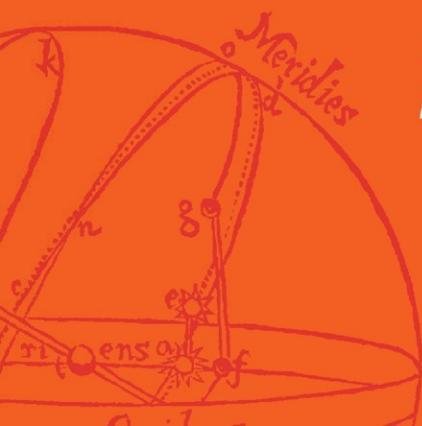




SATELLITES DE KEPLER AU GPS

Michel Capderou

Préface d'Hervé Le Treut



 Springer

Satellites : de Kepler au GPS

Springer

Paris

Berlin

Heidelberg

New York

Hong Kong

Londres

Milan

Tokyo

Michel Capderou

Satellites : de Kepler au GPS

 Springer

Michel Capderou

LMD
École Polytechnique
91128 Palaiseau

ISBN-13 : 978-2-287-99049-6 Springer Paris Berlin Heidelberg New York

© Springer-Verlag France, Paris, 2012

Imprimé en France

Springer-Verlag est membre du groupe Springer Science + Business Media

Cet ouvrage est soumis au copyright. Tous droits réservés, notamment la reproduction et la représentation, la traduction, la réimpression, l'exposé, la reproduction des illustrations et des tableaux, la transmission par voie d'enregistrement sonore ou visuel, la reproduction par microfilm ou tout autre moyen ainsi que la conservation des banques de données. La loi française sur le copyright du 9 septembre 1965 dans la version en vigueur n'autorise une reproduction intégrale ou partielle que dans certains cas, et en principe moyennant le paiement des droits. Toute représentation, reproduction, contrefaçon ou conservation dans une banque de données par quelque procédé que ce soit est sanctionnée par la loi pénale sur le copyright.

L'utilisation dans cet ouvrage de désignations, dénominations commerciales, marques de fabrique, etc. même sans spécification ne signifie pas que ces termes soient libres de la législation sur les marques de fabrique et la protection des marques et qu'ils puissent être utilisés par chacun.

La maison d'édition décline toute responsabilité quant à l'exactitude des indications de dosage et des modes d'emploi. Dans chaque cas il incombe à l'utilisateur de vérifier les informations données par comparaison à la littérature existante.



Maquette de couverture : Nadia Ouddane

Préface

Il est bien peu fréquent, de nos jours, de pouvoir saluer la parution en français d'ouvrages scientifiques de synthèse s'adressant à un public de niveau Master et au-delà. En consacrant plusieurs années à l'écriture de ce livre, après une première version qui avait demandé le même travail, Michel Capderou persévère dans une voie difficile, que bien peu de chercheurs ont désormais le courage de suivre. L'extraordinaire qualité de ce document justifie pourtant tous les efforts consentis et les lecteurs trouveront ici une richesse d'informations absolument unique. Michel Capderou a réalisé au travers de cette rédaction une synthèse étroite de son métier de chercheur, au sein d'une équipe qui doit concevoir et analyser des missions d'observation spatiale de la Terre, et de son métier d'enseignant : on sent clairement qu'une grande partie de l'exposé a été rodée et affinée par de nombreuses années face aux étudiants.

★

Le titre « Satellites – de Kepler au GPS » est à l'image du livre : sobriété, précision mais aussi ambition, en se plaçant sous deux parrainages aussi fortement symboliques et éloignés dans le temps. Michel Capderou a consacré dans son ouvrage une place importante à l'histoire d'une science pluri centenaire. L'étude des satellites, cela a d'abord été celle de la révolution des planètes du Système solaire, dans les siècles qui ont suivi la Renaissance. Hors du monde des spécialistes, cette période de notre histoire scientifique est souvent méconnue, ou perçue de manière très affadie, loin de l'audace et de la créativité de scientifiques qui ont su proposer une vision complètement différente de notre univers, et des lois qui le régissent. La mécanique des corps célestes est donc une discipline déjà ancienne, mais pour être devenue classique, elle est

souvent peu enseignée. La mécanique de Lagrange, par exemple, est absente de beaucoup de cursus, en classes préparatoires, dans les grandes écoles ou en université. Sur ce thème les étudiants trouveront ici un exposé unique par sa cohérence, classique et familier dans sa présentation initiale, abordant très vite des notions beaucoup plus complexes, sans jamais se départir de cette clarté et de cette maîtrise qui font la marque du livre.

★

Mais les satellites auxquels Michel Capderou consacre l'essentiel de son ouvrage sont avant tout ceux que l'homme envoie dans l'espace, plateformes de mesures qui ont en quelques décennies révolutionné l'observation de notre planète. Le GPS est effectivement emblématique de cette explosion scientifique et technique, et à deux titres : parce que c'est une application directement accessible à des millions de particuliers, et parce que ce miracle d'information repose sur des méthodes qui sont très largement ignorées non seulement du grand public mais aussi de beaucoup de scientifiques. La trajectographie des satellites, le contrôle de leur altitude, la détermination de la fauchée des instruments embarqués, déterminent la qualité des mesures et sont essentiels pour la conception des missions spatiales, comme pour l'analyse de leurs résultats. Si l'histoire de ces satellites artificiels est très récente, elle n'est pas souvent écrite et Michel Capderou a choisi de la mêler de manière étroite à son exposé plus scientifique. L'ensemble est très richement illustré de diagrammes conçus par Michel Capderou lui-même (et dont certains sont disponibles grâce à un logiciel accessible sur internet).

★

Le soin apporté à cet ouvrage, la précision de chaque élément, son imbrication avec une science qui continue de se développer, l'originalité d'une synthèse que Michel Capderou a développée au fil d'une longue démarche, en font un exemple rare, qui devrait donner un même plaisir aux étudiants comme aux chercheurs confirmés.

Hervé Le Treut

*Membre de l'Institut de France,
Académie des sciences.*

Table des matières

Préface	V
Avant-propos	XVII
1 Géométrie de l'ellipse	1
1.1 Définition et propriétés	1
1.1.1 Les coniques	1
1.1.2 Définition et propriétés de l'ellipse	2
1.1.3 Applications de la définition	3
1.1.4 Dédution des propriétés	7
1.1.5 Excentricité et aplatissement	13
1.2 Applications et autres caractéristiques	16
1.2.1 Longueur de l'arc d'ellipse	16
1.2.2 Rayon de l'ellipse	17
1.2.3 Rayon de courbure de l'ellipse	19
2 Géodésie	23
2.1 Ellipsoïde terrestre	23
2.1.1 Différentes définitions de la latitude	23
2.1.2 Coordonnées cartésiennes. Grande normale	28
2.1.3 Rayon de courbure	29
2.1.4 Rayon de l'ellipse	29
2.1.5 Degré en latitude, degré en longitude	30
2.1.6 Longueur d'arc de méridien	32
2.2 Altitude par rapport à l'ellipsoïde	34
2.2.1 Définition de l'altitude géodésique et du nadir	34
2.2.2 Latitude liée à l'altitude géodésique	35
2.2.3 Détermination de l'altitude géodésique et du nadir	35
2.3 Aperçu historique	41
2.3.1 Avant les Lumières	41
2.3.2 Une affaire française	42
2.3.3 La géodésie dynamique	47

3	Géopotentiel	49
3.1	Notions préliminaires	49
3.1.1	Référentiels d'étude	49
3.1.2	Rappels sur le travail et le potentiel	50
3.2	Champ et potentiel de gravitation	52
3.2.1	Gravitation	52
3.2.2	Théorème de Gauss	53
3.2.3	Gravité et pesanteur	55
3.3	Calcul du géopotentiel	57
3.3.1	Détermination du potentiel élémentaire	57
3.3.2	Obtention du potentiel par intégration	58
3.3.3	Harmoniques sphériques	60
3.3.4	Développement du potentiel au degré 2	61
3.3.5	Développement du potentiel à des degrés supérieurs	64
3.4	Champ et potentiel de pesanteur pour l'ellipsoïde	65
3.4.1	Calcul du champ et du potentiel	65
3.4.2	Champ de pesanteur à la surface	67
3.4.3	Formule de Clairaut	69
3.4.4	Formule de Somigliana	71
3.5	Géoïde	72
3.5.1	Anomalies de gravité	72
3.5.2	Satellites et géodésie	73
3.5.3	Évolution des modèles de potentiel terrestre	76
3.5.4	Évaluation de la constante d'attraction géocentrique	79
3.6	Annexe : systèmes de référence terrestre	82
3.6.1	Référence céleste	82
3.6.2	Référence terrestre	82
3.7	Annexe : fonctions de Legendre	84
4	Mouvement képlérien	87
4.1	Accélération centrale	87
4.1.1	Accélération dans le cas général	87
4.1.2	Propriétés de l'accélération centrale	88
4.1.3	Mouvement à accélération centrale	89
4.2	Accélération newtonienne	90
4.2.1	Équation de la trajectoire	90
4.2.2	Discussion du type de trajectoire	91
4.3	Mouvement képlérien : trajectoire et période	93
4.3.1	Définition	93
4.3.2	Trajectoires du mouvement périodique	94
4.3.3	Période – Anomalie moyenne M	97
4.3.4	Loi horaire	98
4.4	Temps en fonction de la position – les trois anomalies	99
4.4.1	Expression $t = t(\theta)$ – Anomalie vraie v	99
4.4.2	Expression $t = t(r)$ – Anomalie excentrique E	100
4.4.3	Relation entre les anomalies	102
4.5	Position en fonction du temps – le problème de Kepler	105
4.5.1	Méthodes de résolution du problème de Kepler	105
4.5.2	Méthode numérique de résolution par itération	106

4.5.3	Autres méthodes de résolution	111
4.6	Représentation des anomalies	112
4.6.1	Représentation des anomalies $v(M)$ et $E(M)$	112
4.6.2	Équation du centre	112
4.6.3	Récapitulation sur les anomalies	117
4.7	Intégrales premières du mouvement	125
4.7.1	Lois de conservation	125
4.7.2	Remarque sur l'énergie	127
4.8	Note historique : astronomie et attraction universelle	130
4.8.1	Les lois de Kepler	130
4.8.2	Newton et l'attraction universelle	133
5	Satellite en orbite képlérienne	137
5.1	Le Problème à deux corps	137
5.2	Paramètres orbitaux	139
5.2.1	Repérer le satellite dans l'espace	139
5.2.2	Éléments képlériens	142
5.2.3	Paramètres orbitaux adaptés	143
5.3	Période képlérienne	144
5.4	Annexe : rotation du solide – angles d'Euler et de Cardan	147
6	Satellite en orbite réelle (perturbée)	151
6.1	Forces perturbatrices	151
6.1.1	De l'orbite idéale à l'orbite réelle	151
6.1.2	Ordre de grandeur des forces perturbatrices	152
6.1.3	Potentiel	152
6.1.4	Perturbations et altitude du satellite	153
6.2	Méthode des perturbations : présentation	159
6.2.1	Propagation d'orbite : méthodes numérique et analytique	159
6.2.2	Principe de la méthode	163
6.2.3	Mise en place des crochets de Lagrange	164
6.2.4	Propriétés des crochets de Lagrange	166
6.3	Méthode des perturbations : résolution	167
6.3.1	Calcul des coordonnées	167
6.3.2	Calcul des crochets de Lagrange	170
6.3.3	Équations de Lagrange	171
6.3.4	Éléments orbitaux métriques et angulaires	173
6.3.5	Cas des paramètres mal définis	175
6.3.6	Éléments de Delaunay	176
6.4	Résultat du traitement des perturbations (terme en J_2)	177
6.4.1	Expression du potentiel perturbateur (terme en J_2)	177
6.4.2	Variation des éléments orbitaux	180
6.5	Résultat du traitement des perturbations (cas général)	183
6.5.1	Cas du potentiel terrestre (terme en J_n)	183
6.5.2	Cas du potentiel terrestre complet	189
6.5.3	Autres forces perturbatrices dérivant d'un potentiel	190
6.5.4	Forces perturbatrices ne dérivant pas d'un potentiel	190
6.5.5	Différentes définitions de la période	191
6.6	Annexe : étude du frottement atmosphérique	193

6.6.1	Présentation de l'atmosphère terrestre	193
6.6.2	Densité atmosphérique	194
6.6.3	Modèles atmosphériques	195
6.6.4	Calcul du frottement atmosphérique. Notion de ΔV	195
6.6.5	Influence du frottement sur l'orbite	198
6.6.6	Calculs simplifiés pour une orbite excentrique. Aérofreinage	198
6.7	Note historique : premières déterminations des harmoniques J_n	201
6.7.1	Première détermination de J_2 par satellite	201
6.7.2	Première détermination de J_3 par satellite	202
6.7.3	Premières déterminations des J_n , jusqu'à J_{14}	202
6.8	Note historique : succès du calcul des perturbations	203
6.8.1	Le retard du retour de la comète de Halley	203
6.8.2	La découverte de Neptune par Le Verrier	204
6.8.3	L'avance au périhélie de Mercure	205
6.9	Note astronomique : perturbations et Système solaire	208
6.9.1	La question de la stabilité du Système solaire	208
6.9.2	Précession des équinoxes	210
6.9.3	La Terre vue comme un satellite	211
6.10	Annexe : constantes astronomiques	214
6.10.1	Les systèmes d'unités	214
6.10.2	Les constantes astronomiques	215
6.11	Annexe : sphère d'influence	217
6.11.1	Attractions terrestre et solaire	217
6.11.2	Détermination de la sphère d'influence	219
6.12	Annexe : points de Lagrange	220
6.12.1	Problème des trois corps restreint	220
6.12.2	Étude simplifiée pour les points L_1 et L_2	221
6.12.3	Points de Lagrange et sphère d'influence	223
6.12.4	Les cinq points de Lagrange	223
6.12.5	Points de Lagrange en astronomie	224
6.12.6	Satellites artificiels aux points de Lagrange	225
6.13	Annexe : trigonométrie sphérique	228
6.13.1	Établissement des relations de Gauss	228
6.13.2	Les quinze relations pour le triangle sphérique	228
7	Mouvements relatifs orbite / Terre / Soleil	233
7.1	Mouvement de l'orbite	233
7.1.1	Variations séculaires – cas simplifié	233
7.1.2	Variations séculaires – jusqu'au terme en J_4	238
7.1.3	Cas de « blocage » des mouvements de précession	241
7.1.4	Calcul effectif de la période et de l'altitude	243
7.2	Mouvements de la Terre	246
7.2.1	Mouvement de la Terre autour du Soleil	246
7.2.2	Mouvement de la Terre autour de l'axe des pôles	247
7.2.3	Mouvement des pôles	249
7.2.4	Mouvement orbite / Terre	250
7.3	Mouvement apparent du Soleil	251
7.3.1	Sphère céleste et coordonnées	251
7.3.2	Angle horaire	253

7.3.3	Équation du temps	253
7.3.4	Temps solaire	257
7.3.5	Déclinaison	259
7.3.6	Jour julien, date julienne	261
7.4	Géosynchronisme	262
7.4.1	Définition	262
7.4.2	Calcul de l'orbite	263
7.4.3	Satellites géostationnaires	264
7.4.4	Dérive de l'orbite géostationnaire	265
7.4.5	Maintien à poste	268
7.4.6	Satellites géosynchrones en orbite très excentrée	274
7.5	Héliosynchronisme	275
7.5.1	Définition	275
7.5.2	Constante d'héliosynchronisme	276
7.5.3	Calcul de l'orbite – cas circulaire	277
7.5.4	Calcul de l'orbite – cas elliptique	280
7.5.5	Satellites héliosynchrones	282
7.5.6	Maintien sur orbite	284
8	Trace du satellite	285
8.1	Position du satellite sur son orbite	285
8.1.1	Étude du mouvement avec les angles d'Euler	285
8.1.2	Position du satellite en coordonnées cartésiennes	288
8.1.3	Position du satellite en coordonnées sphériques	288
8.2	Trace du satellite	289
8.2.1	Équation de la trace	289
8.2.2	Latitude maximale atteinte	290
8.3	Trace du satellite en orbite circulaire	291
8.3.1	Équation de la trace du satellite	291
8.3.2	Décalage équatorial	292
8.3.3	Inclinaison apparente	295
8.3.4	Angle de la trace avec un méridien	298
8.3.5	Vitesse du satellite et de sa trace	299
8.3.6	Équation de la trace avec élimination du temps	303
8.4	Annexe : Éléments orbitaux NORAD	305
8.4.1	Présentation de l'organisme NORAD	305
8.4.2	Les « Deux Lignes NORAD » (TLE)	305
8.4.3	Décodage des lignes NORAD	306
8.4.4	Conditions d'utilisation	310
8.5	Annexe : Projections cartographiques	311
8.5.1	Définitions et propriétés	311
8.5.2	Classement des projections (type, aspect)	312
8.5.3	Description de trois projections	313

9	Orbite et mission	321
9.1	Classement par type d'orbite	321
9.2	Satellites classés par mission	322
9.2.1	Les premiers satellites	324
9.2.2	Satellites pour la géodésie	326
9.2.3	Satellites pour l'environnement physique terrestre	328
9.2.4	Satellites pour la météorologie et l'étude du climat	336
9.2.5	Satellites pour la télédétection et la surveillance	356
9.2.6	Satellites pour l'océanographie	359
9.2.7	Satellites pour la navigation	361
9.2.8	Satellites pour les communications	361
9.2.9	Satellites pour l'astronomie, l'astrophysique	381
9.2.10	Satellites pour la physique fondamentale	390
9.2.11	Satellites technologiques	391
9.2.12	Satellites à mission spécifiquement militaire	392
9.2.13	Satellites avec présence humaine	395
9.2.14	Satellites non scientifiques	396
9.3	Annexe : le retard dans la programmation des missions spatiales	397
10	Orbite par rapport au Soleil : heure, passage, éclipse	399
10.1	Cycle par rapport au Soleil	399
10.1.1	Heure de passage	399
10.1.2	Calcul du cycle C_S	400
10.1.3	Cycle C_S et caractéristiques de l'orbite	402
10.1.4	Cycle et heure de passage au nœud ascendant	406
10.2	Passage pour un satellite héliosynchrone	407
10.2.1	Passage à une latitude donnée	407
10.2.2	Choix de l'heure locale au nœud ascendant	411
10.2.3	Calcul de la dérive de l'heure locale	417
10.3	Angle du plan orbital avec le Soleil (angle β)	420
10.3.1	Position de la normale au plan orbital	420
10.3.2	Angle β	421
10.4	Étude de l'éclipse pour les orbites circulaires	424
10.4.1	Durée de l'éclipse	424
10.4.2	Orbite LEO héliosynchrone	427
10.4.3	Orbite LEO héliosynchrone crépusculaire	427
10.4.4	Orbite MEO	433
10.4.5	Orbite GEO	433
10.5	Conditions générales d'éclipse solaire	435
10.5.1	Établissement général des conditions d'éclipse	435
10.5.2	Critère d'éclipse	437
11	Orbite par rapport à la Terre : phasage, altitude	439
11.1	Contrainte de phasage	439
11.1.1	Définition du phasage	439
11.1.2	Calcul du cycle de phasage C_T	440
11.1.3	Triplet de phasage	442
11.2	Phasage pour les satellites LEO héliosynchrones	443
11.2.1	Méthode pour l'obtention du phasage	443

11.2.2	Module de phasage	443
11.2.3	Diagramme de phasage	444
11.2.4	Phasage défini par le triplet de phasage	445
11.2.5	Phasage sur un jour	455
11.3	Phasage pour les satellites LEO non héliosynchrones	455
11.3.1	Obtention du triplet de phasage	455
11.3.2	Phasage, altitude et inclinaison	461
11.4	Phasage pour les satellites MEO et HEO	462
11.5	Grille de phasage	462
11.5.1	Construction de la grille de phasage	462
11.5.2	Intervalle de grille	463
11.5.3	Sous-cycle de phasage	467
11.5.4	Grilles de référence	470
11.5.5	Points de grille de phasage	472
11.6	Maintien sur orbite du satellite phasé	478
11.7	Indice de phasage	482
11.7.1	Définition de l'indice de phasage	482
11.7.2	Phasage parfait ou imparfait	483
11.7.3	Exemples d'utilisation de l'indice de phasage	484
11.7.4	Indice de phasage et caractéristiques d'orbite	486
11.8	Variation de l'altitude	488
11.8.1	Altitude et paramètres orbitaux	488
11.8.2	Altitude au cours d'une révolution	490
11.8.3	Variation de l'altitude sur une longue période	494
11.9	Orbite gelée	495
11.9.1	Définition de l'orbite gelée	495
11.9.2	Détermination des paramètres gelés	495
11.9.3	Altitude du satellite pour une orbite gelée	498
11.10	Altitude et frottement atmosphérique	500
12	Vue depuis le satellite	503
12.1	Fauchée des instruments	503
12.1.1	Repère orbital local	503
12.1.2	Modes de balayage	504
12.2	Géométrie de vue pour la fauchée	506
12.2.1	Définition des angles	506
12.2.2	Relations entre les angles	508
12.2.3	Fauchée au sol	509
12.2.4	Latitudes vues et recouvrement en latitude	510
12.3	Déformation des pixels	512
12.3.1	Calcul des indices de déformation	512
12.3.2	Déformation des pixels – satellites LEO	513
12.3.3	Déformation des pixels – satellites GEO	517
12.4	Trace des fauchées pour un satellite LEO	517
12.4.1	Fauchée orthogonale	517
12.4.2	Fauchée à lacet variable	524
12.4.3	Fauchée conique	526
12.4.4	Superposition de trace	531
12.5	Vue depuis un satellite GEO	531

12.5.1	Conditions géométriques simplifiées	532
12.5.2	Correspondance entre pixels et coordonnées géographiques	538
13	Échantillonnage spatio-temporel et angulaire	547
13.1	Direction cible-satellite	548
13.1.1	Étude de la direction de visée du satellite	549
13.1.2	Cas des satellites géostationnaires	551
13.1.3	Vue locale	553
13.1.4	Durée de visibilité – satellites LEO	555
13.1.5	Durée de visibilité – satellites HEO	560
13.2	Direction cible-Soleil	563
13.2.1	Étude de la direction de visée du Soleil	563
13.2.2	Lever et coucher du Soleil, midi TSV	565
13.3	Géométrie Soleil-cible-satellite	567
13.3.1	Angles de la géométrie Soleil-cible-satellite	567
13.3.2	Réflexion spéculaire (<i>Sun glint</i>)	568
13.4	Étude illustrée de l'échantillonnage	571
13.4.1	Tableaux mensuels d'échantillonnage	571
13.4.2	Étude du nombre quotidien de passages	583
14	Satellites pour la navigation (GPS)	589
14.1	Principe général du GPS	589
14.1.1	Principe du positionnement dans le cas idéal	589
14.1.2	Principe du positionnement dans le cas réel	590
14.1.3	Détermination de la vitesse de l'utilisateur	593
14.1.4	Perturbations du signal et de la mesure	595
14.1.5	Considérations géométriques et précision des mesures	597
14.1.6	Position sur la Terre : coordonnées géographiques	599
14.1.7	Principe du DGPS (GPS différentiel)	600
14.2	Système Navstar/GPS	601
14.2.1	Mise en place du système	602
14.2.2	Segment spatial	603
14.2.3	Segment de contrôle	607
14.2.4	Segment utilisateur	610
14.2.5	Vue locale	610
14.2.6	Le système Navstar/GPS et les autres	612
14.3	Système Glonass	613
14.3.1	Les trois segments	613
14.3.2	Vue locale - tableau de visibilité	614
14.4	Système Galileo	618
14.4.1	Une affaire européenne	618
14.4.2	Les trois segments	618
14.5	Système Compass	619
14.5.1	Les trois segments	619
14.5.2	Système expérimental Beidou-1	620
14.6	Systèmes d'augmentation	623
14.7	Les systèmes régionaux	625
14.7.1	Le système IRNSS	627
14.7.2	Le système QZSS	627

14.8	Utilisation du GPS hors localisation	629
14.8.1	Radio-occultation	629
14.8.2	Étude de la troposphère grâce aux stations de base	630
14.8.3	Autres applications	630
14.9	Note historique : le premier système	630
14.9.1	Le système Transit	630
14.9.2	Le système soviétique	633
14.10	Annexe : GPS et plaques tectoniques	633
15	Satellite de Mars	635
15.1	Présentation de la planète Mars	635
15.1.1	Mars et l'exploration spatiale	635
15.1.2	Géographie de Mars	641
15.2	Grandeurs géodésiques et astronomiques	645
15.2.1	Données géodésiques	645
15.2.2	Données astronomiques	645
15.2.3	Longitude aréocentrique et jour martien	648
15.2.4	Déclinaison	653
15.2.5	Équation du temps	656
15.3	Satellite en orbite réelle	657
15.3.1	Satellite en orbite képlérienne	657
15.3.2	Accélération perturbatrices	657
15.3.3	Variations séculaires des éléments orbitaux	660
15.4	Orbites remarquables	662
15.4.1	Aréosynchronisme	662
15.4.2	Héliosynchronisme	665
15.5	Trace du satellite	668
15.5.1	Représentation de la trace	668
15.5.2	Inclinaison apparente	675
15.5.3	Vitesse du satellite et de sa trace en orbite circulaire	675
15.6	Orbite par rapport au Soleil : passage, heure, éclipse	676
15.6.1	Heure de passage pour un satellite héliosynchrone	677
15.6.2	Étude de l'éclipse	678
15.7	Orbite par rapport à Mars : phasage, altitude	681
15.7.1	Phasage	681
15.7.2	Altitude	688
15.8	Vue depuis le satellite	691
15.8.1	Géométrie de vue et déformation des pixels	692
15.8.2	Trace des fauchées pour un satellite LMO	692
15.8.3	Prise de vue et inclinaison apparente	694
15.8.4	Vue pour un satellite SMO	695
15.9	Échantillonnage spatio-temporel et angulaire	695
15.9.1	Étude illustrée de l'échantillonnage	699
15.9.2	Réflexion spéculaire (<i>Sun glint</i>)	700
15.10	Satellites naturels	701
15.10.1	Phobos et Déimos	701
15.10.2	Exploration spatiale	703
15.10.3	Vue et échantillonnage	703
15.11	Note historique : Kepler et la planète Mars	704

15.11.1	Calcul de la période de révolution	704
15.11.2	Autres calculs à propos de Mars et de la Terre	707
16	Satellite d'autres corps célestes	709
16.1	Planètes du Système solaire	710
16.1.1	Présentation des planètes	710
16.1.2	Exploration spatiale des planètes	713
16.2	Grandeurs géodésiques et astronomiques (planètes)	721
16.2.1	Données géodésiques et astronomiques	721
16.2.2	Satellite en orbite képlérienne	725
16.2.3	Cartes géographiques	725
16.3	Satellite de planète en orbite réelle	726
16.3.1	Accélération perturbatrices	726
16.3.2	Classification des satellites	726
16.4	Trace du satellite d'une planète	729
16.4.1	Satellite de Mercure	730
16.4.2	Satellite de Vénus	732
16.4.3	Satellite de l'astéroïde Eros	736
16.4.4	Satellite des astéroïdes Vesta et Cérès	738
16.4.5	Satellite de planète géante	741
16.5	Satellites naturels du Système solaire	745
16.5.1	Présentation des satellites naturels	745
16.5.2	Exploration spatiale des satellites naturels	746
16.6	Grandeurs géodésiques et astronomiques (satellites naturels)	747
16.6.1	Données géodésiques et astronomiques	747
16.6.2	Satellite en orbite képlérienne	748
16.6.3	Cartes géographiques	748
16.7	Satellite de satellite naturel en orbite réelle	748
16.7.1	Accélération perturbatrices	748
16.7.2	Classification des satellites	749
16.8	Trace du satellite d'un satellite naturel	754
16.8.1	Satellite de la Lune	754
16.8.2	Satellite d'Europe et de Ganymède	764
16.8.3	Satellite de Titan	765
16.8.4	Satellite de Triton	769
16.9	Note historique : Kepler et le Système solaire	770
17	Planches couleur	773
	Bibliographie	807
	Index	813

Avant-propos

De tous les domaines des sciences et techniques actuelles, l'exploration spatiale est celui qui présente le plus fortement ce contraste fondamental : d'une part, sa base théorique repose sur des principes établis depuis longtemps, historiquement éprouvés, pratiquement immuables, éternels, pourrait-on dire ; et d'autre part, le domaine spatial connaît une évolution technologique effrénée, à croissance exponentielle, qui brasse des enjeux commerciaux, politiques, idéologiques.

De Kepler au GPS...

En ce qui concerne la « base immuable », nous savons que la notion de géopotentiel ou la résolution des équations de Lagrange n'est pas chose facile. Nous espérons, l'expérience de l'enseignement aidant, que nous avons su présenter ces questions de manière claire et intéressante. Pour illustrer les technologies galopantes, nous donnons de nombreux exemples.

★

Ce livre est articulé en six grandes parties.

La première partie (chapitres 1 à 3) est consacrée à la géodésie : nous partons de l'ellipse et de ses propriétés géométriques pour arriver au champ du potentiel terrestre et au géoïde.

La deuxième partie (chapitres 4 à 8) précise l'étude du mouvement du satellite, du cas idéal (képlérien) au cas réel (perturbé).

La troisième partie (chapitres 9 à 11) nous plonge dans le monde opérationnel des satellites : quelles sont leurs missions et comment on imagine les orbites en fonction des missions. Nous y développons des points originaux, comme la constante d'héliosynchronisme k_h et, pour le phasage, la constante κ et l'indice Φ . L'illustration est abondante, toujours en relation avec des programmes spatiaux (passés, actuels ou futurs).

La quatrième partie (chapitres 12 et 13) s'intéresse, d'un point de vue géométrique, aux instruments à bord du satellite. Après avoir envisagé les différentes manières d'observer la Terre depuis un satellite, nous étudions l'échantillonnage : dans quelles conditions (visée, fréquence de visite) un point donné de la Terre voit le satellite.

Nous consacrons ensuite un chapitre entier (chapitre 14) au GPS : cette technique de navigation, entièrement basée sur les satellites, fait appel à presque toutes les branches de la physique moderne.

Dans la dernière partie (chapitre 15 et 16), nous quittons la Terre pour appliquer toutes ces théories à Mars, puis aux autres planètes du Système solaire, et même aux satellites de planète autour desquels gravitent des satellites artificiels.

★

Ixion, logiciel d'orbitographie et d'échantillonnage, sert d'ossature à tout ce livre.

Nous l'avons développé dans un premier temps comme un outil d'aide à la compréhension de toutes les questions (paramètres orbitaux, géométrie satellite-pixel-Soleil, etc.) que nous nous posions, au LMD, dans le traitement des données spatiales. Dans un second temps, la précision d'*Ixion* ayant été vérifiée par sa confrontation avec les données réelles, nous l'avons étendu à tous les types d'orbite, puis nous lui avons ajouté un volet pédagogique.

Le logiciel *Ixion* sert depuis à des études préliminaires, dites de stratégie orbitale, qui permettent d'adapter au mieux les paramètres orbitaux aux phénomènes physiques qu'on veut observer. Parmi les orbites étudiées dans ce cadre, nous citerons celle du satellite franco-indien Megha-Tropiques et celle du projet de mission martienne MEMO.

Ixion/Web représente la partie d'*Ixion* maintenant accessible en ligne par Internet.

Atlas, le logiciel de cartographie mathématique que nous avons créé, a été couplé à *Ixion* pour les représentations graphiques des orbites et des traces. Les cartes présentées, nous l'espérons, seront agréables et utiles au lecteur et le changeront de l'habituelle platitude et tristesse cartographique des projections utilisées dans ce domaine.

★

Nous avons choisi de nombreux exemples dans les expériences qui nous sont familières (satellite Megha-Tropiques, instruments ScaRaB et CERES, etc.). Elles peuvent paraître un peu sur-représentées dans cet ouvrage – autant parler de sujets dont on connaît les détails !

★

Parce qu'il est centré sur la mécanique spatiale et la géométrie d'observation (et ce qui en découle, comme l'échantillonnage spatio-temporel), ce livre n'aborde aucun aspect du satellite en tant qu'objet technologique : pas un mot sur les lanceurs, pas un mot sur les instruments à bord du satellite (sauf pour l'aspect géométrique de la fauchée, qui joue sur la mission).

En se focalisant sur le thème des orbites, nous avons eu le souci de démontrer, ou d'expliquer, toutes les formules utilisées. Cela peut paraître un peu austère, et c'est pourquoi nous avons égayé le propos avec beaucoup d'exemples et d'illustrations. Les exemples font découvrir des formes d'orbite inattendues... Certaines photographies montrent quel degré de précision est aujourd'hui atteint par les images prises par les instruments embarqués à bord des satellites.

Pour rendre ce propos vivant, nous avons aussi insisté sur l'aspect historique, en présentant quelques pages des livres fondateurs de la mécanique céleste et en reprenant quelques-uns de leurs résultats qui nous laissent admiratifs.

De Kepler au GPS...

Nous vous invitons à un voyage dans l'espace... et dans le temps.

Michel Capderou
Palaiseau, Paris,
juillet 2011.

Ce travail a été mené dans le cadre du Laboratoire de météorologie dynamique (LMD) dont je remercie le directeur, Vincent Cassé.

Le LMD est une unité mixte de recherche du Centre national de la recherche scientifique (CNRS), de l'École Polytechnique, de l'École normale supérieure (ENS) et de l'université Pierre et Marie Curie (UPMC, Paris). Il fait partie de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), fédération de six laboratoires publics de recherche en sciences de l'environnement en Ile-de-France.

Durant l'élaboration de ce livre, les remarques et les conseils avisés de Jacques Lefrère, François Forget et Florent Deleflie m'ont été très utiles et je les remercie chaleureusement.

J'ai également une pensée très reconnaissante pour Rémy Roca, Olivier Chomette, Patrick Raberanto et toute l'équipe Megha-Tropiques (CEET/LMD), pour Karim Ramage, *webmaster* d'*Ixion/Web*, pour mes collègues de l'université et du CNRS, François Barlier, Christophe Boitel, Pierre Briole, Xavier Collilieux, Michel Desbois, Albert Hertzog, Robert Kandel, Richard Kerner, Julien Lenseigne, Richard Marchand, Jérôme Sirven, Aymeric Spiga.

Le séjour que m'a offert la *Fondation des Treilles* restera, par la qualité de son accueil, un souvenir inoubliable lié à la rédaction de ce livre.

J'ai été sensible à la confiance que m'ont témoignée les Éditions Springer. Merci à Nathalie Huilleret et Charles Ruelle.

Notes de présentation

Figures

Lorsqu'une page comporte deux figures sous le même numéro, il est sous-entendu que celle du haut correspond à (a), celle du bas à (b).

Séparateur décimal

Nous avons suivi les règles typographiques classiques en français (en usage à l'Imprimerie nationale). Cependant, une exception a été faite pour le séparateur décimal : nous avons remplacé la virgule par le point. Cela permet d'avoir une notation homogène avec les sorties informatiques, qu'elles soient sous forme de graphe ou de texte.

Avertissement éditorial

Nous avons publié, en 2003, *Satellites : orbites et missions*, chez le même éditeur.

Ce livre est épuisé. Plutôt que de sortir une édition revue et corrigée nous avons opté pour un nouveau livre. Certes, les lois de Kepler sont démontrées à l'identique et le classement des missions n'a pas beaucoup changé...

Mais la présentation de nombreuses parties est souvent bien différente : des années d'enseignement supplémentaires amènent à des recentrages pédagogiques, à des évolutions de points de vue. Les questions, les remarques des étudiants et des collègues laissent des traces dans la nouvelle rédaction.

En plus de tout cela, par rapport au livre de 2003, nous avons ajouté une partie en trois chapitres sur la géodésie et un chapitre entier sur le GPS. Sans compter la contribution de tous les satellites lancés entre 2003 et 2011.

Nous avons aussi augmenté l'ouvrage d'une touche historique, en insistant particulièrement sur l'apport fondamental de Kepler à la naissance de la mécanique céleste.

Ιξίων

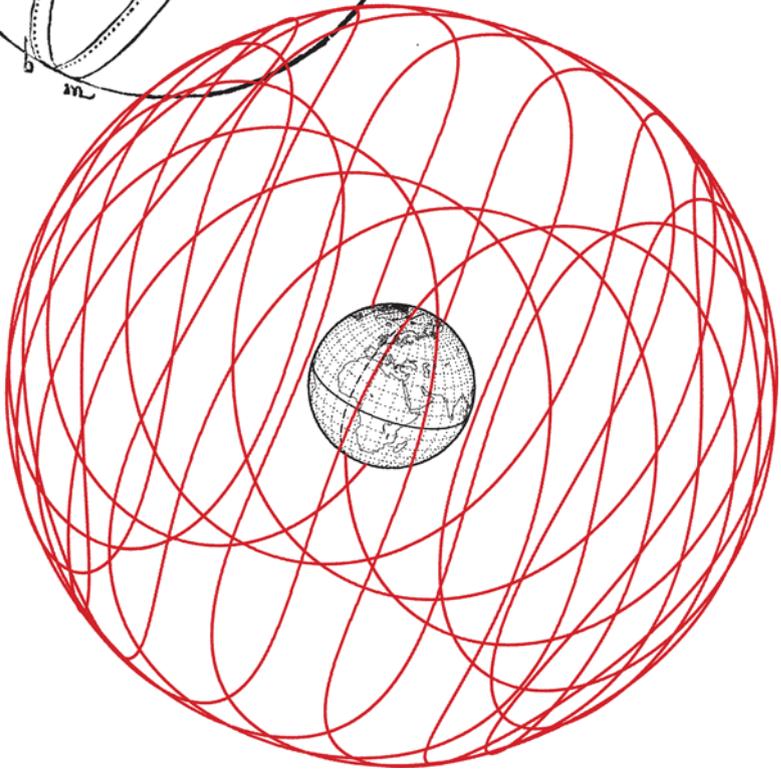
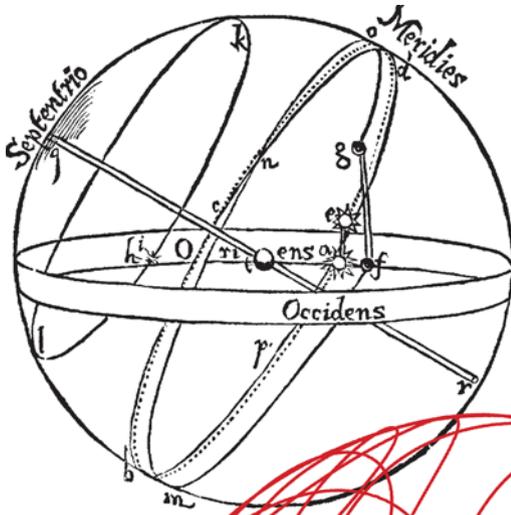
IXION, figure de la mythologie grecque, n'est pas, à proprement parler, un personnage très recommandable. Roi des Lapithes, il fut particulièrement odieux le jour de son mariage : il fit tomber son futur beau-père, roi lui aussi, dans un piège enflammé pour éviter de payer la dot.

Cet acte, crime suprême car bafouant les lois de l'hospitalité, lui valut la réprobation de tous les dieux, qui refusèrent de le purifier. Tous... sauf Zeus : en matière de parjure et autres délits, c'était un connaisseur. Il accepta donc de purifier Ixion et éprouva même de la sympathie pour ce roi décidé. Il le convia à l'Olympe, lui offrit le gîte et le couvert. Et, signe exceptionnel d'amitié, lui fit boire l'ambrosie, qui rend immortel.

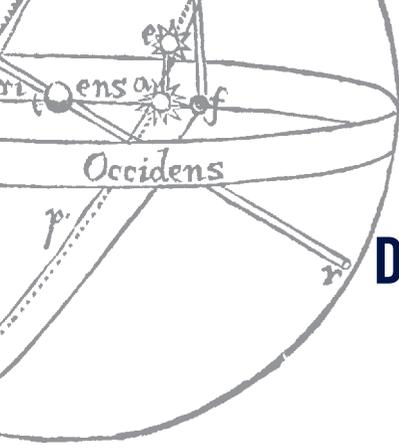
Ixion, admirateur des frasques de Zeus, et rendu à l'aise par cette familiarité olympienne, laissa un jour trainer avec insistance son regard sur les cuisses d'Héra. Là, c'en était trop ! Le roi des dieux se mit à hurler : « il faut respecter son bienfaiteur ». Il attacha Ixion à une roue enflammée et le projeta pour qu'il tourne à jamais dans le ciel.

Comme il était devenu immortel... le malheureux tourne encore. On peut donc considérer Ixion comme le premier de tous les satellites artificiels.

Nous avons choisi son nom pour notre logiciel.



De Kepler au GPS.



SATELLITES DE KEPLER AU GPS

Michel Capderou

Préface d'Hervé Le Treut

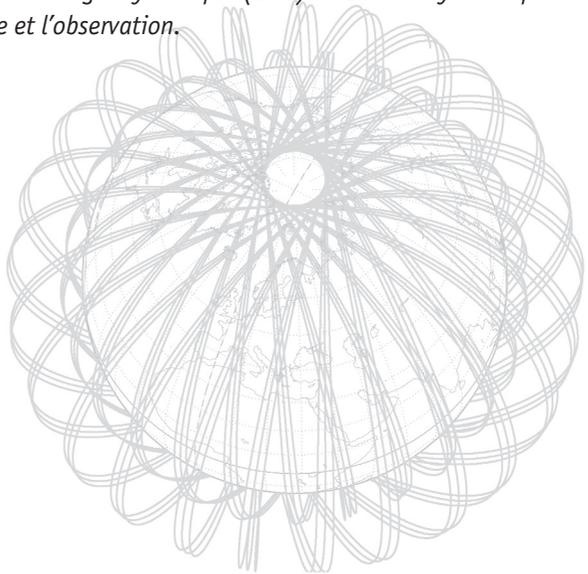
Ce livre traite des orbites des satellites artificiels qui, cinquante ans après Spoutnik, sont devenus des instruments indispensables à de nombreux domaines d'activité (économie, météorologie, télécommunications, navigation, télédétection, etc.).

L'auteur montre leur grande variété, tant au niveau de leur forme (de circulaire à hautement elliptique) que de leurs propriétés (géostationnaire, héliosynchrone, etc.). Précédé d'une introduction sur la géodésie, l'ouvrage expose notamment les équations fondamentales de la mécanique pour ensuite expliquer et démontrer les propriétés relatives à tous les types d'orbites.

La présentation s'appuie sur de très nombreux exemples concrets, obtenus grâce au logiciel IXION, développé par l'auteur, et qui est utilisé depuis plusieurs années en recherche spatiale. L'ouvrage intègre en outre des notes historiques afin de sensibiliser le lecteur aux principales étapes de la pensée scientifique qui nous ont conduits de Kepler au GPS.

Ce livre s'adresse aux chercheurs, enseignants et étudiants travaillant dans le domaine des satellites. Les ingénieurs, les géographes et toutes les personnes concernées par l'exploration spatiale y trouveront de précieux éléments d'information.

Michel Capderou est maître de conférences à l'université Pierre et Marie Curie (UPMC) et chercheur au Laboratoire de météorologie dynamique (LMD) à l'École Polytechnique. Il travaille sur la stratégie orbitale et l'observation.



75 € T.T.C.

ISBN : 978-2-287-99049-6



9 782287 990496

› springer.com