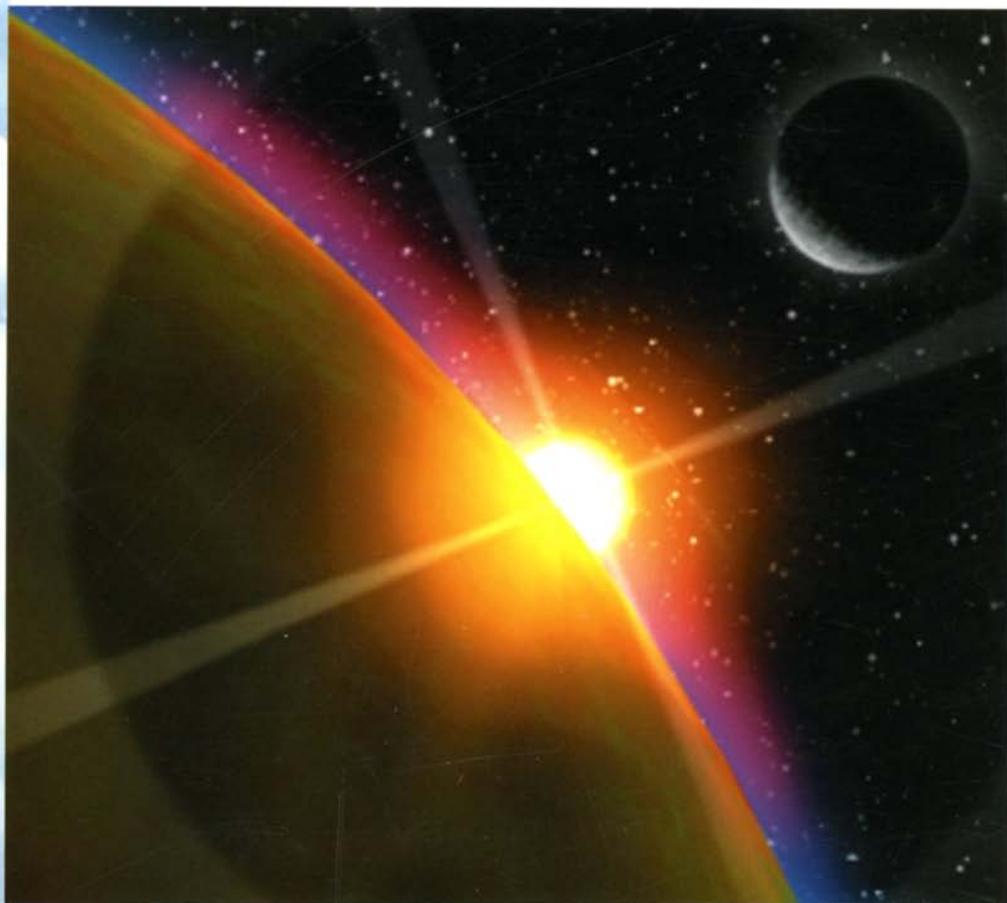


# INTRODUCTION AUX ÉPHÉMÉRIDES ASTRONOMIQUES



SUPPLÉMENT EXPLICATIF À LA CONNAISSANCE DES TEMPS

BUREAU DES LONGITUDES

# INTRODUCTION AUX ÉPHÉMÉRIDES ASTRONOMIQUES

SUPPLÉMENT EXPLICATIF À LA CONNAISSANCE DES TEMPS

Publié sous la direction de  
J.-L. Simon, M. Chapront-Touzé, B. Morando, W. Thuillot



les éditions  
  
de physique

Avenue du Hoggar  
Zone d'Activités de Courtabœuf  
B.P. 112  
91944 Les Ulis cedex A, France

ISBN : 2-86883-298-9

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les "copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective", et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, "toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite" (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 1997

## PRÉFACE

---

Jusqu'en 1995, les utilisateurs de la *Connaissance des Temps* pouvaient consulter l'introduction aux éphémérides publiées au début de chaque volume annuel pour connaître les constantes utilisées et les méthodes employées dans la construction des éphémérides des corps du système solaire. Depuis 1996, le volume annuel ne contient plus que le minimum d'explications permettant d'utiliser les tables de coefficients de la *Connaissance des Temps* et il nous a semblé judicieux de publier à part un volume explicatif plus complet où les méthodes utilisées pour construire les éphémérides sont développées et approfondies pour constituer un ouvrage de référence ayant pour but de faire le point sur la dynamique des corps du système solaire et sa représentation sous forme d'éphémérides.

Les éphémérides que nous publions dans la *Connaissance des Temps* ont pour but de donner la représentation la plus précise possible du mouvement des principaux corps célestes du système solaire pour une période donnée, représentation dont l'utilisation reste aisée. Le présent ouvrage développe les différentes étapes nécessaires pour atteindre ce but et reprend tout ce qui concourt à construire les éphémérides des objets du système solaire :

- définitions, constantes astronomiques, données et paramètres physiques de ces corps ;
- échelles de temps et systèmes de référence où vont être repérés les objets concernés ;
- réduction astrométrique des observations incluant une présentation détaillée de la précession, de la nutation, de l'aberration et de la réfraction ;
- théories des mouvements les plus récentes pour les planètes, leurs satellites, les astéroïdes et les comètes, accompagnées des formulaires nécessaires ;
- description des algorithmes de prédiction des phénomènes astronomiques ;
- méthodes d'approximation utilisées pour représenter ces mouvements sous la forme des éphémérides que l'on trouve dans la *Connaissance des Temps*.

Ces rubriques font le point d'une manière très rigoureuse sur l'état actuel des connaissances dans le domaine traité. Elles sont présentées dans le cadre de la théorie de la relativité chaque fois que le

niveau de précision l'exige. Elles comportent en outre une partie historique utile pour comprendre le cheminement qui a mené aux méthodes actuelles. Nous espérons ainsi fournir au lecteur toutes les informations nécessaires à la compréhension des travaux menant à la réalisation des éphémérides afin de pouvoir utiliser ces éphémérides pour l'analyse d'observations, le guidage de télescopes, la préparation ou l'exploitation d'expériences spatiales. Ce volume de référence permet de comprendre l'ensemble des éphémérides produites par le Bureau des longitudes, éphémérides imprimées ou fichiers mis à disposition sur notre serveur informatique. Il sera un ouvrage de référence pour les chercheurs et les étudiants intéressés par l'astronomie fondamentale, l'astrométrie et la mécanique céleste. Puisse le lecteur tirer profit de cet ouvrage, fruit d'un travail collectif de grande ampleur.

J.-E. Arlot  
*Directeur du Service*  
*des calculs et de mécanique céleste du Bureau des longitudes*

## TABLE DES AUTEURS

Jean-Eudes ARLLOT, directeur de recherche au CNRS, Bureau des longitudes.  
Annick BEC-BORSENBARGER, astronome, Bureau des longitudes.  
Pierre BRETAGNON, astronome, Bureau des longitudes.  
Victor BRUMBERG, professeur à l'Institut d'astronomie appliquée, Saint-Petersbourg.  
Nicole CAPITAINÉ, astronome, observatoire de Paris.  
Jean CHAPRONT, directeur de recherche au CNRS, Bureau des longitudes.  
Michelle CHAPRONT-TOUZÉ, chargé de recherche au CNRS, Bureau des longitudes.  
François COLAS, chargé de recherche au CNRS, Bureau des longitudes.  
Gérard FRANCOU, astronome adjoint, Bureau des longitudes.  
Jean KOVALEVSKY, membre de l'Académie des sciences.  
Jacques LASKAR, directeur de recherche au CNRS, Bureau des longitudes.  
François MIGNARD, directeur de recherche au CNRS, observatoire de la Côte d'Azur.  
Bruno MORANDO, astronome, Bureau des longitudes.  
Pascal OBERTI, astronome adjoint, observatoire de la Côte d'Azur.  
Michel RAPAPORT, astronome, observatoire de Bordeaux.  
Patrick ROCHER, astronome adjoint, Bureau des longitudes.  
Jean-Louis SAGNIER, astronome adjoint, Bureau des longitudes.  
Jean-Louis SIMON, astronome, Bureau des longitudes.  
William THUILLOT, astronome, Bureau des longitudes.  
Duong Tuyen VU, ingénieur de recherche au CNRS, Bureau des longitudes.

On trouvera un récapitulatif des contributions de chaque auteur au paragraphe 1.3

*Remerciements.* Plusieurs techniciens du Bureau des longitudes ont participé à la préparation technique de l'ouvrage. Nous remercions particulièrement Nicole BARON, technicien au CNRS (corrections d'épreuves), Thérèse DEROUAZI, technicien de recherche et de formation (saisie des manuscrits), Sylvie LEMAÎTRE-POTTIER, assistant ingénieur (réalisation des figures et relecture de l'ouvrage), Viviane RAOULT, technicien de recherche et de formation (saisie des manuscrits, corrections d'épreuves et relecture de l'ouvrage), et Christian RUATTI, ingénieur d'études au CNRS (réalisation des figures).



# SOMMAIRE

---

1. INTRODUCTION . . . . .	1
1.1. Historique de la Connaissance des Temps . . . . .	1
1.2. L'Introduction aux éphémérides astronomiques . . . . .	4
2. DÉFINITIONS ET DONNÉES ASTRONOMIQUES . . . . .	15
2.1. Introduction . . . . .	15
2.2. Système d'unités . . . . .	16
2.3. Le système UAI de constantes astronomiques . . . . .	19
2.4. Données concernant les corps du système solaire . . . . .	27
2.5. Valeurs successives des constantes astronomiques . . . . .	38
2.6. Autres constantes et unités . . . . .	46
2.7. Bibliographie . . . . .	49
3. ÉCHELLES DE TEMPS . . . . .	55
3.1. Introduction. Le temps et les astronomes . . . . .	55
3.2. Évolution des échelles de temps . . . . .	56
3.3. Le Temps universel (TU ou UT, Universal Time) . . . . .	58
3.4. Le Temps atomique international (TAI) . . . . .	59
3.5. Le Temps universel coordonné (UTC, Universal Time Coordinated) . . . . .	61
3.6. Le Temps des éphémérides (TE ou ET, Ephemeris Time) . . . . .	63
3.7. Le Temps terrestre (TT) . . . . .	64
3.8. Les échelles TDB, TCB ET TCG . . . . .	65
3.9. Relations entre les différentes échelles de temps . . . . .	67
3.10. Bibliographie . . . . .	68
4. SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE ET CHANGEMENTS DE COORDONNÉES . . . . .	75
4.1. Les systèmes de référence . . . . .	75
4.2. Les repères de référence célestes . . . . .	79
4.3. Les coordonnées publiées dans la Connaissance des Temps . . . . .	89
4.4. Passage d'un repère de référence céleste à un repère de référence terrestre . . . . .	94
4.5. Changements de coordonnées . . . . .	98
4.6. Bibliographie . . . . .	114
5. PRÉCESSION-NUTATION . . . . .	117
5.1. Introduction . . . . .	117
5.2. Description des différentes composantes du phénomène . . . . .	118
5.3. Explication schématique de la précession et de la nutation luni-solaires . . . . .	121
5.4. Représentation classique des effets de précession-nutation . . . . .	122
5.5. La précession . . . . .	125
5.6. La nutation . . . . .	135
5.7. Bibliographie . . . . .	141

6. ROTATION DE LA TERRE ET TEMPS UNIVERSEL . . . . .	143
6.1. Introduction . . . . .	143
6.2. Description de la rotation de la Terre . . . . .	144
6.3. Représentation de la rotation de la Terre . . . . .	146
6.4. Théorie de la rotation de la Terre . . . . .	148
6.5. Le Temps universel . . . . .	158
6.6. Bibliographie . . . . .	168
7. CORRECTIONS POUR LA RÉDUCTION DES OBSERVATIONS . . . . .	171
7.1. Corrections de mouvement propre, de parallaxe et d'aberration pour les étoiles . . . . .	171
7.2. Corrections de parallaxe et d'aberration pour les corps du système solaire . . . . .	185
7.3. La réfraction astronomique . . . . .	190
7.4. Bibliographie . . . . .	207
8. MOUVEMENT DES CORPS DU SYSTÈME SOLAIRE . . . . .	209
8.1. Théories planétaires . . . . .	209
8.2. La Lune . . . . .	235
8.3. Les satellites de Mars . . . . .	255
8.4. Les satellites galiléens . . . . .	263
8.5. Les satellites faibles de Jupiter . . . . .	284
8.6. Les satellites de Saturne . . . . .	288
8.7. Les satellites d'Uranus . . . . .	309
8.8. Les satellites de Neptune . . . . .	315
8.9. Charon, satellite de Pluton . . . . .	322
8.10. Les comètes . . . . .	324
8.11. Les astéroïdes . . . . .	338
8.12. Bibliographie . . . . .	340
9. PRÉSENTATION DES ÉPHÉMÉRIDES DE LA CONNAISSANCE DES TEMPS . . . . .	353
9.1. Représentation des éphémérides . . . . .	353
9.2. Éphémérides du Soleil, de la Lune et des planètes . . . . .	365
9.3. Éphémérides des satellites naturels des planètes . . . . .	379
9.4. Utilisation des éphémérides . . . . .	383
9.5. Bibliographie . . . . .	391
10. ÉPHÉMÉRIDES POUR LES OBSERVATIONS PHYSIQUES DU SOLEIL, DE LA LUNE, DES PLANÈTES ET DES SATELLITES . . . . .	393
10.1. Définition des paramètres de la rotation . . . . .	394
10.2. Définition des systèmes de coordonnées . . . . .	408
10.3. Calcul de quantités liées à la rotation . . . . .	409
10.4. Calcul de quantités liées à la phase . . . . .	411
10.5. Bibliographie . . . . .	413
GLOSSAIRE . . . . .	415
INDEX . . . . .	431
TABLE DES MATIÈRES . . . . .	441

## CHAPITRE 1

### INTRODUCTION

---

#### 1.1. HISTORIQUE DE LA CONNAISSANCE DES TEMPS

##### 1.1.1. Les origines

À la fin du dix-septième siècle les progrès considérables qu'avait connus l'astronomie, tant sur le plan théorique que sur le plan de l'observation, devaient inévitablement conduire à l'établissement et à la publication régulière de tables de positions des astres du système solaire. Certes on connaissait depuis longtemps sous le nom *d'almanach* ou *d'éphéméride* des recueils de prédictions diverses liées au calendrier. Les positions des planètes et de la Lune y étaient calculées à partir de tables fondées en partie sur des données empiriques, en partie sur des théories purement cinématiques qui permettaient de décrire les mouvements au moyen de déférents et d'épicycles. On peut citer, par exemple, les tables Alphonsines, utilisées dès le quatorzième siècle, les *Tabulae Prutenicae* (Tables Prussiennes) parues en 1551 ou les tables Rudolphines publiées par Kepler à Ulm en 1627. L'invention de l'imprimerie fut le point de départ d'une importante production d'éphémérides imprimées.

Il restait cependant à créer une publication annuelle régulière, simple à utiliser et conçue spécialement pour les utilisateurs les plus intéressés, astronomes et navigateurs mais aussi le public sans pourtant lui faire les concessions qui consistaient jusqu'alors à publier, mêlés aux tables astronomiques, des renseignements divers souvent futiles.

Avant même que Newton eût découvert les causes des mouvements des astres et eût donné les moyens les plus sûrs pour les calculer, parut pour l'an 1679 la première éphéméride digne de ce nom, la *Connaissance des Temps* dont le titre exact (avec l'orthographe de l'époque) était : "La

Connaissance des Temps ou calendrier et éphémérides du lever & coucher du Soleil, de la Lune & des autres planètes. Avec les éclipses pour l'année M.DC.LXXIX calculées sur Paris et la manière de s'en servir pour les autres élévations. Avec plusieurs autres tables & traités d'astronomie & de physique et des éphémérides de toutes les planètes en figure". Dans la préface adressée au Roi il est dit que l'éphéméride a été "épurée de toutes les choses ridicules dont ces sortes d'ouvrages ont été remplis jusqu'à présent". Si la *Connaissance des Temps* était destinée aux astronomes, elle n'oubliait pas le grand public puisque l'on peut lire dans l'Avis qui précède les tables : "Dans la première (partie) est contenue tout ce qu'on a cru utile et nécessaire à tout le monde et si facile à mettre en usage que les moins intelligens s'en peuvent servir"!

La préface n'est signée que de trois étoiles (\*\*\*) . On a cru longtemps que la personne ainsi désignée était Picard mais il semble qu'il s'agisse en fait de Joachim Dalencé (1640-1707) dont on sait peu de choses si ce n'est qu'il acheta un télescope en Angleterre en 1668 et devint l'intermédiaire entre Henry Oldenburg, le factotum de la Royal Society, et Huygens. Dalencé conserva le privilège (autorisation de publier) jusqu'en 1685 mais il est probable que Picard fit une grande partie des calculs. Après avoir été confié à Lefebvre puis à Lieutaud le privilège fut attribué en 1702 à l'Académie des Sciences mais Lieutaud continua les calculs jusqu'en 1726. Parmi les astronomes qui se chargèrent ensuite de la publication figurent Lalande de 1760 à 1776 et Méchain de 1788 à 1795.

### 1.1.2. La Connaissance des Temps de 1795 à 1979

En 1795 fut créé le Bureau des longitudes par la loi du 7 Messidor An III dont l'article 5 précisait : "Le Bureau des longitudes est chargé de rédiger la *Connaissance des Temps*, qui sera imprimée aux frais de la République, de manière qu'on puisse toujours avoir les éditions de plusieurs années à l'avance". Depuis cette époque cet organisme a assumé cette tâche sans discontinuer, un bureau des calculs se chargeant des calculs sous la direction de l'un des membres. Depuis 1961 le Service des calculs et de mécanique céleste du Bureau des longitudes, qui est aussi un laboratoire de recherche en astronomie, assure la publication annuelle de la *Connaissance des Temps*.

Au cours du dix-neuvième siècle, la composition de l'ouvrage a évolué en fonction de l'amélioration des théories du mouvement des différents astres. On se reportera aux paragraphes 8.1.1, 8.2.1 et 8.4.1 pour avoir une description détaillée de cette évolution. Au début du vingtième siècle la *Connaissance des Temps* acquiert peu à peu une forme qu'elle conservera jusqu'en 1979. Sa composition découle dans ses grandes lignes des décisions du congrès international des éphémérides astronomiques (Paris, 23-26 octobre 1911) qui a élaboré un programme de collaboration entre le Bureau des longitudes et les instituts qui remplissent le même office ; l'Union Astronomique Internationale (UAI) assure la liaison entre les services nationaux par l'intermédiaire de sa commission des éphémérides (commission 4). Une certaine répartition des tâches s'est alors établie. C'est ainsi, par exemple, que, en 1979, les coordonnées apparentes des étoiles du catalogue FK4 figurent dans le volume annuel *Apparent Places of Fundamental Stars* publié par l'Astronomisches Rechen Institut de Heidelberg. De même, les éphémérides pour les observations physiques du Soleil, de la Lune et des planètes, ainsi que les éphémérides des satellites V, VI et VII de Jupiter, de l'anneau et des neuf principaux satellites de Saturne, des quatre satellites d'Uranus et de Triton, satellite de Neptune, figurent dans l'*Astronomical Ephemeris* publié conjointement par Her Majesty's Nautical Almanac Office et le Nautical Almanac Office of the US Naval Observatory.

En revanche, la *Connaissance des Temps* est la seule à publier les positions moyennes en début d'année tropique de toutes les étoiles du catalogue FK4 et de son supplément (FK4 Supp) ainsi que les éléments des quatre satellites galiléens de Jupiter permettant de calculer la position de ces satellites. Les configurations et les phénomènes de ces satellites, calculés par le Bureau des longitudes, sont publiés sous la même forme dans la *Connaissance des Temps* et les recueils d'éphémérides étrangers.

Un autre principe, retenu par la conférence de 1911, était que les différentes éphémérides conservaient le libre choix de leurs sources. La *Connaissance des Temps* publie les éphémérides du Soleil et des planètes d'après les théories de Le Verrier et Gaillot et celles de la Lune d'après l'Improved Lunar Ephemeris ( $j=2$ ).

Jusqu'en 1979, les éphémérides du Soleil, de la Lune, des planètes principales, de Cérès, Pallas, Junon et Vesta étaient publiées dans la *Connaissance des Temps* sous forme de tableaux des valeurs des coordonnées pour des valeurs équidistantes du temps. Il fallait interpoler ces tableaux pour calculer les coordonnées pour un instant quelconque. Ce procédé était alors le seul possible du point de vue pratique, dans la mesure où les utilisateurs disposaient de moyens de calcul réduits, mais il entraînait, du fait de la précision atteinte par les théories, la publication d'un nombre élevé de pages. Il était même pratiquement impossible de publier des tables interpolables des coordonnées des corps rapides comme les satellites de Jupiter.

### 1.1.3. La Connaissance des Temps depuis 1980

Au cours de ces dernières années, la *Connaissance des Temps* a subi plusieurs modifications dans sa composition et sa présentation.

- En 1980, la publication est l'objet d'une profonde transformation.

La présentation des coordonnées sous forme de tables interpolables est remplacée par une représentation par des développements en polynômes de Tchebychev (*cf.* 9.1.3). Cette présentation réduit considérablement le volume des données publiées tout en leur conservant la précision maximale. Elle est particulièrement bien adaptée au développement des calculatrices de poche et de la micro-informatique, les coordonnées à un instant donné étant obtenues, au moyen de calculs simples, à partir d'un tableau de coefficients.

En dehors des éphémérides proprement dites, la *Connaissance des Temps* contient de nombreuses explications, des données astronomiques, des formulaires de calculs courants et des exemples.

Certaines données publiées jusqu'alors dans la *Connaissance des Temps* n'y figurent plus. On peut les trouver, soit dans d'autres publications du Bureau des longitudes, soit dans des publications étrangères. Ainsi, on trouve dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes* pour l'année en cours, les renseignements concernant les éclipses, les phénomènes et les configurations des satellites de Jupiter, les occultations d'étoiles ; dans les *Apparent Places of Fundamental Stars* publiées par l'Astronomisches Rechen Institut de Heidelberg, les positions moyennes (et aussi, bien entendu, apparentes) des étoiles du FK5 ; dans les *Éphémérides Nautiques* publiées par le Bureau des longitudes, les tables de réfraction à l'horizon. Enfin, les éphémérides, phénomènes et configurations d'un certain nombre de satellites de Jupiter, Saturne, et Uranus font l'objet de

plusieurs *Suppléments à la Connaissance des Temps* qui peuvent être obtenus sur demande au Bureau des longitudes.

- En 1984, les théories utilisées jusqu'alors comme source des éphémérides du Soleil, de la Lune et des planètes sont remplacées par les théories beaucoup plus précises établies au sein du Service des calculs et de mécanique céleste du Bureau des longitudes. Parallèlement, la *Connaissance des Temps* introduit le système de constantes astronomiques adopté par l'UAI en 1976. L'époque origine est l'époque J2000.0 correspondant à la date julienne (DJ) 2 451 545.0 (*cf.* 2.3.1) et l'échelle de temps adoptée est le Temps terrestre TT (appelé Temps dynamique terrestre TDT jusqu'en 1991), identifié à TAI + 32.184 s (*cf.* 3.7).
- En 1996, la publication est de nouveau l'objet d'importantes modifications.

La *Connaissance des Temps* et son *Supplément* relatif au mouvement des satellites de Mars, Jupiter, Saturne et Uranus sont réunis en un seul ouvrage. La *Connaissance des Temps* contient donc les coefficients des développements en polynômes de Tchebychev des coordonnées du Soleil, de la Lune, des planètes principales, de Pluton, Cérès, Pallas, Junon et Vesta et les coefficients des fonctions mixtes (*cf.* 9.1.4) des coordonnées tangentielles des satellites de Mars, des satellites galiléens de Jupiter, des huit premiers satellites de Saturne et des cinq principaux satellites d'Uranus. Elle contient de plus les prédictions des phénomènes des satellites galiléens de Jupiter.

Par ailleurs l'ouvrage contient principalement des tables numériques : les explications, bilingues en français et en anglais, ont été réduites au minimum et permettent simplement de calculer correctement les coordonnées.

## 1.2. L'INTRODUCTION AUX ÉPHÉMÉRIDES ASTRONOMIQUES (Supplément explicatif à la Connaissance des Temps)

### 1.2.1. But de l'ouvrage

L'*Introduction aux éphémérides astronomiques* poursuit deux objectifs.

- Le texte explicatif de la *Connaissance des Temps* ayant été réduit au strict minimum l'ouvrage donne, comme l'indique son sous-titre, des explications détaillées sur le contenu actuel de la *Connaissance des Temps*, les sources qu'elle utilise, les formes de présentation des coordonnées qui ont été choisies ainsi que des exemples d'utilisation.
- Mais l'*Introduction aux éphémérides astronomiques* dépasse largement le cadre strict de la *Connaissance des Temps* et nous nous sommes aussi donné comme but de faire le point sur un certain nombre de sujets d'astronomie et de mécanique céleste nécessaires à la compréhension et à l'utilisation des éphémérides.

### 1.2.2. Description sommaire de l'ouvrage

L'*Introduction aux éphémérides astronomiques* comporte neuf chapitres en dehors de cette introduction considérée comme le chapitre 1.

- 2. *Définitions et données astronomiques* (auteur : A. Bec-Borsenberger). Ce chapitre contient une présentation des systèmes d'unités (système fondamental et système UAI d'unités astronomiques) et des systèmes de constantes astronomiques UAI 1976 et IERS 1992. Il donne également un grand nombre de données astronomiques sur les objets du système solaire, aussi récentes que possible, et une analyse des valeurs successives des constantes astronomiques.
- 3. *Échelles de temps* (F. Mignard, B. Morando). Ce chapitre comporte une étude de l'évolution des échelles de temps. Il décrit les différentes échelles de temps utilisées et donne l'expression mathématique des relations qui existent entre elles ; on y trouve, en particulier, la table des principaux termes de la différence Temps dynamique barycentrique – Temps terrestre.
- 4. *Systèmes de référence et changements de coordonnées* (M. Chapront-Touzé, N. Capitaine, J.-E. Arlot). Ce chapitre distingue le concept théorique, désigné par système de référence, de sa matérialisation astronomique, désignée par repère, et étudie les systèmes de référence en mécanique newtonienne et en mécanique relativiste. Il présente un certain nombre de repères célestes couramment utilisés et décrit les coordonnées publiées dans la *Connaissance des Temps*. Il étudie les transformations entre repères terrestre et céleste. Il donne enfin un grand nombre de formules concernant les changements de coordonnées.
- 5. *Précession-nutation* (N. Capitaine, P. Bretagnon). Ce chapitre donne une définition du phénomène et de ses effets, une description et un historique des différentes composantes et une explication schématique de la précession-nutation luni-solaire. Il présente les formulaires de la précession les plus récents et la théorie UAI 1980 de la nutation.
- 6. *Rotation de la Terre et Temps universel* (N. Capitaine). Ce chapitre décrit la rotation de la Terre et donne les bases de la théorie de ce phénomène pour une Terre rigide et une Terre non-rigide. Il traite également du Temps universel, de sa détermination à partir des observations et de sa relation de définition en fonction du temps sidéral. Il propose enfin une définition plus moderne du Temps universel UT1 à partir du concept d'*origine non-tournante*.
- 7. *Corrections pour la réduction des observations*. Les deux premières parties de ce chapitre (M. Chapront-Touzé, V.A. Brumberg) traitent des corrections de mouvement propre, de parallaxe et d'aberration pour les étoiles et pour les corps du système solaire. Les formulaires sont présentés en mécanique classique puis dans le cadre de la théorie de la relativité générale. La troisième partie (J. Kovalevsky) traite de la réfraction astronomique. On y trouve une théorie approchée du phénomène ainsi qu'un grand nombre de tables permettant de calculer les différentes corrections de réfraction.
- 8. *Mouvement des corps du système solaire*. Ce chapitre comporte un grand nombre de sous-chapitres : Théories planétaires (P. Bretagnon, J.-L. Simon) ; La Lune (M. Chapront-Touzé) ; Les satellites de Mars (M. Chapront-Touzé) ; Les satellites galiléens (J.-E. Arlot, J.-L. Sagnier, W. Thuillot, D.T. Vu) ; Les satellites faibles de Jupiter (A. Bec-Borsenberger, P. Rocher) ; Les satellites de Saturne (M. Rapaport) ; Les satellites d'Uranus (J. Chapront, J. Laskar) ; Les satellites de Neptune (P. Oberti) ; Charon, satellite de Pluton (F. Colas) ; Les comètes (P. Rocher) ; Les astéroïdes (P. Rocher). D'une manière générale ces sous-chapitres comportent une partie historique,

analysent la dynamique du problème et présentent les théories les plus récentes. Chaque sous-chapitre comporte un certain nombre d'aspects plus spécifiques comme, par exemple, les formulaires donnant les éléments orbitaux des corps (théories planétaires et lunaires, satellites), une description des phénomènes (satellites galiléens), la liste des comètes périodiques, etc.

- 9. *Présentation des éphémérides de la Connaissance des Temps* (J. Chapront, G. Francou, J.-E. Arlot, J.-L. Simon). Ce chapitre donne les bases mathématiques des méthodes d'approximation utilisées pour représenter les éphémérides publiées dans la *Connaissance des Temps* (polynômes de Techebychev, approximation par des fonctions mixtes). Il décrit l'élaboration de ces éphémérides à partir des théories, explique comment les utiliser et donne des exemples de calcul.
- 10. *Éphémérides pour les observations physiques du Soleil, de la Lune, des planètes et des satellites* (B. Morando). Ce chapitre fournit les données les plus récentes sur les paramètres de rotation des corps du système solaire et donne des formulaires de calcul des quantités liées à la rotation des corps et à la phase.
- Un *glossaire* et un *index* sont donnés à la fin du volume.

### 1.2.3. Notations

Les notations sont précisées et expliquées dans chacun des chapitres où elles sont introduites. Nous nous sommes efforcés, dans la mesure du possible, de garder des notations cohérentes sur l'ensemble de l'ouvrage. Les symboles utilisés suivent en général les recommandations de l'Union Astronomique Internationale, toutefois l'origine des temps J2000.0 est notée J2000 dans les chapitres suivants. D'un point de vue typographique, les vecteurs sont représentés par des caractères gras et les points par des caractères romains.

#### 1.2.3.1. Liste des sigles utilisés

Nous donnons, dans ce paragraphe, la liste alphabétique des sigles couramment utilisés dans l'ouvrage avec leur signification et la page où ils sont introduits pour la première fois.

BIH	Bureau international de l'heure	60
BIPM	Bureau international des poids et mesures	16
BRS	Barycentric Reference System	76
CCDS	Comité consultatif pour la définition de la seconde	59
CEP	Celestial Ephemeris Pole	80
CFH	Canada France Hawaiï	310
CGPM	Conférence générale des poids et mesures	16
CIPM	Comité international des poids et mesures	16
COSPAR	Committee on Space Research	15
DGRS	Dynamically non rotating Geocentric Reference System	77
DJ	date julienne	4
EMP	Efemeridy Malykh Planet	340
ESO	European Southern Observatory	310
ET	Ephemeris Time	56

FCN	Free Core Nutation	156
GMST	Greenwich Mean Sidereal Time	96
GRS	Geocentric Reference System	77
<i>GRS</i>	Geodetic Reference System	38
GST	Greenwich Sidereal Time	95
HPOMP	High-Precision Orbits of Minor Planets	340
HRS	Heliocentric Reference System	76
IAG	International Association of Geodesy	15
IAUWG	IAU/IAG/COSPAR Working Group on cartographic coordinates and rotational elements of the planets and satellites	393
IERS	International Earth Rotation Service	15
JPL	Jet Propulsion Laboratory	79
KGRS	Kinematically non rotating Geocentric Reference System	77
LRS	Lunar Reference System	76
MERIT	Monitor Earth Rotation and Intercompare the Techniques of observation and analysis	38
MPC	Minor Planet Circulars/Minor Planets and Comets	326
NRO	Non Rotating Origin (origine non-tournante)	97
PPN	Paramètres post-newtoniens	48
PRT	Paramètres de rotation de la Terre	147
SI	Système International d'unités	16
SNLC	Satellite Nomenclature Liaison Committee	284
TAI	Temps atomique international	56
TCB	Temps coordonnée barycentrique	57
TCG	Temps coordonnée géocentrique	57
TDB	Temps dynamique barycentrique	56
TDT	Temps dynamique terrestre	56
TE	Temps des éphémérides	56
TT	Temps terrestre	57
TU	Temps universel	56
UAI	Union Astronomique Internationale	15
UT	Universal Time	56
UTC	Universal Time Coordinated (Temps universel coordonné)	61
VLA	Very Large Array	88
VLBI	Very Long Base Interferometry	88

### 1.2.3.2. Liste des publications

Nous donnons, dans ce paragraphe, la liste alphabétique des journaux astronomiques et publications utilisés, avec, éventuellement, les abréviations sous lesquelles ils figurent dans les bibliographies des différents chapitres.

*Annales de l'observatoire impérial de Paris*

*Annales de l'observatoire de Paris*

*Annales de Physique*

*Ann. Phys.*

*Annales du Bureau des longitudes*

- Annals of Harvard College Observatory*  
*Annals of Leiden Observatory*  
*Annals of Tokyo Observatory*  
*Annals of Sterrewacht Leiden*  
*Annuaire du Bureau des longitudes*  
*Astronomical Journal (The)*  
*Astronomical Papers of the American Ephemeris*  
*Astronomie (L')*  
*Astronomy and Astrophysics*  
*Astronomy and Astrophysics Supplement Series*  
*Astrophysical Journal (The)*  
*Astrophysical Journal, Letters (The)*  
*Bulletin Astronomique*  
*Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*  
*Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*  
*Bulletin de l'Institut d'astronomie théorique*  
*de Leningrad*  
*Bulletin du Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale*  
*Bulletin Géodésique*  
*Bulletin of the American Astronomical Society*  
*Celestial Mechanics*  
*Celestial Mechanics & Dynamical Astronomy*  
*Codata Bulletin*  
*Circulaires de l'Union Astronomique Internationale*  
*Comptes Rendus de l'Académie des sciences*  
*Connaissance des Temps*  
*Encyclopédie scientifique de l'univers*  
*Explanatory supplement to the Astronomical Almanac*  
*Explanatory supplement to the Astronomical Ephemeris and*  
*the American Ephemeris and Nautical Almanac*  
*Geological Society of America Special Paper*  
*Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society (The)*  
*Geophysical Research Letters*  
*Geophysical Society of America Special Paper*  
*IAU-WGRS/SGAC Circulars*  
*Icarus*  
*IERS Technical note*  
*International Astronomical Union Symposium*  
*Journal of Geodynamics*  
*Journal of Geophysical Research*  
*Journal of Physics E Scientific Instruments*  
*Mémoires de l'Académie des sciences*  
*Mémoires de l'Académie royale des sciences*  
*Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut impérial*  
*Mémoires de l'Institut de France*  
*Memoirs of the Royal Astronomical Society*
- Ann. Harvard Coll. Obs.*  
*Ann. Leiden Obs.*  
*Ann. Tokyo Obs.*  
*Ann. Sterrew. Leiden*
- Astron. J.*  
*Astron. Pap. Amer. Ephem.*
- Astron. Astrophys.*  
*Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*  
*Astrophys. J.*  
*Astrophys. J. Lett.*  
*Bull. Astron.*  
*Bull. Astron. Inst. Czechosl.*  
*Bull. Astron. Inst. Netherlands*  
*Bull. Inst. astron. theor.*  
*de Leningrad*  
*Bull. G.R.G.S.*  
*Bull. Géod.*  
*Bull. Amer. Astron. Soc.*  
*Celest. Mech.*  
*Celest. Mech. Dyn. Astron.*
- Circ. UAI*  
*Compt. Rend. Acad. sci.*
- Geo. Soc. of America Spec. Paper*  
*Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*  
*Geophys. Res. Letters*  
*Geo. Soc. of America Spec. Paper*  
*IAU-WGRS/SGAC Circ.*
- IAU Symposium*  
*J. Geodynamics*  
*J. Geophys. Res.*  
*J. Phys. E Scient. Instrum.*  
*Mém. Acad. sci.*  
*Mém. Acad. roy. sci.*  
*Mém. Acad. sci. Inst. impérial*
- Mem. Roy. Astron. Soc.*

<i>Metrologia</i>	
<i>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society</i>	<i>Monthly Notices Roy. Astron. Soc.</i>
<i>NASA publication</i>	<i>NASA publ.</i>
<i>Nature</i>	
<i>Notes cométaires du Bureau des longitudes</i>	
<i>Notes scientifiques et techniques du Bureau des longitudes</i>	
<i>Pis'ma Astronomicheskij Zhurnal</i>	<i>Pis'ma Astron. Zh.</i>
<i>Publications de l'observatoire Central Nicolas de St Petersburg</i>	<i>Pub. Obs. Cent. Nicolas St Petersburg</i>
<i>Publications of the Astronomical Institute of the Czechoslovak Academy of Sciences</i>	<i>Pub. of the Astron. Inst. of the Czechoslovak Acad. of Sci.</i>
<i>Publications of the Astronomical Society of Japan</i>	<i>Pub. of the Astron. Soc. of Japan</i>
<i>Publications of the Astronomical Society of the Pacific</i>	<i>Pub. of the Astron. Soc. of the Pacific</i>
<i>Science</i>	
<i>Sky and Telescope</i>	
<i>Smithsonian Astrophysical Observatory Special Report</i>	<i>Smithsonian Astrophys. Observ. Special Report</i>
<i>Soviet Astronomy</i>	<i>Soviet Astron.</i>
<i>Supplément à la Connaissance des Temps</i>	
<i>Tables astronomiques publiées par le Bureau des longitudes</i>	
<i>Transactions of the International Astronomical Union</i>	<i>Trans. IAU</i>
<i>Veröffentlichungen des Astronomisches Rechen-Institute Heidelberg</i>	<i>Veröff. Astron. Rechen-Institute Heidelberg</i>
<i>Veröffentlichungen der Universitäts-Steinwarte zu Berlin Babelsberg</i>	<i>Veröff. Univ. Sternw. Berlin Babelsberg</i>
<i>Vistas in Astronomy</i>	<i>Vistas in Astron.</i>

#### 1.2.4. Liste des tables

	<i>Page</i>
2.1 Unités de base du Système International d'Unités (SI).	16
2.2 Unités supplémentaires (SI).	18
2.3 Unités de base du système UAI d'unités astronomiques.	18
2.4 Correspondance entre les unités de temps.	20
2.5 Correspondance entre les unités de distance dans les systèmes UAI 1976 et IERS 1992.	20
2.6 Constantes de définition, constantes primaires et constantes dérivées dans les systèmes UAI 1976 et IERS 1992.	22-23
2.7 Rapport de la masse du Soleil aux masses des planètes principales.	23
2.8 Masses des petites planètes exprimées en masse solaire.	24
2.9 Rapports des masses des principaux satellites de Jupiter, Saturne et Neptune à la masse de la planète centrale.	24
2.10 Rayons équatoriaux des planètes, de la Lune et du Soleil.	24
2.11 Champ de gravitation des planètes : coefficients des harmoniques.	25

2.12	Champ de gravitation de la Lune : coefficients des harmoniques.	26
2.13	Périodes de révolution sidérale et de rotation des planètes.	27
2.14	Éléments orbitaux des satellites.	28-30
2.15	Masses des corps célestes et constantes gravitationnelles correspondantes.	31
2.16	Figures géométriques représentant le Soleil, les planètes et la Lune.	32
2.17	Masses des principaux satellites.	34-35
2.18	Demi-diamètre ; masse ; masse volumique ; magnitude visuelle à l'opposition ; albédo géométrique.	36-37
3.1	Évolution des échelles de temps.	57
3.2	Différence TAI – UTC du 1 janvier 1972 au 1 juillet 1997.	62
3.3	Différence TDB – TT.	69-74
4.3.1	Valeurs maximales des corrections qui peuvent être introduites dans les éphémérides des satellites. Influence sur les distances.	92
4.5.1	Les coordonnées célestes usuelles.	104
4.5.2	Coordonnées célestes incluant des termes d'aberration.	105
5.1	Rapport de la masse du Soleil à la masse des planètes et incertitude relative.	127
5.2	Nutations en longitude et en obliquité rapportées à l'écliptique et à l'équinoxe moyens de la date.	138-139
6.1	Développement des coordonnées du CEP dans le repère équatorial moyen de l'époque J2000.	157
7.3.1	Correction complémentaire de la réfraction atmosphérique dépendant de la température.	194
7.3.2	Correction complémentaire de la réfraction atmosphérique dépendant de la pression.	195
7.3.3	Réfraction normale pour des distances zénitales comprises entre 70° et 90°.	198
7.3.4	Valeur du facteur correctif dépendant de la température.	199
7.3.5	Valeur du facteur correctif dépendant de la pression.	200
7.3.6	Valeur du facteur correctif dépendant de la longueur d'onde.	201
7.3.7	Valeur du facteur correctif dépendant de l'humidité.	201
7.3.8	Valeur du facteur correctif dépendant de la latitude de l'observateur.	202
7.3.9	Valeur du facteur multiplicatif dépendant de l'altitude de l'observateur.	202
8.1.1	Sources et argument des éphémérides du Soleil et des planètes publiées dans la <i>Connaissance des Temps</i> depuis 1809.	212
8.1.2	Comparaison entre les éléments elliptiques et la masse de Neptune issus des premières observations et les valeurs de Le Verrier et Adams.	213
8.1.3	Rapport de la masse du Soleil à la masse des systèmes planétaires.	223
8.1.4	Plus grosses différences entre VSOP82 et DE200 sur [1891, 2000] pour les coordonnées héliocentriques des huit planètes principales.	227
8.1.5	Précision globale des éphémérides du Soleil et des planètes principales publiées dans la <i>Connaissance des Temps</i> .	227
8.2.1	Évolution du terme quadratique dans la longitude moyenne tropique de la Lune.	240

8.2.2	Constantes de DE200/LE200.	246
8.2.3	Constantes du problème principal.	248
8.2.4	Autres constantes du problème complet.	250
8.2.5	Contributions aux moyens mouvements du périégée et du nœud.	250
8.2.6	Contributions aux termes quadratiques de la longitude moyenne et des longitudes du périégée et du nœud.	250
8.2.7	Nombre de termes dans les séries tronquées de ELP 2000–82.	251
8.2.8	Arguments fondamentaux et longitudes moyennes du périégée et du nœud issus de ELP 2000–85.	251
8.2.9	Estimation de l'erreur interne maximale de ELP 2000–82.	252
8.2.10	Éléments moyens de l'orbite de la Lune rapportés à l'écliptique et à l'équinoxe moyens de la date.	254
8.2.11	Comparaison entre les éléments moyens et les éléments osculateurs pour une date donnée.	254
8.2.12	Périodes usuelles.	254
8.3.1	Valeurs approchées d'éléments des orbites de Phobos et Déimos.	257
8.3.2	Éléments moyens de Struve rapportés à J2000.	261
8.3.3	Données sur les termes périodiques des éléments de Struve.	262
8.4.1	Évolution des prédictions publiées dans la <i>Connaissance des Temps</i> .	264–265
8.4.2	Différentes valeurs des accélérations séculaires des satellites galiléens.	269
8.5.1	Extremums des éléments écliptiques des satellites lointains de Jupiter sur [1900, 2050].	285
8.5.2	Coordonnées planétocentriques équatoriales pour l'époque J2000 pour les satellites lointains de Jupiter.	286
8.5.3	Caractéristiques des ajustements des orbites de JVI, JVII, JVIII et JIX.	287
8.5.4	Caractéristiques des ajustements des orbites de JX, JXI, JXII et JXIII.	287
8.6.1	Liste des satellites de Saturne, avec la date et l'auteur de la découverte.	289
8.6.2	Principales caractéristiques des neuf premiers satellites de Saturne.	291
8.6.3	Éléments orbitaux initiaux de Mimas, Encelade, Téthys et Dioné.	295
8.6.4	Moyens mouvements et vitesses séculaires des nœuds et des périastres de Mimas, Encelade, Téthys et Dioné.	295
8.6.5	Paramètres associés aux librations affectant les couples Mimas-Téthys et Encelade-Dioné.	295
8.6.6	Éléments orbitaux initiaux de Rhéa.	297
8.6.7	Éléments orbitaux initiaux de Titan.	298
8.6.8	Éléments orbitaux initiaux de Japet.	300
8.6.9	Éléments orbitaux initiaux d'Hypérior.	302
8.6.10	Conditions initiales de l'orbite de Phœbé.	303
8.6.11	Principales caractéristiques des nouveaux satellites de Saturne.	304
8.7.1	Éléments d'orbite des cinq satellites principaux d'Uranus.	310
8.7.2	Masses et fréquences des cinq satellites principaux.	313
8.8.1	Paramètres du système de Neptune.	316
8.8.2	Éléments orbitaux planétocentriques moyens de Triton.	317
8.8.3	Éléments orbitaux barycentriques moyens de Néréide.	317
8.8.4	Éléments orbitaux planétocentriques moyens de Protée, Larissa et Despina.	320
8.8.5	Éléments orbitaux planétocentriques moyens de Galatée, Thalassa et Naïade.	321

9.2.2.4. Types de coordonnées . . . . .	369
9.2.2.5. Paramètres de représentation . . . . .	369
9.2.3. Éphémérides de la Connaissance des Temps . . . . .	370
9.2.3.1. Éphémérides publiées pour le Soleil, la Lune et les planètes . . . . .	370
9.2.3.2. Échelle de temps . . . . .	371
9.2.3.3. Système de référence . . . . .	371
9.2.3.4. Temps sidéral et nutation . . . . .	372
9.2.3.5. Correction de l'aberration des fixes . . . . .	372
9.2.3.6. Calcul des coordonnées . . . . .	373
9.2.3.7. Coordonnées moyennes J2000 . . . . .	373
9.2.3.8. Coordonnées apparentes et astrométriques . . . . .	374
9.2.3.9. Temps de passage du Soleil . . . . .	376
9.2.3.10. Paramètres de représentation . . . . .	376
9.3. ÉPHÉMÉRIDES DES SATELLITES NATURELS DES PLANÈTES . . . . .	379
9.3.1. Sources des éphémérides . . . . .	379
9.3.2. Échelle de temps . . . . .	379
9.3.3. Calcul des coordonnées . . . . .	379
9.3.4. Précision des éphémérides . . . . .	380
9.3.5. Représentation des éphémérides des satellites naturels des planètes . . . . .	381
9.4. UTILISATION DES ÉPHÉMÉRIDES . . . . .	383
9.4.1. Description des éphémérides publiées dans la Connaissance des Temps . . . . .	383
9.4.2. Calcul d'une coordonnée . . . . .	384
9.4.3. Dérivées des développements . . . . .	385
9.4.4. Calcul d'une date de phénomène . . . . .	386
9.4.5. Exemples . . . . .	386
9.5. BIBLIOGRAPHIE . . . . .	391
<b>10. ÉPHÉMÉRIDES POUR LES OBSERVATIONS PHYSIQUES DU SOLEIL, DE LA LUNE, DES PLANÈTES ET DES SATELLITES . . . . .</b>	<b>393</b>
10.1. DÉFINITION DES PARAMÈTRES DE LA ROTATION . . . . .	394
10.2. DÉFINITION DES SYSTÈMES DE COORDONNÉES . . . . .	408
10.3. CALCUL DE QUANTITÉS LIÉES À LA ROTATION . . . . .	409
10.4. CALCUL DE QUANTITÉS LIÉES À LA PHASE . . . . .	411
10.5. BIBLIOGRAPHIE . . . . .	413
GLOSSAIRE . . . . .	415
INDEX . . . . .	431
TABLE DES MATIÈRES . . . . .	441



# INTRODUCTION AUX ÉPHÉMÉRIDES ASTRONOMIQUES

**R**édigée par des spécialistes, l'Introduction aux éphémérides astronomiques (supplément explicatif à la Connaissance des Temps) donne les bases d'astronomie et de mécanique céleste nécessaires à la compréhension et à l'utilisation des éphémérides des corps du système solaire. Elle

traite des sujets suivants :

- systèmes d'unités et données astronomiques concernant les corps du système solaire ;
- échelles de temps utilisées dans les éphémérides ;
- systèmes de référence dans lesquels sont repérés les corps célestes ;
- corrections à apporter aux observations (précession-nutation, aberration, réfraction) ;
- théorie de la rotation de la Terre ;
- description des solutions les plus récentes des mouvements des corps du système solaire ;

- présentation des éphémérides de la Connaissance des Temps ;
- éphémérides pour les observations physiques du Soleil, de la Lune, des planètes et des satellites.



Chaque chapitre présente avec rigueur et précision l'état actuel des connaissances sur le sujet traité et comporte une partie historique. L'ouvrage contient un grand nombre de tables et de figures et est accompagné d'un glossaire.

L'Introduction aux éphémérides astronomiques constitue une publication de référence pour les astronomes, les chercheurs, les étudiants, et, plus généralement, les lecteurs intéressés par l'astronomie fondamentale, l'astrométrie et la mécanique céleste.

## SUPPLÉMENT EXPLICATIF À LA CONNAISSANCE DES TEMPS

ISBN : 2-86883-298-9



9 782868 832986

les éditions  
  
de physique