

Introduction
aux **ÉPHÉMÉRIDES**
et **PHÉNOMÈNES**
ASTRONOMIQUES

**SUPLÉMENT EXPLICATIF
À LA CONNAISSANCE DES TEMPS**

PUBLICATION COORDONNÉE PAR
JÉRÔME BERTHIER, PASCAL DESCAMPS & FRANÇOIS MIGNARD

Introduction aux ÉPHÉMÉRIDES et PHÉNOMÈNES ASTRONOMIQUES

Cette nouvelle version de l'*Introduction aux éphémérides astronomiques* est un guide théorique et pratique qui présente les calculs nécessaires à la compréhension des phénomènes célestes. Rédigée par des spécialistes de l'Observatoire de Paris, de l'Observatoire de la Côte d'Azur et du Bureau des longitudes, elle vise un public d'amateurs et de curieux, mais aussi les experts et professionnels à la recherche de formulaires précis, de constantes numériques les plus à jour et de l'ensemble des conventions indispensables pour le traitement des données astronomiques.

Le lecteur y trouvera traités en détail :

- les systèmes d'unités et les valeurs de référence relatifs aux corps du Système solaire ;
- les échelles de temps les plus communes utilisées dans les éphémérides et les mesures astronomiques ;
- les systèmes de référence nécessaires au repérage des corps célestes à toutes les échelles de distance ;
- le mouvement des planètes et les théories du mouvement des corps du Système solaire ;
- les propriétés des petits corps, comme les astéroïdes et les comètes ;
- le mouvement de satellites artificiels et leur visibilité depuis le sol ;
- les formulaires de correction des observations ;
- les éclipses de Lune et de Soleil, les passages de Mercure et de Vénus devant le Soleil ;
- les phénomènes astronomiques du quotidien, ainsi que les saisons et le calendrier.

Cet ouvrage présente avec rigueur l'état actuel des connaissances sur les sujets traités, avec l'ambition constante d'être un guide pratique sans pour autant négliger le cadre théorique lorsqu'il est nécessaire à la compréhension, ainsi qu'un grand nombre d'introductions historiques dans chaque chapitre. Constitué de plus de deux cents figures et autant de tables, il est accompagné d'un glossaire astronomique et d'une bibliographie détaillée.

Si certains chapitres sont clairement destinés aux chercheurs et astronomes, d'autres ont été rédigés à l'intention d'un public moins averti, mais tout autant intéressé par l'astronomie fondamentale et la mécanique céleste, ou simplement à la recherche de données de référence dans ces domaines.



ISBN EDP 978-2-7598-2414-4
ISBN IMCCE 978-2-910015-86-2

IMCCE
l'Observatoire | PSL

edp sciences

Introduction
aux **ÉPHÉMÉRIDES**
et **PHÉNOMÈNES**
ASTRONOMIQUES

**SUPPLÉMENT EXPLICATIF
À LA CONNAISSANCE DES TEMPS**

PUBLICATION COORDONNÉE PAR
JÉRÔME BERTHIER, PASCAL DESCAMPS & FRANÇOIS MIGNARD

© IMCCE et EDP Sciences, Paris, 2021

Illustration de couverture

Éclipse totale de Lune, 21 janvier 2019.

© J. Normand

ISBN EDP Sciences 978-2-7598-2414-4

ISBN IMCCE 978-2-910015-86-2

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 1^{er} 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.

À la mémoire de Jean Chapront et Pierre Bretagnon.

Préface

C'est un grand plaisir de vous présenter cette nouvelle édition de l'*Introduction aux éphémérides et phénomènes astronomiques*, réalisée par un collectif de chercheurs et d'ingénieurs de plusieurs observatoires français, coordonnée par l'*Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides* (IMCCE) et publiée sous l'égide du Bureau des longitudes.

La version précédente fut à l'initiative, en 1991, de Jean Chapront (1939-2019), alors directeur de l'IMCCE. Publiée en 1998 et épuisée depuis plusieurs années, cette version a nécessité bien plus qu'un dépoussiérage en raison des nombreux changements intervenus depuis cette date dans le domaine des éphémérides, des systèmes de référence, des méthodes de calcul et des constantes astronomiques. C'est donc un ouvrage repensé dans sa globalité et non une simple mise à jour visant à corriger les manques de l'édition de 1998 que vous avez entre les mains. . . ou devant votre écran, selon la version utilisée.

Certes, depuis 2005, la première partie de la *Connaissance des temps* comporte des chapitres explicatifs, mis à jour avec plus ou moins de régularité, et qui ont provisoirement pallié le vieillissement de l'*Introduction aux éphémérides*. Mais cela est resté limité à quelques chapitres, sans couvrir toutes les questions abordées dans l'ouvrage. Les nouvelles réalisations du repère de référence, les éphémérides numériques, l'exploration du Système solaire, le positionnement par satellites omniprésent dans notre vie quotidienne et l'information astronomique en ligne beaucoup plus accessible que par le passé ont imposé une révision du contenu pour l'adapter à des besoins et des utilisateurs nouveaux. Enfin, tout récemment, l'évolution profonde du Système international d'unités a également incité à une refonte de l'ouvrage.

Fort de l'expérience acquise avec l'édition précédente, le comité éditorial a élargi l'objectif de l'ouvrage afin de répondre aux attentes d'un public plus large, sans pour autant délaissier celles des spécialistes. Cette version devrait ainsi combler les utilisateurs de la *Connaissance des temps*, mais également ceux du *Guide des données astronomiques* (*Annuaire du Bureau des longitudes*), moins spécialistes, mais souvent désireux de conduire

par eux-mêmes des calculs astronomiques avancés, rendus possibles par les moyens informatiques à la disposition de chacun. Les nouveaux chapitres sur les *phénomènes astronomiques* remplissent parfaitement cet objectif.

L'ouvrage ambitionne d'être une publication de référence dans les domaines de l'astronomie fondamentale, de la mécanique céleste et de l'astrométrie : un grand soin a été apporté au respect de la nomenclature, des règles de l'écriture scientifique et de celles de l'emploi des unités. Si certains chapitres, déjà présents dans l'édition précédente, sont par nature et demeurent très techniques, comme la présentation des théories planétaires ou de la rotation de la Terre, d'autres, constituant environ un tiers de l'ouvrage, sont totalement nouveaux et bienvenus. C'est le cas de la présentation des méthodes de calcul de l'astronomie du quotidien (ou presque), de celles des levers et couchers des astres, de l'année et des subtilités du calendrier, des éclipses, des passages de planètes devant le Soleil et des éphémérides physiques de planètes.

Ces chapitres comblent (partiellement) le vide dans l'édition française pour un ouvrage d'astronomie fondamentale, accessible à un lycéen de terminale scientifique, comme le fut jadis le célèbre *Danjon*, aujourd'hui bien dépassé, mais toujours consulté. Le chapitre sur les satellites artificiels est totalement nouveau pour ce type d'ouvrage et fournit tous les éléments pour comprendre les conditions de visibilité et éventuellement écrire son propre programme de calcul.

À l'évidence, bien qu'à jour au moment de sa parution, cet ouvrage souffrira inévitablement du temps qui passe. Mais il sera possible d'en faire les mises à jour sur la version numérique, ce qui permettra d'actualiser les sections qui seront progressivement altérées par de nouvelles conventions ou de nouvelles éphémérides, sans toutefois perdre la cohérence de l'ensemble.

François Mignard
Président du Bureau des longitudes

Jacques Laskar
Directeur de l'IMCCE

Coordination de l'ouvrage

Jérôme **BERTHIER**

ingénieur de recherche au CNRS, IMCCE / Observatoire de Paris

Pascal **DESCAMPS**

astronome-adjoint, IMCCE / Observatoire de Paris

François **MIGNARD**

*directeur de recherche émérite au CNRS, Université Côte d'Azur /
Observatoire de la Côte d'Azur / Bureau des longitudes*

Comité éditorial

Sylvie **LEMAITRE**

ingénieure d'étude, IMCCE / Observatoire de Paris

Yohann **GOMINET**

technicien, IMCCE / Observatoire de Paris

Maïder **BUGNON OLANO**

technicienne, IMCCE / Observatoire de Paris

Auteurs

	Chapitre
Zuheir ALTAMIMI	3
<i>directeur de recherche, IGN-IPGP</i>	
Jean-Eudes ARLOT	6, 10
<i>astronome émérite, IMCCE / Observatoire de Paris / Bureau des longitudes</i>	
Jérôme BERTHIER	1, 7, 9, 12, 13
<i>ingénieur de recherche au CNRS, IMCCE / Observatoire de Paris</i>	
Mirel BIRLAN	1, 7
<i>chargé de recherche au CNRS, IMCCE / Observatoire de Paris</i>	
Pierre BRETAGNON †	5
<i>astronome, IMCCE / Observatoire de Paris</i>	
Victor BRUMBERG	9
<i>astronome, IMCCE / Institute of applied astronomy, St. Petersburg</i>	
Christian BIZOUARD	4
<i>astronome, SYRTE / Observatoire de Paris</i>	
Michel CAPDEROU	8
<i>maître de conférence, LMD, École Polytechnique</i>	
Nicole CAPITAINE	1, 3, 4
<i>astronome émérite, SYRTE / Observatoire de Paris / Bureau des longitudes</i>	

Benoît CARRY	7, 12
<i>astronome-adjoint, Université Côte d’Azur / Observatoire de la Côte d’Azur</i>	
Florent DELEFLIE	8
<i>astronome-adjoint, IMCCE / Observatoire de Paris</i>	
Pascal DESCAMPS	7, 10, 11, 12, 13
<i>astronome-adjoint, IMCCE / Observatoire de Paris</i>	
Nikolai EMELYANOV	6
<i>astronome, Sternberg Astronomical Institute</i>	
Agnès FIENGA	5
<i>astronome, Université Côte d’Azur / Observatoire de la Côte d’Azur</i>	
Valery LAINÉY	6
<i>astronome-adjoint, IMCCE / Observatoire de Paris</i>	
Sébastien LAMBERT	3, 4
<i>astronome-adjoint, SYRTE / Observatoire de Paris</i>	
Lucie MAQUET	7
<i>astronome-adjoint, IMCCE / Observatoire de Paris</i>	
François MIGNARD	2, 3, 5, 9, 10, 13
<i>directeur de recherche émérite au CNRS, Université Côte d’Azur / Observatoire de la Côte d’Azur / Bureau des longitudes</i>	
Vincent ROBERT	6
<i>enseignant-chercheur, IPSA / IMCCE / Observatoire de Paris</i>	
Patrick ROCHER	13
<i>astronome, IMCCE / Observatoire de Paris</i>	
Jean-Louis SIMON	5, 13
<i>astronome, IMCCE / Observatoire de Paris</i>	
William THUILLOT	6, 10
<i>astronome émérite, IMCCE / Observatoire de Paris</i>	
Frédéric VACHIER	7
<i>ingénieur de recherche au CNRS, IMCCE / Observatoire de Paris</i>	
Alain VIENNE	6
<i>professeur des universités, IMCCE / Université de Lille</i>	

Contributeurs

Mickaël GASTINEAU	
<i>ingénieur de recherche au CNRS, IMCCE / Observatoire de Paris</i>	
Hervé MANCHE	
<i>ingénieur d’étude au CNRS, IMCCE / Observatoire de Paris</i>	
Jonathan NORMAND	
<i>ingénieur d’étude, IMCCE / Observatoire de Paris</i>	
Melaine SAILLENFEST	
<i>chargé de recherche au CNRS, IMCCE / Observatoire de Paris</i>	

Services et publications en ligne

L'IMCCE et le Bureau des longitudes proposent, sur leurs sites web respectifs, des services de calcul d'éphémérides et un choix de publications en rapport avec le contenu de cet ouvrage. Voici une liste de ces ressources et les adresses web pour y accéder.

Services en ligne

- **Formulaires de calcul d'éphémérides** (tout public) permettant d'obtenir des levers et couchers de planètes, de calculer des éphémérides de position ou pour l'observation physique des corps du Système solaire, d'obtenir les prédictions des éclipses de Lune et de Soleil ou des phénomènes de satellites des planètes.

↗ <https://ssp.imcce.fr/forms>

- **Web services de calcul d'éphémérides** (développeurs et public averti) permettant de développer des applications qui nécessitent d'accéder à des informations sur les corps du Système solaire (SsODNet), de calculer des éphémérides des corps du Système solaire (Miriade), de rechercher ces corps dans des images astronomiques (SkyBoT), ou de manipuler leurs spectres (M4AST).

↗ <https://ssp.imcce.fr/webservices/>

Éphémérides planétaires

- **INPOP**, solution orbitale du Soleil, des planètes, de Pluton et de la Lune.

↗ <https://www.imcce.fr/inpop>

- **CALCEPH**, librairie de calcul des éphémérides planétaires.

↗ <https://www.imcce.fr/inpop/calceph/>

Publications institutionnelles

- **Connaissance des temps**, ouvrage d'éphémérides destiné aux astronomes, enseignants et étudiants. Publication annuelle disponible aux formats papier ou ebook, accompagnée du logiciel eCDT de calcul d'éphémérides.

☞ <https://www.imcce.fr/publications/publications-institutionnelles/#1>

- **Guide de données astronomiques** (*Annuaire du Bureau des longitudes*), publié chaque année et répondant aux besoins de l'observateur.

☞ <https://www.imcce.fr/publications/publications-institutionnelles/#2>

Notes scientifiques et techniques

- **Publications des travaux de l'IMCCE** liés aux recherches théoriques de mécanique céleste ou observationnelles en astrométrie, et aux travaux plus techniques appliqués dans l'élaboration des éphémérides.

☞ <https://www.imcce.fr/publications/publications-recherche/nst>

Publications du Bureau des longitudes

- **Ouvrages scientifiques et Cahiers des sciences de l'Univers** succédant aux quatre volumes de l'*Encyclopédie scientifique de l'Univers*.

☞ <https://www.bureau-des-longitudes.fr/publications.htm>

Ouvrages pour tous

- **Agenda astronomique**, publication annuelle thématique fournissant de nombreuses informations destinées au grand public.

☞ <https://www.imcce.fr/publications/ouvrages-pour-tous/#1>

- **Divers ouvrages** édités par l'IMCCE destinés à un large public.

☞ <https://www.imcce.fr/publications/ouvrages-pour-tous/#1>

Table des matières

	Page
Liste des figures	xx
Liste des tables	xxvii
La <i>Connaissance des temps</i>	1
Les origines de la <i>Connaissance des temps</i>	1
La <i>Connaissance des temps</i> de 1795 à 1979	2
La <i>Connaissance des temps</i> entre 1980 et 2006	4
La <i>Connaissance des temps</i> depuis 2007	5
<i>L'Introduction aux éphémérides astronomiques</i>	6
1. Unités, constantes et données astronomiques	9
1.1. Introduction	9
1.2. Systèmes d'unités	11
1.2.1. Le Système international d'unités (SI)	11
1.2.2. Le Système UAI d'unités astronomiques	17
1.3. Le système UAI de constantes astronomiques	21
1.3.1. Caractéristiques du système UAI 2009/2012	21
1.3.2. Origine des temps	23
1.3.3. Valeurs des constantes du système UAI 2009/2012	23

TABLE DES MATIÈRES

1.3.4. Notes explicatives relatives à certaines constantes du système . . .	26
1.3.5. Constantes dérivées du système UAI 2009/2012	27
1.4. Autres systèmes de constantes	27
1.4.1. Standards numériques IERS 2010	27
1.4.2. Système UAI 2015 des constantes de conversion	29
1.4.3. Système des masses planétaires	29
1.5. Données sur le Système solaire	34
1.5.1. Éléments orbitaux des planètes et des satellites découverts avant 1990	34
1.5.2. Éléments osculateurs des satellites découverts après 1990	36
1.5.3. Paramètres physiques	45
1.6. Autres constantes et unités de l'astronomie	53
1.6.1. Constantes relatives au système de référence galactique	53
1.6.2. Constantes relatives à la situation du Soleil dans la Galaxie	54
1.6.3. Valeurs estimées des paramètres du formalisme PPN	56
1.6.4. Autres unités utilisées en astronomie	57
2. Échelles de temps	59
2.1. Introduction	59
2.2. Évolution des échelles de temps	60
2.2.1. Présentation générale	60
2.2.2. Le Temps des éphémérides (TE ou ET)	62
2.3. Le Temps atomique	64
2.3.1. Étalons de fréquence : la seconde SI	64
2.3.2. Réalisation du Temps atomique international	66
2.3.3. Uniformité du TAI	67
2.4. Le Temps universel coordonné (UTC)	68
2.4.1. Définition et propriétés	68
2.4.2. Le futur de l'UTC	71
2.5. Échelles de temps relativistes	76
2.5.1. Les échelles TCB et TCG	76
2.5.2. Les échelles TT et TDB	81
2.5.3. Synthèse des relations entre les échelles de temps	82
2.6. Le Temps GNSS	83
2.6.1. Le temps GPS	83
2.6.2. Le temps Galileo	84
2.6.3. Le temps GLONASS	84

TABLE DES MATIÈRES

2.6.4. Le temps BeiDou	84
2.7. Jours Juliens	84
2.7.1. Énoncé du problème	84
2.7.2. Le cycle julien	85
2.7.3. Le décompte des jours avec les jours juliens	87
2.7.4. Époques julienne et bessélienne	88
2.8. La quantité TT-UT	89
2.8.1. Énoncé du problème	89
2.8.2. Les mesures	90
3. Systèmes de référence	95
3.1. Introduction	95
3.1.1. Notions de système de référence et de repère de référence	95
3.1.2. De la théorie newtonienne à la relativité générale	96
3.1.3. Définitions cinématique et dynamique des systèmes de référence	96
3.1.4. Référence terrestre et lien entre les systèmes terrestre et céleste	97
3.2. Systèmes de référence relativistes	97
3.2.1. Contexte	97
3.2.2. Cadre théorique	98
3.2.3. Historique des résolutions de l’UAI sur la RG	99
3.2.4. Définition des systèmes de référence BCRS et GCRS	102
3.2.5. Transformation de coordonnées entre systèmes de référence barycentrique et géocentrique	105
3.3. Système de référence céleste international	106
3.3.1. Une nouvelle conception : le système de référence cinématique	106
3.3.2. Les recommandations de l’Union astronomique internationale (UAI)	108
3.3.3. Définition du Système de référence céleste international (ICRS)	109
3.3.4. Maintenance du Système de référence céleste international (ICRS)	110
3.3.5. Contribution de l’IERS à la réalisation et à la maintenance de l’ICRS	110
3.3.6. Accessibilité au Système de référence céleste international	111
3.3.7. Le repère de référence céleste international (ICRF)	112
3.3.8. La deuxième réalisation de l’ICRF : l’ICRF2	113
3.3.9. La troisième réalisation de l’ICRF : l’ICRF3	114
3.3.10. Réalisations dans le domaine visible	115
3.4. Systèmes de référence dynamiques	119
3.4.1. Introduction	119
3.4.2. Définitions	120
3.4.3. Systèmes de référence et éphémérides	122

TABLE DES MATIÈRES

3.4.4. Conclusion	126
3.5. Système international de référence terrestre	126
3.5.1. Introduction	126
3.5.2. Concepts et définitions des systèmes de référence terrestres	128
3.5.3. Réalisation d'un système de référence terrestre	129
3.5.4. Le Système international de référence terrestre (ITRS) et sa réalisation	133
3.5.5. L'ITRF2014, réalisation actuelle de l'ITRS	137
3.5.6. L'ITRS et les instances internationales	139
3.5.7. Système de coordonnées géodésiques GNSS	141
3.5.8. Autres formes ou désignations de repères de référence terrestres	142
3.6. Passage du GCRS à l'ITRS	143
3.6.1. Introduction	143
3.6.2. Expression générale de la transformation	144
3.6.3. Les résolutions 2000 et 2006 de l'UAI relatives à la transformation entre les systèmes de référence terrestre et céleste	145
3.6.4. Les paramètres d'orientation de la Terre	148
3.6.5. Expression de la transformation entre le GCRS et l'ITRS utilisant l'origine non tournante	155
3.6.6. Expression classique de la transformation entre le GCRS et l'ITRS	161
4. Rotation de la Terre	165
4.1. Introduction	165
4.2. Phénomènes physiques	166
4.2.1. Origine des phénomènes et détermination	166
4.2.2. La précession-nutation : description et historique	167
4.2.3. Le mouvement du pôle : description et historique	169
4.2.4. Les variations de la vitesse de rotation et de la durée du jour : description et historique	170
4.3. Dynamique de la rotation de la Terre	171
4.3.1. Les équations de base	172
4.3.2. Forme des solutions	176
4.3.3. Évolution des constantes associées à la précession-nutation	180
4.4. Modèles de précession	182
4.4.1. Les différents types de précession	182
4.4.2. Quantités liées à la précession	183
4.4.3. Évolution 2000-2003 des modèles de précession	185
4.4.4. Les modèles UAI de précession	186

TABLE DES MATIÈRES

4.4.5. Expressions analytiques des quantités de précession	188
4.4.6. Développements de la précession et comparaison entre modèles	189
4.4.7. Domaine de validité des modèles de précession	192
4.5. Modèle de nutation	193
4.5.1. Rotation des corps célestes et nutation	193
4.5.2. Caractéristiques du modèle de nutation UAI 1980	195
4.5.3. Caractéristiques du modèle de nutation UAI 2000	195
4.5.4. Relations entre précession, nutation et mouvement du pôle	196
4.5.5. Équations cinématiques et équations dynamiques	197
4.5.6. Modèle géophysique	199
4.5.7. Réduction des équations du moment cinétique et application du modèle géophysique	200
4.5.8. Estimation des corrections de précession et formules pour les séries de la nutation	203
4.5.9. Fréquences des nutations et mouvement du pôle	204
4.6. Paramètres d'orientation de la Terre	205
4.6.1. La rotation de la Terre et son orientation dans l'espace	205
4.6.2. Les paramètres d'orientation et de rotation de la Terre (EOP)	206
4.6.3. Mouvement du pôle ou polhodie	207
4.6.4. Variations du Temps universel UT1 et de la durée du jour	209
4.6.5. Pôle céleste et écarts au pôle céleste	212
4.6.6. Relations du Temps universel avec les échelles de temps atomique TAI et UTC	213
4.6.7. Les techniques d'observation	214
4.6.8. Coordination mondiale des mesures de la rotation de la Terre	216
4.6.9. Calcul des paramètres d'orientation de la Terre	217
5. Mouvement des planètes, de Pluton et de la Lune	219
5.1. Introduction	219
5.2. Théories du mouvement des planètes et de Pluton	220
5.2.1. Historique	220
5.2.2. Éléments de mécanique céleste	226
5.2.3. Forme des théories analytiques	231
5.2.4. Construction de théories planétaires à variations séculaires	233
5.2.5. Théories planétaires utilisées pour les éphémérides de la <i>Connais-</i> <i>sance des temps</i> jusqu'en 2005	239
5.2.6. Théories planétaires récentes	243
5.2.7. Éléments moyens des planètes	251
5.2.8. Expressions numériques des éléments moyens	253

TABLE DES MATIÈRES

5.2.9. Éphémérides approchées	270
5.3. Le mouvement de la Lune	276
5.3.1. Caractéristiques de l'orbite lunaire	276
5.3.2. Les principales perturbations	280
5.3.3. Les éléments moyens	286
5.3.4. Périodes de révolution caractéristiques du mouvement de la Lune	291
5.3.5. Les éphémérides de la Lune	291
5.4. L'éphéméride INPOP	302
5.4.1. Les différentes versions d'INPOP de 2003 à 2015	304
5.4.2. La version INPOP17a	316
6. Satellites naturels des planètes	321
6.1. Introduction	321
6.1.1. Dynamique	321
6.1.2. Objectifs	322
6.1.3. Plan	324
6.2. Historique	324
6.2.1. La découverte	324
6.2.2. Modélisations	326
6.3. Classification	327
6.4. La réalisation et la réduction des observations	329
6.4.1. L'instrument méridien	329
6.4.2. Le micromètre et l'héliomètre	331
6.4.3. L'imagerie	332
6.4.4. Les phénomènes	341
6.4.5. Les rapprochements	342
6.4.6. La radioscience	342
6.4.7. Les observations disponibles	345
6.4.8. Précision et exactitude des observations	345
6.5. La modélisation dynamique	348
6.5.1. Les forces en présence	348
6.5.2. Les méthodes de résolutions des équations du mouvement	350
6.5.3. Ajustement des paramètres orbitaux sur les observations	359
6.6. Les différents systèmes	364
6.6.1. Satellites de Mars	364
6.6.2. Satellites galiléens	374
6.6.3. Satellites de Jupiter	387

TABLE DES MATIÈRES

6.6.4. Satellites de Saturne	394
6.6.5. Satellites d'Uranus	441
6.6.6. Satellites de Neptune	451
6.6.7. Satellites de Pluton	457
6.6.8. Satellites lointains irréguliers	460
6.7. Représentation des éphémérides	469
6.7.1. Introduction	469
6.7.2. Échelle de temps	470
6.7.3. Calcul des coordonnées	470
6.7.4. Précision et exactitude des éphémérides	470
6.7.5. Représentation des éphémérides	482
6.8. Conclusion	491
7. Petits corps du Système solaire et planètes naines	493
7.1. Introduction	493
7.2. Historique	494
7.2.1. Les comètes, de l'Antiquité à nos jours	494
7.2.2. Les astéroïdes et autres petits corps, une affaire moderne	496
7.2.3. Origine	499
7.2.4. Les satellites d'astéroïdes	499
7.3. Nomenclature	502
7.4. Propriétés des petits corps	503
7.4.1. Propriétés dynamiques	503
7.4.2. Propriétés de surface	505
7.4.3. Propriétés physiques	508
7.4.4. Propriétés des satellites	511
7.5. Fondamentaux des éphémérides de position	513
7.6. Détermination des orbites	513
7.6.1. Méthodologie	513
7.6.2. Sources des données orbitales	515
7.6.3. Précision des orbites	515
7.7. Calcul des éphémérides de position	518
7.7.1. Équations du mouvement	519
7.7.2. Forces non gravitationnelles	521
7.7.3. Résolution des équations du mouvement	525
7.7.4. Calcul des conditions initiales	526

TABLE DES MATIÈRES

7.8. Calcul du flux apparent	527
7.8.1. Réflexion du spectre solaire	528
7.8.2. Émission thermique	530
7.9. Satellites d'astéroïdes	531
7.9.1. Détermination des paramètres orbitaux	531
7.9.2. Orbites et éphémérides proposées par l'IMCCE	532
7.9.3. Caractéristiques dynamiques des systèmes d'astéroïdes multiples	533
8. Satellites artificiels	547
8.1. Introduction	547
8.2. Considérations dynamiques	548
8.2.1. Les lois de Kepler pour le satellite artificiel	548
8.2.2. Orbites perturbées avec précession et termes périodiques	552
8.2.3. Orbites précises	555
8.2.4. Approches numériques, semi-analytiques, analytiques	556
8.2.5. Différentes définitions de périodes pour l'observation	559
8.2.6. Spécificités des orbites interplanétaires	560
8.3. Familles de satellites artificiels	561
8.3.1. Orbites circulaires et quasi circulaires	561
8.3.2. Orbites excentriques	564
8.3.3. Points de Lagrange	565
8.4. Considérations géométriques	571
8.4.1. Latitudes géocentrique et géodésique	571
8.4.2. Nadir et trace pour un satellite artificiel	572
8.4.3. Projection des trajectoires en repère terrestre	573
8.4.4. Variations d'altitude d'un satellite quasi circulaire	578
8.4.5. Visibilité des satellites artificiels depuis le sol	580
8.4.6. Configurations d'éclairement des satellites, éclipses	584
8.5. Catalogues de satellites	589
8.5.1. Le catalogue des « Deux Lignes NORAD » (TLE)	589
8.5.2. Exemples d'évolution à long terme des paramètres orbitaux	594
9. Corrections pour la réduction	597
9.1. Introduction	597
9.2. Corrections pour les étoiles	597
9.2.1. Présentation des effets physiques	597
9.2.2. Formulaire classique pour le calcul des corrections stellaires	605

- satellites galiléens, 325, 374, 376, 491
- satellites intérieurs, 387, 411
- satellites irréguliers, 460
- satellites lointains, 460
- satellites naturels, 321
- Seconde intercalaire, 70, 71, 214
- Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence (IERS), 111
- Soleil
 - Durée du lever-coucher, 672
 - levers-couchers, 668
 - moyen mouvement, 648
- Style, 879
- Système géocentrique non tournant, 102
- Système de référence, 95
- Système de référence céleste
 - barycentrique (BCRS), 101
- Système de référence céleste géocentrique (GCRS), 101
- Système de référence céleste géocentrique (GCRS), 144, 156
- Système de référence céleste international (ICRS), 96, 106, 156
- Système de référence céleste international (ICRS), 100
- Système de référence terrestre (SRT), 127
- Système de référence terrestre intermédiaire (TIRS), 149
- Système de référence terrestre international (ITRS), 127, 144, 156
- Système international d'unités (SI), 11
- Système international de référence terrestre (ITRS), 97, 100, 134
- Système UAI d'unités astronomiques, 17
- Système UAI de constantes astronomiques, 21
- Syzygie, 754
- Tchebychev, 355
- Temps coordonnée barycentrique, 20
- Temps coordonnée géocentrique, 20
- Temps légal, 662
- Temps lumière classique, 619
- Temps lumière relativiste, 621
- Temps sidéral de Greenwich (GST), 149, 155, 775
- Temps sidéral moyen de Greenwich (GMST), 155, 163, 656
- Temps solaire, 657
- Temps universel (TU/UT), 61
- Temps universel (UT1), 147, 154
- Temps universel coordonné (UTC), 165, 213
- Temps universel UT1, 209
- Terminateur, 841
- Terre
 - aplatissement dynamique, 175, 196
 - axe de figure, 167
 - axe principal d'inertie, 167
 - durée du jour, 170, 177, 209
 - ellipticité dynamique, 196
 - fréquence de Chandler, 176
 - mouvement du pôle, 176
 - noyau fluide, 176
 - nutations diurne, 176
 - nutations libres, 176
 - nutations libres du noyau (FCN), 177, 204
 - oscillation de Chandler, 169
 - pôle instantané de rotation, 167
 - polhodie, 207
 - rebond postglaciaire, 170
- Terrestrial Intermediate Origin, *voir* Origine terrestre intermédiaire
- TIO, *voir* Origine terrestre intermédiaire
- TIRS, *voir* Système de référence terrestre intermédiaire

INDEX

TOP, [226](#), [230](#), [242](#), [245](#)

Transit, *voir* Passage

Unité astronomique, [18](#)

Unité dérivée, [12](#)

Unité dérivée cohérente, [12](#)

Unités de base, [12](#)

Valeur de Routh, [567](#)

Vitesse radiale

historique, [600](#)

VLBI, *voir* Interférométrie à très longue base

VSOP, [125](#), [219](#), [226](#), [230](#), [242](#), [243](#), [245](#)

WGS84, *voir* Le système WGS84

World Geodetic System 1984, *voir* Le système WGS84

Yarkovsky, *voir* effet Yarkovsky