

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

TABLE DES MATIÈRES

9.2.3. Formulaire relativiste pour le calcul des corrections stellaires . . .	613
9.3. Corrections pour les corps du Système solaire	616
9.3.1. Généralités	616
9.3.2. Formulaire classique pour le Système solaire	618
9.3.3. Formulaire relativiste pour le Système solaire	621
9.4. La réfraction astronomique	623
9.4.1. Historique	623
9.4.2. Effets globaux	626
9.4.3. Théorie approchée	628
9.4.4. Atmosphère sphérique	630
10. Phénomènes astronomiques	645
10.1. Introduction	645
10.2. Phases de la Lune	645
10.2.1. Présentation générale	645
10.2.2. Durée des phases lunaires	648
10.2.3. Durée de la lunaison	650
10.3. Lever, coucher et passage au méridien	655
10.3.1. Passages au méridien	655
10.3.2. Temps solaire et jour solaire	657
10.3.3. Levers et couchers	666
10.4. Durée du jour et crépuscules	675
10.4.1. Durée du jour	675
10.4.2. Crépuscules	679
10.5. Grandes oppositions périhéliques de Mars	686
10.5.1. Introduction	686
10.5.2. Retour des oppositions	687
10.5.3. Parallaxe de Mars	691
10.6. Passages	694
10.6.1. Introduction	694
10.6.2. Conditions des passages	696
10.6.3. Succession des passages	700
10.6.4. Recherche des passages planétocentriques	707
10.6.5. Passages topocentriques	713
10.7. Phénomènes des satellites de planètes	719
10.7.1. Les éclipses et les occultations par la planète	719
10.7.2. Les phénomènes mutuels	725

TABLE DES MATIÈRES

10.8. Occultations stellaires	743
10.8.1. Introduction	743
10.8.2. Géométrie des phénomènes	743
10.8.3. Recherche systématique	744
10.8.4. Prédiction géocentrique	746
10.8.5. Circonstances générales	747
10.8.6. Facteur de qualité	751
10.8.7. Prédiction des rapprochements	752
11. Les éclipses de Soleil et de Lune	753
11.1. Introduction	753
11.2. Précision du calcul des éclipses	754
11.3. Récurrence des éclipses	756
11.3.1. Le saros	756
11.3.2. L'exeligmos	758
11.3.3. Cycles de saros	759
11.4. Les éclipses de Soleil	760
11.4.1. Les méthodes de calcul des éclipses de Soleil	764
11.4.2. Conditions d'existence d'une éclipse de Soleil	765
11.4.3. Théorie générale des éclipses de Soleil	770
11.4.4. Éléments de Bessel et éléments auxiliaires	778
11.4.5. Circonstances générales d'une éclipse	779
11.4.6. Circonstances locales de visibilité d'une éclipse	782
11.4.7. Instant du maximum de l'éclipse	786
11.4.8. Instants de début et de fin d'éclipse	787
11.4.9. Forme de l'ombre	788
11.4.10. Largeur de la bande de centralité et taille de l'ombre sur la ligne de centralité	789
11.4.11. Durée d'une éclipse	790
11.4.12. Grandeur d'une éclipse	790
11.4.13. Degré d'obscuration	791
11.4.14. Autre mode de calcul de l'obscuration et de la grandeur d'une éclipse pour un observateur	794
11.4.15. Angle de position	796
11.4.16. Cartes d'éclipse	797
11.4.17. Exemple : éclipse annulaire du 1 ^{er} septembre 2016	804
11.5. Les éclipses de Lune	806
11.5.1. Conditions d'une éclipse de Lune	807
11.5.2. Calcul d'une éclipse de Lune	815

TABLE DES MATIÈRES

11.5.3. Phases d'une éclipse de Lune	817
11.5.4. Angle de position	817
11.5.5. Grandeur d'une éclipse de Lune	818
11.6. Carte de visibilité d'une éclipse de Lune	818
12. Éphémérides physiques	821
12.1. Introduction	821
12.2. Systèmes de rotation	822
12.2.1. Définitions	822
12.2.2. Cas des planètes et de leurs satellites	823
12.2.3. Cas particulier de la Lune	824
12.2.4. Cas des petits corps	826
12.3. Paramètres des éphémérides physiques	826
12.4. Systèmes de coordonnées	827
12.4.1. Coordonnées planétocentriques	827
12.4.2. Coordonnées planétographiques	828
12.4.3. Exceptions	828
12.5. Calcul des éphémérides physiques	829
12.5.1. Points subobservateur (SEP) et subsolaire (SSP)	830
12.5.2. Angle de position du pôle Nord	832
12.5.3. Angle de phase	832
12.5.4. Rayon angulaire apparent	833
12.6. Rendu visuel des formes	833
12.6.1. Équateur d'intensité	834
12.6.2. Conditions d'illumination et observation	835
12.6.3. Lois de diffusion	836
12.6.4. Orientation et tracé du modèle dans le plan du ciel	839
12.7. Paramètres de rotation	842
12.8. Paramètres de forme	854
13. Calendrier et saisons	863
13.1. Introduction	863
13.2. Calcul de la durée de l'année tropique	864
13.2.1. Année tropique et années des saisons	864
13.2.2. Durée de l'année tropique	869

TABLE DES MATIÈRES

13.3. Les calendriers perpétuels	874
13.3.1. Les calendriers lunaires perpétuels	874
13.3.2. Les calendriers solaires perpétuels	876
13.3.3. Les calendriers luni-solaires perpétuels	877
13.4. Le calendrier julien	878
13.4.1. Genèse	878
13.4.2. Réforme julienne	879
13.4.3. Ère chrétienne et style de l'année	880
13.4.4. Dérive calendaire	880
13.5. Le calendrier grégorien	881
13.5.1. La réforme grégorienne	881
13.5.2. Le cycle de 33 ans	882
13.5.3. Le cycle de 128 ans	883
13.6. Date des saisons	883
13.6.1. Dates de l'équinoxe de printemps	884
13.6.2. Dates du solstice d'été	885
13.6.3. Dates de l'équinoxe d'automne	885
13.6.4. Dates du solstice d'hiver	885
13.6.5. Durées des saisons	885
13.7. Date de Pâques	886
13.7.1. Les différentes Pâque(s)	888
13.7.2. Date de Pâques dans le comput dionysien	891
13.7.3. La réforme grégorienne et le nouveau comput	896
13.7.4. Formulaire de la date de Pâques	907

Annexe

A. Changements de coordonnées	913
A.1. Notions générales	913
A.1.1. Coordonnées cartésiennes et coordonnées polaires/sphériques	913
A.1.2. Transformation des coordonnées sous l'effet de rotation des axes	914
A.1.3. Représentation des coordonnées sur la sphère	915
A.2. Coordonnées usuelles	916
A.2.1. Coordonnées liées à un système de référence terrestre	916
A.2.2. Coordonnées liées à un système de référence céleste	917
A.3. Relations entre systèmes de coordonnées	922
A.3.1. Relations entre coordonnées équatoriales et coordonnées écliptiques	922
A.3.2. Relations entre coordonnées équatoriales et horizontales	923

TABLE DES MATIÈRES

A.3.3. Relations entre coordonnées ICRS, BCRS, GCRS et ITRS . . .	925
Références bibliographiques	927
Glossaire	981
Index	1015