations, l'une des plus importantes étant de passer des *positions absolues* aux *positions vues* qui dépendent elles-mêmes de la distance *instantanée* des satellites à la Terre.

Les satellites de Saturne :

Titan est découvert en 1655 par Huygens. Un peu plus tard, Cassini découvrira quatre autres satellites, Téthys, Dionée, Réa et Japet. Il fallu ensuite attendre 1898 pour découvrir Phébé... Les derniers satellites ont été découverts au 20^{ème} siècle, par Dolphus en 1966, puis à l'aide des sondes américaines. Les théories puis les éphémérides des satellites ont été publiées tardivement, principalement dans la première moitié du 20^{ème} siècle. Dans le passé, les anneaux ont suscité plus d'intérêt que les satellites. Les premiers éphémérides des satellites ont été publiés dans les années 50-60 pour 8 satellites. Actuellement, les meilleurs éphémérides connus sont ceux de Vienne et Duriez et datent des années 90. Ces éphémérides incluent Hypérion, elles concernent donc 9 satellites en tout. (Les 8 précédents et Hypérion)

Les satellites des autres planètes :

Les satellites de Mars (Phobos, Démos) ont été découverts tardivement (1877) et sont à la fois très petits et très proche de la planète. La première théorie de ces satellites a été développée en 1911 par Struve. Les éphémérides des satellites de Mars font l'objet de publications spécialisées.

Pour Uranus et Neptune, les théories ont été développées au 20^{ème} siècle et les éphémérides font l'objet de publications spécialisées. Une partie importante de ce travail fut entreprise dans le cadre des projets de la NASA, avec en particulier l'envoi des sondes *voyager I et II*.

Les comètes :

C'est Edmund Halley qui le premier en remarquant que les comètes de 1531, 1607 et 1682 avaient des éléments d'orbites proche imagina qu'il s'agissait du même objet. Il prédit par le calcul la réapparition de cet astre en 1758 (longtemps après sa mort !). Entre temps, Clairaut améliora les calculs en tenant compte de l'influence de Jupiter et Saturne et on observa le passage au périhélie le 19 mars 1759, soit 33 jours avant la date prévue. De la fin du 18^{ème} siècle au milieu du 19^{ème} siècle, on fit d'autres prévisions, notamment sur les comètes Hencke et Biela. Les éphémérides des comètes sont restées des publications spécialisées, en particulier à cause de leur condition d'observation périodiques. L'amélioration de la mécanique céleste a néanmoins permis d'améliorer la précision des prédictions comme en témoigne le tableau suivant qui donne l'évolution de la précision du calcul du passage au périhélie pour la comète de Halley.

Année de Passage	Erreur sur le passage	Auteur des prédictions	Perturbations prises en compte
1759	-33 jours	Lalande , Mme Lepaute	Jupiter, Saturne
1835	+3 jours	Pontécoulant	Jupiter, Saturne, Uranus
1910	-2 jours	Cromelin	Jupiter, Saturne, Uranus
1986	quelques minutes	Yeomans	Toutes planètes + autres forces

La Lune :

La Lune étant le second astre le plus brillant après le Soleil, elle a figuré depuis fort longtemps dans les éphémérides.

Le satellite qui donnera le plus de travail aux astronomes durant des siècles est la Lune, ceci pour deux raisons principales.

- Sa proximité de la Terre, sa masse importante et l'influence du Soleil rendent son mouvement très complexe.
- Les mesures sur cet astre sont d'une extrême précision qui incite à rechercher par le calcul une précision équivalente.

Si l'on ne considère que la prévision des phases, la période de la lunaison (29.530 jours) est connue depuis longtemps et cette prévision était relativement simple. Néanmoins, dès l'époque de Ptolémée, on connaissait déjà une inégalité de la Lune, l'évection qui modifie périodiquement la longitude de la Lune d'un degré environ. Si l'on observe la Lune avec des instruments de mesure, la régularité des phases est entachée de bien autres anomalies comme l'on constaté Tycho Brahe puis Kepler.

C'est Newton le premier qui tentera d'établir une théorie de la Lune. Il sera suivi en cela au 18^{ème} siècle par 5 grands esprits : Euler, Clairaut, D'Alembert, Lagrange et Laplace. Plus tard, Delaunay puis Hill achèveront pratiquement la tâche.

De 1760 à 1805, les éphémérides de la Lune sont basées sur les tables de la Lune de Tobias et Mayer. De 1806 à 1816, les éphémérides sont basées sur les tables de Bürg. De 1817 à 1861, ces éphémérides utilisent les tables de Burckhard. Toutes ces tables sont construites par ajustement des observations et des modèles théoriques.

A partir de 1835, on remplace le temps solaire vrai de Paris par le Temps solaire moyen de Paris. C'est à partir de 1862 avec l'introduction des tables de Hansen que les éphémérides de *Connaissance des Temps* sont entièrement basées sur la théorie. Plus tard, la théorie sera encore améliorée par Delaunay et constatant toujours de petites différences entre mesure et calcul, on commencera à se poser des questions sur la régularité du mouvement de la Terre sur elle-même, régularité sur laquelle reposait la mesure du temps.

6. La présentation des données

6.1 La présentation classique

La présentation des données de positions des astres a largement évolué au cours des siècles. D'abord, les éphémérides se sont spécialisées, laissant de côté tout ce qui n'était pas franchement scientifique tel que l'astrologie, la médecine ou le jardinage. Ensuite, l'usage en a été simplifié, les calculs fournis étant directement utilisables par l'astronome qui souhaitait pointer son instrument vers tel ou tel astre. Cette simplification a aussi été apportée par la publication annuelle des éphémérides.

Restait le problème de la précision, ou plus exactement celui du juste compromis entre la précision et la taille des tables. En effet, l'utilisateur a généralement besoin de données pour une heure précise ne figurant pas dans la table. Partant de là, pour conserver une taille raisonnable à l'éphéméride, on est conduit à un processus d'interpolation qui n'est ni simple ni rapide car il faut aller bien au-delà de l'interpolation linéaire. Au cours des années, l'intervalle de temps s'est raccourci, ce qui a permis d'augmenter la précision après interpolation.

6.2 Modernisation de la présentation :

Pour permettre d'atteindre une meilleure précision, les données astronomiques sont souvent développées en fonctions simples telles que les polynômes. Ainsi, à partir de 1979, les données de *la Connaissance des Temps* sont fournies sous forme de polynômes de Tchebychev, qui nécessitent une calculatrice mais conduisent à des tables bien plus légères pour une précision donnée. L'intérêt de ces polynômes est d'une part leur relation étroite avec les fonctions trigonométriques et d'autre part un contrôle précis et simple de l'erreur maximale. Ils sont aujourd'hui utilisés systématiquement dans les ouvrages annuels pour donner les positions des principaux corps du système solaire.

Prenons l'exemple de la position de la Lune le 1^{er} février 1980 à 0h TU. On trouve aisément (Annuaire du bureau des Longitudes 1979)

$\alpha = 8\text{h } 48.5\text{ m}$ soit 132.125° et $\delta = 16^\circ 2'$ soit 16.0333°

Connaissance des Temps donne : $\alpha = 8.80880841\text{h}$ soit 132.132126° et $\delta = 16.0324367^\circ$ avec en plus la possibilité d'obtenir avec les mêmes coefficients les coordonnées (α, δ) sur une période de 4 jours à une heure quelconque.

Usage des Tables :

Pour chaque intervalle de temps de longueur DT , on pose $x = 2.(T-T_{ini})/DT-1$. La variable x est considérée comme le cosinus d'un angle θ . T_{ini} est le début de la période DT . T_{ini} est généralement une valeur ronde. L'unité de temps est le jour.

$$F(T) = a_0.T_0 + a_1.T_1(x) + a_2.T_2(x) + a_3.T_3(x) + \dots + a_7.T_7(x)$$

Les polynômes sont donnés par $T_0=1$, $T_1(x)=x$, $T_2(x)=\cos(2.\theta)$,... $T_7(x)=\cos(7\theta)$. On sait aussi les calculer par récurrence.

L'éphéméride fournit pour chaque grandeur $F(T)$ telle que l'*ascension droite* ou la *déclinaison* les coefficients a_0, a_1, \dots, a_7 correspondants.