

Les éphémérides, passé, présent, futur

Jean-Eudes Arlot (IMCCE/observatoire de Paris)

C'est tout d'abord les fondements de la construction des éphémérides qui sont présentés, c'est-à-dire à partir de quel modèle, s'appuyant sur quelle loi ? Avant d'aborder leur longue histoire. Enfin ce sont les besoins auxquels elles répondent dans le monde actuel et futur qui sont analysés.

Une éphéméride est une table des événements journaliers et par extension, une éphéméride astronomique prévoit les événements astronomiques de chaque jour. Chacun a déjà eu en main des éphémérides astronomiques : le calendrier des postes ou les éphémérides publiées par le Bureau des longitudes ou par d'autres institutions.

Il s'agit toujours de prédictions soit de positions d'étoiles ou de leur visibilité ou non dans le ciel nocturne, soit de phénomènes astronomiques, éclipses ou plus simplement lever et coucher du Soleil, de la Lune ou d'un autre astre. Mais comment réalise-t-on ces éphémérides ? Sont-elles exactes ? Avec quelle précision ? Jusqu'à quand peut-on prévoir ?

Comment construire les éphémérides ?

Prédire les phénomènes astronomiques

Le but premier des éphémérides est de prévoir les phénomènes astronomiques. Pour cela il faut connaître le mouvement des astres impliqués dans ces phénomènes. Cette connaissance doit être assez précise pour plusieurs raisons : d'abord, ne pas trop se tromper sur l'heure du phénomène.

Dans le cas d'un lever ou coucher de Soleil, une erreur de quelques minutes sur la course du Soleil entraînera une erreur de quelques minutes sur l'heure du lever ou du coucher.

L'expérience des observations passées permettra de prévoir non seulement le phénomène mais aussi la précision de la prédiction.

Cependant dans le cas de phénomènes tels que les éclipses, la précision de la connaissance des mouvements devient plus cruciale : une imprécision dans le mouvement peut entraîner tout simplement l'inexistence du phénomène. Il est très différent de prévoir une éclipse avec 5 ou 10 minutes de retard ou de prévoir une éclipse qui n'aura pas lieu ou ne sera pas visible des observateurs qui l'attendent (des astronomes l'ont payé de leur vie...). La précision de la connaissance des mouvements est donc très importante.



La visibilité des planètes dans les constellations © LI-IMCCE.

Construire un modèle extrapolable

Concrètement, la connaissance du mouvement des astres se traduit par la fabrication d'un modèle. Le Soleil revenant chaque jour avec une périodicité de 24 heures permet de construire un modèle de mouvement circulaire uniforme de période 24 heures.

Connaissant l'inclinaison de l'axe de la Terre, on peut prédire les heures de lever et coucher du Soleil... avec une précision de l'ordre du quart d'heure, pas mieux ! Pourquoi ? Parce que le mouvement du Soleil est beaucoup plus complexe ; en particulier, l'orbite de la Terre est elliptique. On s'en est aperçu dès l'Antiquité et il a fallu construire des outils mathématiques pouvant mieux décrire le mouvement du Soleil.

On peut remarquer qu'on parle ici de mouvement du Soleil et non de mouvement de la Terre. Les mouvements sont relatifs et il suffit de modéliser le mouvement apparent du Soleil.

Pour les planètes, le problème est beaucoup plus complexe car leur mouvement apparent est assez erratique !

Par exemple la planète Mars avance puis recule puis avance à nouveau sur le fond d'étoiles pour un observateur terrestre : il n'y a pas de modèle mathématique simple qui décrit un tel mouvement et qui est surtout extrapolable dans le futur.



La rétrogradation de Mars est difficile à modéliser sans avoir une bonne représentation du Système solaire © Tunç Tezel.

Quel modèle pour les mouvements célestes ?

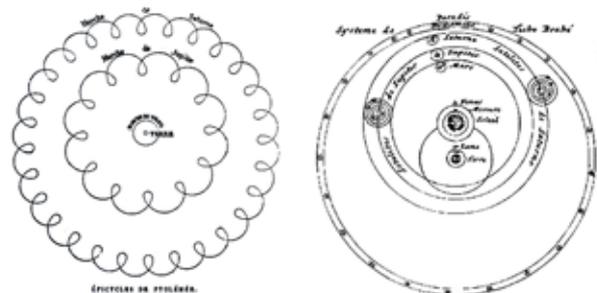
La première approche pour disposer d'un modèle de mouvement est l'approche cinématique. On observe le mouvement en notant les variations de positions et on cherche le modèle mathématique le plus proche qui pourra simuler au mieux ce mouvement. L'inconvénient est que l'extrapolation est assez aléatoire. Ainsi, un polynôme peut simuler n'importe quel mouvement avec une bonne précision en étant ajusté sur des observations régulières mais l'extrapolation est impossible : il y a divergence immédiate dès que l'on sort de la période des observations. La seconde approche consiste à essayer de trouver quelles sont les « lois naturelles » qui régissent ce mouvement. Kepler, le premier, énonce des lois simples qui décrivent bien le mouvement des planètes : il a étudié les observations de Tycho Brahé pour cela. Le problème est que ses lois ne concernent que le mouvement de deux corps dont l'un est prépondérant, alors que le Système solaire est plus peuplé. Par chance, ce système peut se décomposer en une suite de mouvements à deux corps : Soleil et une planète ou planète et un satellite et les éphémérides construites sur ces bases permettront une meilleure prédiction des phénomènes astronomiques. Ainsi, à partir de ces lois, Horrocks prévoit et observe un passage de Vénus devant le Soleil ce qui n'était pas possible auparavant. Newton va élargir et démontrer les lois de Kepler et ramener ces trois lois à une seule : la loi de la gravitation universelle. Comme les lois de Kepler, cette loi est empirique et inexplicable (une action instantanée à distance !) mais à partir de ce principe et des lois de la mécanique tous les mouvements du Système solaire s'expliquent, de même que l'aplatissement des corps en rotation et les marées. On peut désormais construire des modèles mathématiques pour tout mouvement dans le Système solaire (la mécanique céleste) avec une précision inégalée. Mieux, un écart entre les éphémérides et les observations va être résolu en ajoutant une planète encore inconnue –Neptune– pour qu'éphémérides et observations s'accordent pleinement. Le Verrier consacre là le triomphe de la mécanique céleste. Le Verrier rencontrera le même problème avec Mercure mais ce sera alors l'échec du principe de Newton incapable de décrire le mouvement de Mercure (le périhélie de Mercure avance trop vite !). La relativité générale va remplacer le principe de Newton, il n'y aura plus d'action à distance mais une courbure

de l'espace pour faire mouvoir les planètes et les éphémérides seront encore plus précises. Ainsi les éphémérides servent non seulement à prévoir les positions des astres mais aussi, par comparaison à l'observation, à valider les lois qui régissent l'univers.

Historique des éphémérides : hier et aujourd'hui

De Ptolémée à Kepler

Dès l'Antiquité, la prédiction des phénomènes astronomiques revêtait une grande importance de par l'effroi produit sur des populations redoutant le pire. Une éclipse, phénomène inexplicable, engendrait des peurs du fait que chaque phénomène constituait un présage, en général d'un malheur à venir. Les astronomes tentaient de faire ces prédictions en repérant la périodicité de certains phénomènes. Avec le système complexe mis en place par Ptolémée, on pouvait faire des éphémérides et des prédictions de phénomènes. Malgré une erreur de base sur le mouvement des planètes supposées tourner autour de la Terre, les prédictions d'éclipses étaient possibles mais sans précision et sans pouvoir dire où on les verrait à la surface de la Terre. Les Arabes étant de grands navigateurs eurent besoin d'éphémérides et on peut citer les tables de Tolède, réalisées au XI^e siècle. Plus tard, le roi Alphonse X de Castille demanda à une équipe d'astronomes d'améliorer les tables de Tolède à l'aide de nouvelles observations et les tables alphonsines furent publiées au XV^e siècle. Elles reposaient toujours, bien entendu, sur le système de Ptolémée. À la même époque, Ulugh Beg construisait les tables sultaniennes à Samarcande. Au XVI^e siècle, les nouvelles idées de Copernic incitèrent Erasmus Reinhold à construire de nouvelles tables, les tables pruteniques¹ avec de nouvelles observations.



À gauche, le Système solaire selon Ptolémée et à droite selon Tycho Brahé. Ce dernier est valable au point de vue cinématique mais pas au point de vue dynamique.

¹ Nommées ainsi en l'honneur du duc de Prusse, protecteur de Reinhold.

C'est au XVII^e siècle que Kepler établit les tables rudolphines² qui reposaient sur les lois qu'il avait énoncées et sur les observations de Tycho Brahé. Ce fut une révolution : tous les phénomènes astronomiques purent être prédits avec plus de précision. Des phénomènes tels que les passages de Vénus et Mercure devant le Soleil purent être prévus ce qui n'était pas possible auparavant.

Les « temps modernes »

Les éphémérides étaient jusqu'alors réservées à une élite autour des princes et des rois. Le mécénat permettait aux astronomes de travailler. À côté de recherches menées pour améliorer les prédictions de phénomènes, les astronomes pratiquaient l'astrologie, beaucoup plus lucrative. Le XVII^e siècle voit l'arrivée de la science telle qu'on la conçoit aujourd'hui : des sociétés scientifiques et des institutions officielles voient le jour : en France, Colbert crée l'Académie des sciences en 1666 et l'Observatoire de Paris en 1667. Il est désormais interdit aux astronomes de faire de l'astrologie qui utilise les éphémérides astronomiques mais en effectue des interprétations sujettes à caution....



La Connaissance des temps pour 1713.

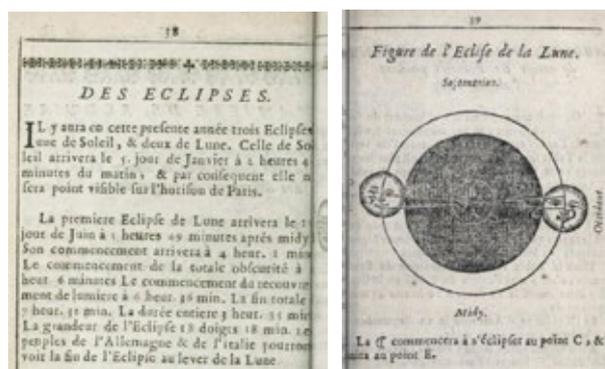
En 1679, paraissent les premières éphémérides officielles françaises : la Connaissance des temps. D'emblée, cet ouvrage veut se distinguer des nombreux almanachs qui paraissent à l'époque et rester une publication scientifique. Il comprend 4 parties :

- la première partie simple compréhensible par « les moins intelligents » est surtout destinée au grand public (calendrier, Soleil, visibilité de la Lune et des planètes) ;

- la deuxième partie concerne les marées et le réglage des pendules. On voit que les marins et la détermination du temps sont les préoccupations principales ;

- la troisième partie, plus astronomique, est destinée « aux curieux » et aux astronomes, et donne les positions des planètes ;

- la quatrième partie concerne la physique et la météorologie et peut inclure des domaines scientifiques très éloignés de l'astronomie.



Dès 1685, la Connaissance des temps pour 1685 publie les prédictions des éclipses de Lune.

Les autres pays européens suivront rapidement la France pour publier leurs éphémérides nationales. Les informations sur le temps et le réglage des horloges ainsi que sur la navigation montre bien les problèmes de l'époque. Les satellites de Jupiter vont vite avoir une place importante car ils servent aux géographes à se caler sur le temps de Paris par l'observation des éclipses de ces satellites. De même les distances lunaires utiles pour la navigation seront publiées jusqu'à l'avènement d'horloges mécaniques fiables.

De Kepler à Lalande

Quels sont les modèles mathématiques utilisés dans la Connaissance des temps ? Prenant la suite des tables rudolphines, la Connaissance des temps va, au début, être fondée sur des modèles cinématiques et sur les lois de Kepler. La précision des observations augmentant, l'imprécision des éphémérides va vite apparaître. En 1763, les éphémérides des satellites de Jupiter (dont le mouvement est particulièrement complexe) sont mauvaises. Pour le Soleil et les planètes, les astronomes et en particulier Lalande réussissent à obtenir de bons modèles cinématiques en identifiant les « inégalités », c'est-à-dire les écarts à un mouvement circulaire uniforme et à les quantifier grâce aux observations.

² En l'honneur de Rodolphe II empereur du St-Empire.

De Lalande à Le Verrier

À partir de 1770, Laplace étudie les conséquences de l'application de la loi de la gravitation universelle de Newton. Cela va lui permettre de résoudre les problèmes rencontrés jusqu'alors. Les perturbations mutuelles que les lois de Kepler ignoraient (les « inégalités ») peuvent maintenant être calculées précisément et non plus empiriquement. Le problème est alors d'écrire correctement les équations qui régissent le mouvement des corps du Système solaire sans rien oublier puis de trouver les meilleures méthodes pour les résoudre sachant – cela a été démontré – qu'il n'y a pas de solution analytique à ces équations. Le Verrier va parfaire les éphémérides en reprenant les modèles de chacun des corps. La construction d'une éphéméride pour Uranus va être l'occasion de débusquer la planète Neptune, inconnue jusqu'alors mais perturbant le mouvement d'Uranus. Malgré l'échec des éphémérides de Mercure, la mécanique céleste semble tout expliquer.

De Le Verrier à aujourd'hui

À la fin du XIX^e siècle, les éphémérides sont parfaites pour les besoins de l'époque et ne progresseront plus durant un siècle jusqu'à l'apparition de l'exploration spatiale et des premiers lancements de satellites artificiels et de sondes interplanétaires. Les éphémérides n'avaient alors plus la précision requise et la mécanique céleste avait encore son mot à dire. C'est à cette occasion que fut créé un service de recherche au Bureau des longitudes consacré aux méthodes nouvelles de la mécanique céleste assistées par ordinateur. Ce service deviendra l'IMCCE (Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides) en 1998.

Qu'en est-il aujourd'hui ? Quel est le niveau de précision des éphémérides ? Jusqu'à l'apparition des calculateurs électroniques, les méthodes mathématiques de résolution des équations différentielles des mouvements restaient incontournables et s'améliorèrent jusqu'à ce que l'informatique puisse intégrer numériquement les équations. La mécanique céleste se limitait ainsi à l'écriture des équations des mouvements, les ordinateurs se chargeant de les résoudre et de construire les tables des éphémérides. Les éphémérides publiées dans la Connaissance des temps reposent aujourd'hui (depuis 2007) sur des intégrations numériques qui évitent de chercher une solution approchée aux équations du mouvement. À

partir de conditions initiales (positions et vitesses du corps), les ordinateurs peuvent calculer les positions successives pas à pas.. La relativité générale n'a pas chassé la loi de Newton mais a apporté les corrections « relativistes » aux équations classiques de la mécanique céleste. Les astéroïdes, autrefois considérés comme négligeables, doivent aujourd'hui être pris en compte dans les équations pour obtenir des éphémérides très précises. La dynamique du Système solaire doit être considérée de manière globale.

Dates	1610	1650	1700	1800	1890	1920	1980	2010
Précision	60	4	0,5	0,08	0,02	0,01	0,005	0,001

L'ordre de précision des modèles de mouvements des satellites galiléens de Jupiter au cours du temps en secondes d'arc : la précision des éphémérides est plus faible étant donné que les observations ne se font pas avec une telle précision.

Les éphémérides aujourd'hui pour quoi faire et pour qui ?

La Connaissance des temps : les éphémérides officielles françaises

Publiées sans interruption jusqu'à aujourd'hui, la Connaissance des temps va évoluer :

- une précision accrue d'années en années ;
- une adaptation aux besoins du moment ;
- une permanence de publication des positions du Soleil, de la Lune et des planètes ainsi que des phénomènes astronomiques.

À partir de 1795, l'Annuaire du Bureau des longitudes va rassembler les éphémérides pour le grand public (lever et coucher des astres, calendriers, phénomènes astronomiques, positions des étoiles) et la Connaissance des temps va publier des données plus précises pour les astronomes et les marins.

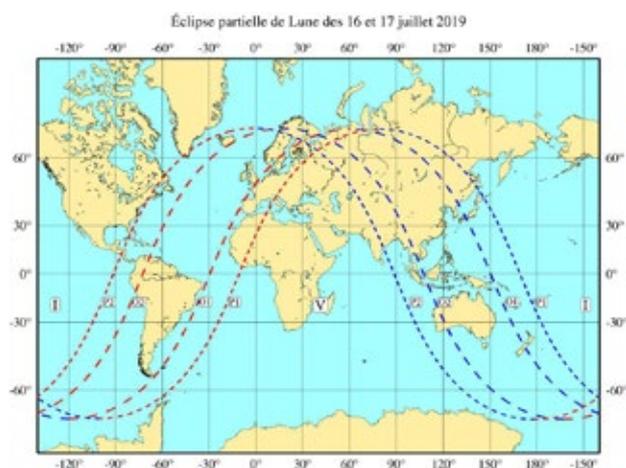
En 1889, les marins disposeront d'une nouvelle éphéméride extraite de la Connaissance des temps et adaptée à leurs besoins : les Éphémérides nautiques. En 1980, l'apparition des calculateurs électroniques va entraîner la disparition des éphémérides tabulées mais la publication d'éphémérides précises de référence va continuer malgré la disponibilité de ces éphémérides sur ordinateur.

Des éphémérides pour la société civile

Aujourd'hui les éphémérides sont disponibles sous diverses formes, en particulier via Internet. Des éphémérides imprimées simples restent nécessaire comme référence et pour comprendre ce qui est proposé, ce que sont les coordonnées de position des astres et comment comprendre les phénomènes

astronomiques prévus. Des éphémérides spécifiques sont fournies pour des besoins particuliers :

- les configurations du Soleil et de la Lune dans le ciel sont souvent demandées pour servir de preuve ou d'argument dans certaines affaires criminelles ou civiles ;
- les heures de lever et coucher du Soleil ont force de loi pour l'éclairage public ou les horaires de pêche et de chasse ;
- les aéroports ont besoin de connaître les heures de lever de Soleil et l'azimut au lever pour éviter les éblouissements des pilotes ;
- les historiens demandent la configuration des astres pour certaines époques et certains monuments ;
- les architectes ont besoin des éphémérides du Soleil pour l'orientation des bâtiments et des panneaux solaires ;
- les phénomènes tels qu'éclipses qui sont attendus par le public.



La prédiction des zones de visibilité de l'éclipse de Lune de juillet 2019 (V indique la zone de visibilité et I la zone d'invisibilité ; en France, la Lune s'est levée au moment de la totalité). © P. Rocher/IMCCE.



Pour suivre les astres mobiles, les radiotélescopes ont besoin d'éphémérides. Ici, le radiotélescope de l'observatoire de Kunming (Chine). © JEA.

Des éphémérides pour les astronomes

Les astronomes eux-mêmes ont besoin des éphémérides pour pointer leurs télescopes vers les astres qu'ils souhaitent observer.

La préparation des observations doit être minutieuse pour trouver le meilleur site (les astres doivent être hauts dans le ciel au moment le plus sombre de la nuit) au meilleur moment (les astres doivent être levés !). Les télescopes automatiques doivent être programmés avec des éphémérides permettant de suivre le mouvement des astres tout au long de la nuit.

Des éphémérides pour la recherche

Les éphémérides sont aussi un outil puissant pour la recherche et l'exploration du Système solaire. Par exemple, comment avoir des informations sur la nature interne des corps du Système solaire ?

Il se trouve que le comportement d'un corps dans son orbite va différer selon qu'il est solide ou liquide : des effets de marée entre les corps vont dissiper de l'énergie et modifier les orbites. Les éphémérides construites à partir de conditions initiales bien définies seront confrontées à des observations très précises : les différences pourront être le signe d'un modèle erroné. La dissipation d'énergie entraîne des effets cumulatifs bien visibles sur les observations comparées aux éphémérides et la structure interne des corps peut en être déduite.

Des éphémérides pour la navigation maritime : les éphémérides nautiques

Dès l'origine, les éphémérides avaient pour but d'aider les marins à faire le point en mer mais peu à peu des outils nouveaux remplacent la navigation astronomique.

Dès le XIX^e siècle, on n'utilise plus les satellites de Jupiter ni les distances lunaires³ pour régler les horloges mécaniques qui sont désormais suffisamment fiables pour garder le temps. Aujourd'hui, le GPS remplace les éphémérides nautiques et l'observation des astres pour faire le point. Cependant, ces éphémérides restent obligatoires pour les navires de haute mer ou l'aviation militaire pouvant subir une panne de ses systèmes électroniques.

3 En observant un phénomène astronomique – position des satellites de Jupiter ou distance angulaire de la Lune à un astre (étoile ou Soleil) – on pouvait régler une horloge à bord sur l'heure du méridien de référence grâce aux éphémérides de ce phénomène calculées justement pour ce méridien. La différence entre l'heure locale et l'heure du méridien de référence donnait la longitude.

Des éphémérides pour la navigation spatiale

La préparation et l'exploitation des données des missions spatiales dans le Système solaire exigent aussi d'avoir des éphémérides bien à l'avance sur des temps longs puis très précises au moment des manœuvres des sondes près des planètes. Il s'agit d'éphémérides spécifiques ajustées au mieux pour la période de la mission. En retour, les données de navigation des sondes sont utilisées pour l'amélioration des modèles.

La représentation des éphémérides

Il ne suffit pas de disposer de modèles sophistiqués décrivant le mouvement des astres, il faut aussi être capables de fournir une position à tout instant selon les besoins d'un utilisateur.

Tabulées et interpolées

Les éphémérides de positions des corps se présentent sous la forme de coordonnées, en général ascension droite et déclinaison (mais aussi coordonnées différentielles X et Y par rapport à un astre connu et facilement repérable, par exemple la planète Jupiter pour les satellites galiléens). Ces données étaient autrefois (et le sont toujours dans certaines éphémérides pour amateurs) présentées sous forme de tables de valeurs pour des dates successives entre lesquelles les coordonnées variaient peu. On pouvait alors les interpoler pour des dates intermédiaires.

JOUR		ASCENSION droite.	VARIA-TION pour 1h.	DÉCLINAISON.	VARIA-TION pour 1h.
du mois.	de la semaine.				
Jun	14	5. 30. 52,64	10,387	+23. 17. 5,0	7,23
	15	5. 35. 1,99	10,392	23. 19. 46,2	6,20
	16	5. 39. 11,46	10,397	23. 22. 2,7	5,17

Les éphémérides du Soleil sous forme de table dans la *Connaissance des temps* de 1890. Le nombre de décimales données correspond à la précision des calculs : ici le dixième de seconde d'arc. On aura le centième un siècle plus tard et le millième aujourd'hui.

Représentation polynômiale ou mixte

Avec les ordinateurs personnels, cette représentation permet de faire un calcul pour chaque coordonnée avec l'argument « temps » en entrée. On entre la date précise et on obtient les coordonnées souhaitées dans le repère souhaité. Il n'est pas possible d'effectuer le

calcul avec le modèle complet qui comprend des milliers de termes ou qui nécessite une intégration numérique et on va construire un modèle simple valable sur un temps court, période où l'on souhaite obtenir l'éphéméride. La représentation la plus simple est évidemment le polynôme du temps mais les mathématiciens ont proposé d'utiliser des polynômes plus élaborés : les polynômes de Chebychev qui ont l'avantage de nécessiter moins de termes à précision égale.

62 CONNAISSANCE DES TEMPS

1879 SATELLITE 1 DE JUPITER DT = 1 JOUR

X	JANVIER							
	0	1	2	3	4	5	6	
0	-30525	-60318	67853	15338	-5090	-464	152	8
1	48182	1283	-78279	-2094	9884	128	-148	-8
2	-42528	4065	72456	-8238	-5279	383	139	-10
3	33148	-10214	-56886	18571	4281	-689	-138	12
4	-17982	13894	30564	-22328	-2166	920	49	-10
5	-27	-14388	54	24778	17	-1089	-3	28
6	18821	134785	-30872	-22333	2188	813	-62	-15
7	-33272	-10481	57188	18713	-4314	-709	130	14
8	43293	48977	-73079	-8238	5299	378	-137	-10
9	-48496	11884	77368	-2177	-5688	133	186	-6
10	48252	-70902	-68742	11489	6147	-488	-182	7

La représentation des éphémérides d'Io sous forme de polynômes de Chebychev : les coefficients sont donnés de jour en jour et permettent de calculer les positions d'Io avec la même précision que le modèle.

Enfin, dans le cas d'un mouvement rapide pour lequel un terme périodique prépondérant apparaît, on utilise des fonctions mixtes qui allient un ou deux termes périodiques et des polynômes du temps. Cela permet de limiter le nombre de données nécessaires à précision égale. C'est le cas des satellites galiléens de Jupiter.

1886 COORDONNEES EQUATORIALES DIFFERENTIELLES DU SATELLITE 1 DE JUPITER: IO N=3.5516

	A0	A1	B0 F0	B1 F1	B2 F2	C0 F0
JAN. 1 (OH) (2448431.5)	X: +0.5953	-0.00273	+94.5903 4.749195	+0.41649 2.6910	+0.002885 3.8328	+0.1979 4.6074
A JAN. 5 (OH)	Y: +0.2170	-0.00027	+34.5796 4.754706	+0.13195 3.4880		+0.0725 4.9096

Coordonnées différentielles tangentielles données en secondes de degré dans le repère équatorial moyen de la date. $\Delta\alpha \cos\delta = X$
 $\Delta\delta = Y$

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \end{Bmatrix} = A0 + A1 \cdot t + B0 \sin(Nt + F0) + B1 \cdot t \sin(Nt + F1) + B2 \cdot t^2 \sin(Nt + F2) + C0 \sin(2Nt + F0)$$

où $t = T - T0$ avec $T0$ date du début de l'intervalle et T date du calcul

Les coefficients des fonctions mixtes représentant le mouvement de Io sur 4 jours et les formules à appliquer pour calculer les positions.

Les éphémérides aujourd'hui et demain

La précision

Les progrès encore possibles pour les éphémérides concernent bien entendu la précision. Il y a cependant des limites à cette précision.

D'abord au niveau observationnel : il faut bien comprendre que les éphémérides donnent les positions des centres de masse des objets concernés et que ce centre de masse n'est pas observable. Le

passage de la figure observée d'une planète à son centre de masse est incertain, dépassant la précision de calcul de l'éphéméride. Une chose reste certaine : les satellites naturels ou artificiels tournent autour du centre de masse du système concerné ce qui simplifie l'analyse des observations. Ainsi il vaut mieux observer un petit corps dont le centre de masse est aisément identifiable en orbite autour d'une planète plutôt que la planète elle-même pour obtenir des données qui amélioreront l'éphéméride.

Ensuite il faut que les équations dynamiques posées pour modéliser les mouvements soient complètes et n'oublie aucun corps perturbateur ni aucune force non gravitationnelle. Les corrections relativistes sont aussi désormais indispensables. Une multitude d'astéroïdes perturbent le mouvement des planètes et ils ne sont pas tous connus ou pris en compte, en particulier au-delà de Neptune. Leur influence est faible mais elle existe et peut affecter le reste du système et les prendre en compte est une façon d'améliorer les éphémérides.

Les observations utilisées pour ajuster le modèle sont cruciales : pour les planètes comme Mars qui sont observées par des sondes in situ, la précision atteint quelques centimètres mais pour les planètes lointaines telles Uranus et Neptune, la précision n'est pas meilleure que plusieurs centaines de kilomètres. Enfin, ce qui est important, c'est de pouvoir extrapoler les éphémérides dans l'avenir pour la prédiction des phénomènes ou la préparation des missions spatiales. Or, la précision des éphémérides que l'on détermine à partir de celles des observations et du modèle n'est valable que pour la période durant laquelle on a des observations. Comment la précision évolue-t-elle lorsqu'on extrapole les éphémérides ? Il existe plusieurs méthodes pour évaluer cette précision d'extrapolation et il apparaît que cette précision est d'autant meilleure que l'échantillonnage des observations utilisées pour ajuster le modèle répond à des critères précis, critères qui ne sont en général pas satisfaits (répartition régulière des observations, loi des erreurs d'observation connues). L'utilisation indispensable d'observations anciennes dont on ignore en général les repères entraîne des biais : une nouvelle analyse de ces données est une piste pour améliorer la précision d'extrapolation dans l'avenir.

La diffusion

Les éphémérides doivent être calculées et diffusées auprès des utilisateurs. On a vu qu'une représentation

simple est indispensable. Les éphémérides imprimées n'ont plus aujourd'hui d'intérêt que pour valider et vérifier des éphémérides électroniques dont l'utilisation est souvent complexe et il faut être sûr de ce que l'on calcule. La multiplicité des repères, pas toujours simples à définir, nécessite une grande vigilance pour obtenir des données précises. Les éphémérides proposées sur le réseau Internet sont multiples et on trouvera ci-dessous les différentes possibilités offertes aux utilisateurs par l'astronomie « officielle » des laboratoires de recherche. À noter que seuls deux laboratoires (IMCCE/Bureau des longitudes et Jet Propulsion Laboratory/NASA) proposent des éphémérides originales, toutes les autres n'étant que des copies plus ou moins fiables. Ces laboratoires offrent la possibilité de construire soi-même ses propres éphémérides en mettant à disposition les modèles dynamiques eux-mêmes mais leur utilisation est complexe pour le néophyte.

Éphémérides proposées par l'IMCCE ⁴:

Éphémérides pour les observateurs (Multisat) :

<http://nsdb.imcce.fr/multisat/nssephmf.htm>

Éphémérides accessibles au travers d'un script permettant d'obtenir une grande variété de données (Miriade) :

<http://vo.imcce.fr/webservices/miriade/?forms>

Éphémérides de tous les corps du Système solaire présents sur une image astronomique (Skybot) :

<http://vo.imcce.fr/webservices/skybot/?forms>

Phénomènes astronomiques :

<https://promenade.imcce.fr/fr/pages3/321.html>

Calendriers :

<https://promenade.imcce.fr/fr/pages2/279.html>

Éphémérides proposées par le JPL/NASA (Horizons) :

<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>

Conclusion

Les éphémérides des corps du Système solaire restent très utilisées et représentent de mieux en mieux les mouvements de ces corps. La demande des chercheurs ou des agences spatiales oblige à garder un niveau de qualité constant et une précision accrue. Il n'existe plus que deux laboratoires dans le monde construisant des éphémérides indépendantes et l'attention a été attirée par les astronomes sur l'importance de conserver ces expertises. En particulier, dans le cas des astéroïdes géocroiseurs pouvant présenter un danger pour la Terre, il est important que des calculs totalement indépendants puissent être faits. ■

⁴ Sans oublier le nouveau site décrit dans l'article p. 14 <https://ssp.imcce.fr>