

Christian GENTILI

Guide de localisation des astres



Extrait de la publication

Guide de localisation des astres

Christian Gentili



17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtabœuf
BP 112, 91944 Les Ulis Cedex A

Couverture : Jérôme Lo Monaco

Maquette intérieure : Exegraph

ISBN : 978-2-7598-0059-9

Imprimé en France

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 destinés 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 droits 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.

© EDP Sciences, 2008

*Grâce à toi, Fabrice,
qui voulait toujours aller au fond des choses,
cet ouvrage a pu voir le jour.*

Sommaire

Avant-propos	15
---------------------------	----

Chapitre 1

Mécanique céleste

1 Structure cosmique	20
1.1 Notre système solaire	20
<i>Soleil</i>	20
<i>Planètes</i>	20
<i>Astéroïdes et comètes</i>	21
<i>Autres corps</i>	22
Satellites naturels	22
Satellites artificiels	22
1.2 Galaxies	23
<i>Notre Galaxie</i>	23
<i>Amas galactiques</i>	24
2 Durées	25
2.1 Jours et années	25
<i>Les différents jours</i>	25
Jour sidéral	25
Jour solaire	25
<i>Les différentes années</i>	27
Année sidérale	27
Année tropique	27
Année julienne, calendriers julien et grégorien	28

2.2 Périodes	28
<i>Périodes synodique et sidérale</i>	28
<i>Relation entre les deux périodes</i>	29
3 Distances	30
3.1 Unité astronomique	31
3.2 Année-lumière et parsec	33
Exercices	36
E1-1 Jour Julien	36
E1-2 Périodes des planètes	37

Chapitre 2

Rappels sur les coniques

1 Définition par foyer et directrice	44
1.1 Équation cartésienne	44
1.2 Équation polaire	45
<i>Établissement de l'équation</i>	45
<i>Cas de l'ellipse</i>	46
Détermination de a, c, b.....	47
Détermination de p, k, d, e.....	47
Précisions sur le vocabulaire.....	47
<i>Cas de l'hyperbole</i>	48
1.3 Passage de l'équation polaire à l'équation cartésienne	48
<i>Cas où $e \neq 1$</i>	48
<i>Cas où $e = 1$</i>	49
2 Définition bifocale	49
2.1 Cas de l'ellipse	49
2.2 Cas de l'hyperbole	49
3 Évolution des courbes représentatives	50
3.1 Cas $e \rightarrow 0$	51
3.2 Cas $e \rightarrow \infty$	51
Exercices	52
E2-1 Géométrie de l'ellipse en fonction du demi-grand axe et de l'excentricité.....	52
E2-2 Équation commune aux coniques en fonction du paramètre et de l'excentricité.....	54

Chapitre 3

Mouvements à accélération centrale

1	Rappels de cinématique du point	58
2	Propriétés du mouvement à accélération centrale	59
2.1	Définition du mouvement à accélération centrale.....	59
2.2	Loi des aires.....	60
2.3	Formules de Binet.....	61
	Établissement des formules.....	61
	Application dans le cas où $\vec{\Gamma} = -\frac{\mu}{\rho^2} \vec{I}$	61
3	Expressions de V et Γ selon l'excentricité	62
3.1	Expressions de la vitesse.....	62
	Cercle ($e = 0$).....	62
	Ellipse ($0 < e < 1$).....	62
	Parabole ($e = 1$).....	63
	Hyperbole ($e > 1$).....	64
3.2	Expressions de l'accélération centrale.....	64
	Cercle	64
	Ellipse	64
	Parabole	64
	Hyperbole.....	65
4	Orientation du vecteur vitesse	65
4.1	Angle avec le rayon vecteur.....	65
4.2	Composantes du vecteur vitesse	66
	exercices	68
E3-1	Vitesses en certains points de l'ellipse ; relations déduites	68
E3-2	Vitesses des planètes du système solaire.....	70

Chapitre 4

Mouvement dans le repère de Frenet

1	Détermination du repère de Frenet	74
2	Rayon de courbure	75
2.1	Définition	75

2.2 Expressions	76
<i>Calcul de $R(\rho, \rho', \rho'')$</i>	76
<i>Expression dans le cas où la trajectoire est une conique,</i> <i>$\rho = p/l + e \cos \theta$</i>	76
3 Accélération, composantes et module	77
3.1 Expressions générales	77
3.2 Composante tangentielle Γ_τ	78
<i>Accélération tangentielle dans le cas du mouvement</i> <i>à accélération centrale</i>	78
<i>Cas où l'accélération centrale est en $1/\rho^2$,</i> <i>c'est-à-dire $\rho = p/l + e \cos \theta$</i>	79
3.3 Composante normale Γ_N	79
<i>Accélération normale dans le cas du mouvement</i> <i>à accélération centrale</i>	79
<i>Cas où l'accélération centrale est en $1/\rho^2$,</i> <i>c'est-à-dire $\rho = p/l + e \cos \theta$</i>	80
3.4 Module et expressions vectorielles	80
<i>Module</i>	80
<i>Cas du mouvement obéissant à la loi des aires</i>	80
<i>Cas où la trajectoire est une conique</i>	80
<i>Expressions vectorielles</i>	80
Exercices	82
E4-1 Accélération centrale de la forme $\vec{\Gamma} = -\frac{K}{\rho^3}\vec{I}$	82
E4-2 Cas particulier : accélération centrale de la forme $\vec{\Gamma} = -\frac{C^2}{\rho^3}\vec{I}$...	84

Chapitre 5 Anomalie et orbite

1 Anomalies	88
1.1 Temps du passage	88
<i>Définitions</i>	88
<i>Équation de Kepler</i>	89
1.2 Relations entre anomalies vraie et excentrique	89
<i>Rayons ρ et ρ'</i>	89
<i>Relations trigonométriques liant θ et φ</i>	89
<i>Application à l'expression de la vitesse et de l'accélération</i>	90

2 Paramétrage avec l'anomalie excentrique	91
2.1 Caractérisation paramétrique de l'ellipse	91
<i>Coordonnées en fonction du paramètre φ</i>	91
<i>Vecteur tangent unitaire $\vec{\tau}$ et équation de la normale en P</i>	91
<i>Vecteur normal unitaire \vec{n} et équation de la tangente en P</i>	92
<i>Construction géométrique de la tangente et de la normale</i>	93
<i>Rayon de courbure</i>	94
2.2- Équation paramétrique de la développée	95
Exercices	97
E5-1 Temps de l'intersection d'une comète avec l'écliptique	97
E5-2 Durée et date des saisons	102
E5-3 Réflexion sur l'ellipse	104

Chapitre 6

3^e loi de Kepler et référentiels

1 Lois de Kepler pour un centre attractif fixe	110
1.1 Rappel des hypothèses	110
1.2 3^e loi de Kepler	111
<i>Formulation</i>	111
<i>Expressions numériques</i>	112
2 Correction à la 3^e loi de Kepler	113
2.1 Référentiel galiléen	113
<i>Cas de deux corps A et B</i>	113
<i>Cas de l'ensemble de corps A, B, C, ..., K</i>	114
2.2 Référentiel relatif	115
<i>Accélération dans un référentiel galiléen</i>	115
<i>Accélération dans le référentiel héliocentrique</i>	115
<i>Accélération dans un référentiel lié à la planète</i>	116
2.3 Masses des planètes et des satellites	116
Exercices	119
E6-1 Système de deux corps dans le référentiel du centre de masse	119
E6-2 Système planète-satellite naturel	122

Chapitre 7

Énergie et vitesse selon la trajectoire

1	Caractérisation énergétique des trajectoires	128
1.1	Énergie potentielle, cinétique et mécanique	128
	<i>Énergie potentielle</i> E_p	128
	<i>Énergie cinétique</i> E_c	129
	<i>Énergie mécanique</i> E	130
	<i>Énergie fournie</i> E_f	131
1.2	Trajectoire déduite de la loi de conservation de l'énergie	132
2	Vitesses et trajectoires	133
2.1	Vitesses cosmiques	133
	<i>1^{re} vitesse cosmique</i>	133
	<i>2^e vitesse cosmique</i>	134
2.2	Paramètres altitude et vitesse de lancement	136
	Exercices	139
E7-1	Satellite géostationnaire	139
E7-2	Transfert d'orbite de Hohmann	141
E7-3	Trajectoire à énergie minimale vers Mars	146
E7-4	Interaction sonde-planète	151

Chapitre 8

Formules pour mouvement elliptique

1	Formulaire déduit du paramétrage	160
1.1.	Relations en fonction de la période T , du demi-grand axe a , de l'excentricité e	160
1.2.	Relations en fonction de la constante d'accélération μ , du demi-grand axe a , de l'excentricité e	161
1.3	Relations en fonction de la constante d'accélération μ , de l'énergie massique $\frac{E}{m}$, de l'excentricité e	161
1.4.	Relations en fonction de la constante d'accélération μ , de la période T , de l'excentricité e	162
1.5.	Relations en fonction de la période T , de l'énergie massique $\frac{E}{m}$, de l'excentricité e	163

2	Longueur et surface des orbites elliptiques	164
2.1	Longueur de l'orbite	164
	<i>Rappel des formules mathématiques</i>	164
	Longueur d'un arc de courbe	164
	Expression en coordonnées polaires	165
	Expression en coordonnées paramétriques	165
	<i>Application à l'ellipse</i>	165
	Expression en coordonnées polaires	165
	Expression en coordonnées paramétriques	165
	Expression à partir de la vitesse	166
	<i>Approche du périmètre</i>	166
	Obtention par développement en série d'une intégrale elliptique	166
	Expressions en fonction des demi-grand axe et petit axe	167
	<i>Longueur d'orbites planétaires</i>	168
2.2	Surface de l'orbite	169
	<i>Aire d'un secteur</i>	169
	<i>Application à l'ellipse</i>	170
	<i>Angle médian</i>	171
	Exercices	173
E8-1	Caractérisation du mouvement elliptique par rayons et vitesse	173
E8-2	Éléments orbitaux en fonction de la période et de la vitesse au péricentre et à l'apocentre	174
E8-3	Trajectoire déduite du rayon et du vecteur vitesse en un point	177
E8-4	Trajectoire de la sonde <i>Giotto</i> vers la comète de Halley : le problème de Lambert	180

Chapitre 9

Repérage des astres par rapport à la Terre

1	Coordonnées géographiques	188
1.1	Parallèles et latitude	188
1.2	Méridiens et longitude	188
1.3	Coordonnées d'un point géographique	188
2	Coordonnées locales	190
2.1	Définition du repère	190
2.2	Hauteur et azimut d'un astre	190
2.3	Vertical de l'astre et plan méridien du lieu	191

2.4	Distance zénithale.....	192
2.5	Monture alt-azimutale	193
3	Coordonnées horaires	194
3.1	Repère lié à la sphère terrestre.....	194
3.2	Déclinaison	194
3.3	Cercle horaire de l'astre et angle horaire.....	195
3.4	Angle horaire et temps.....	197
3.5	Monture équatoriale.....	197
4	Relations entre coordonnées horaires et locales	198
4.1	Triangle sphérique.....	198
	<i>Triangle de position</i>	198
	<i>Formules fondamentales de la trigonométrie sphérique</i>	199
4.2	Passage des coordonnées horaires aux coordonnées horizontales	201
	<i>Détermination de la hauteur h</i>	201
	<i>Détermination de l'azimut Z</i>	202
	<i>Point astronomique</i>	203
4.3	Passage des coordonnées horizontales aux coordonnées horaires	204
	Exercices	205
E9-1	Orthodromie	205
E9-2	Intérêt d'une base de lancement équatoriale	206
E9-3	Coordonnées d'un satellite géostationnaire au lieu d'observation	211
E9-4	Coordonnées locales du Soleil au cours de la journée.....	214

Chapitre 10

Coordonnées équatoriales et écliptiques

1	Voûte céleste	220
1.1	Constellations	220
1.2	Magnitude	222
1.3	Nom des étoiles	222
1.4	Catalogues des étoiles et objets non stellaires.....	223
2	Coordonnées équatoriales	223
2.1	Repère lié à la sphère céleste	223
2.2	Déclinaison	224

2.3 Ascensions verse et droite	225
2.4 Passerelle avec les coordonnées horaires	226
2.5 Coordonnées de quelques étoiles	227
3 Coordonnées écliptiques	228
3.1 Repère, latitude b et longitude l	228
3.2 Relations de passage entre coordonnées écliptiques et équatoriales	230
<i>Coordonnées équatoriales (α, δ) à écliptiques (l, b)</i>	230
<i>Coordonnées écliptiques (l, b) à équatoriales (α, δ)</i>	231
4 Temps	231
4.1 Temps dérivés du temps solaire	231
<i>Temps solaire vrai local</i>	231
<i>Temps solaire moyen</i>	232
<i>Équation du temps</i>	232
<i>Temps civil</i>	233
<i>Temps universels et fuseaux horaires</i>	233
<i>Temps légal</i>	234
4.2 Temps des éphémérides et temps atomique international	234
<i>Temps des éphémérides</i>	234
<i>Temps atomique international</i>	235
<i>Temps universel coordonné</i>	235
4.3 Temps sidéral	236
Exercices	239
E10-1 Matrices rotations appliquées au changement de systèmes de coordonnées	239
E10-2 Influence du recul du point γ sur la dérive des étoiles	243
E10-3 Lever, coucher, passage au méridien des étoiles	246
E10-4 Visibilité des étoiles	250

Chapitre 11

Repérage des orbites et éphémérides

1 Éléments d'orbites	254
1.1 Plans et axes de repère	254
<i>Plan orbital</i>	254
<i>Plan de référence</i>	254
<i>Ligne des nœuds</i>	254
<i>Ligne de référence</i>	255

1.2 Position de l'orbite	255
<i>Ascension droite</i>	255
<i>Inclinaison</i>	255
<i>Argument du péricentre</i>	256
1.3 Position de l'astre sur l'orbite	256
<i>Par anomalie vraie</i>	256
<i>Par anomalie moyenne</i>	257
<i>Date au périhélie</i>	257
2 Variables elliptiques et éphémérides	258
2.1 Éléments moyens	258
2.2 Théories planétaires, base des éphémérides	261
<i>Le problème à N corps pour les planètes</i>	261
<i>Historique de sa résolution</i>	261
3 Coordonnées dans un repère de référence donné	262
3.1 Cas d'un satellite terrestre	262
3.2 Cas d'une planète	264
<i>Passage des coordonnées orbitales à écliptiques</i>	264
<i>Translation du repère écliptique</i>	264
Exercices	266
E11-1 Satellites semi-synchrones MOLNYA	266
E11-2 De la trajectoire elliptique aux coordonnées équatoriales de Vénus	273
E11-3 Coordonnées équatoriales de Vénus par les éphémérides	279
Index	283

Avant-propos

Notre univers ne cesse de nous fasciner et nombreux sont ceux qui consacrent leur vie professionnelle ou leurs loisirs à son observation, afin d'en percer les mystères...

Il y a de par le monde des milliers de clubs et de sociétés d'astronomie. Parallèlement, les programmes spatiaux d'exploration de notre système solaire sont toujours actifs et sont passés du stade de compétition à celui, très fructueux, de coopérations internationales orchestrées par des organisations prestigieuses telles que la NASA, l'Institut russe de la recherche spatiale, l'Agence spatiale européenne...

Pointer un télescope sur un astre ou une antenne sur un satellite, déduire sa position de celle des étoiles et connaître l'instant du crépuscule, définir le mouvement d'une sonde dans le milieu interplanétaire, déterminer à un instant donné la position d'une comète ou d'un satellite artificiel sur l'orbite assignée par sa mission sont autant de problèmes qui, nous l'espérons, trouveront leur solution dans le présent ouvrage. Dans cet objectif, et afin de s'adresser au plus grand nombre, nous avons adopté une démarche très progressive, guidée également par le souci d'éviter au lecteur d'avoir à rechercher dans d'autres sources les supports mathématiques et physiques nécessaires à la compréhension.

Le milieu au sein duquel nous évoluerons, le système solaire, est présenté dans un chapitre introductif où nous précisons un certain nombre de grandeurs astronomiques fondamentales. À ce stade, il convient de saluer le travail des astronomes, en particulier dans le domaine de la mesure et des unités ;

aussi nous sommes-nous imposés d'écrire les grandeurs données et calculées avec la précision qui s'impose. La précision ultime pourra être recherchée par exemple dans les publications du Bureau des longitudes mentionnées en bibliographie. Six chapitres vont ensuite nous faire découvrir les trajectoires et les mouvements imposés par la gravitation universelle.

Grâce à la première loi de Kepler, nous savons que les planètes, comètes, satellites artificiels, décrivent des coniques : un rappel mathématique, effectué au chapitre 2, nous permettra de déduire de ces courbes un certain nombre de caractéristiques bien utiles pour la suite. Le système de coordonnées polaires avec le repère de Frenet est bien adapté à l'étude de ces mouvements plans, générés par une accélération centrale ; c'est ce que nous montrerons aux chapitres 3 et 4.

L'angle polaire de la trajectoire elliptique est l'anomalie vraie ; toutefois, l'équation de Kepler donne la position de l'astre à un instant donné en fonction de l'anomalie excentrique. La loi des aires, ou deuxième loi de Kepler, permet d'aboutir à cette équation fondamentale. Ces points seront développés au chapitre 5. La troisième loi sera présentée au chapitre 6, où nous indiquons les corrections à apporter afin de préserver le caractère réciproque des forces de gravitation ; ce sera l'occasion de nous pencher sur la nature des référentiels.

Enfin, une autre conséquence pour un corps soumis à une force d'origine gravitationnelle est que l'énergie mécanique sur la trajectoire est constante ; cela nous permettra de redécouvrir que ces trajectoires sont elliptiques, et nous noterons également, dans le chapitre 7, que la connaissance de la vitesse de lancement d'un satellite permet aussi d'appréhender la nature de la conique.

Le chapitre 8 vient clore cette première partie par une série de formules et relations complémentaires. Nous sommes dorénavant en mesure de positionner à un instant donné un astre dans le repère centré sur le foyer de sa trajectoire plane ; notre objectif est maintenant de le situer dans d'autres repères appropriés de l'espace : c'est l'objet essentiel de la deuxième partie.

Les repères généralement utilisés par les navigateurs et les astronomes sont précisés aux chapitres 9 et 10. Partant des coordonnées horizontales terrestres, nous définirons ensuite les coordonnées horaires puis équatoriales et écliptiques basées en particulier sur les références du méridien de Greenwich et de l'axe des équinoxes. Ce sera l'occasion d'insister sur les différents temps pouvant intervenir dans ces changements de repères et dans la détermination de l'instant du passage d'un astre.

Le dernier chapitre vise à une meilleure compréhension des éphémérides. Nous établirons par exemple comment, grâce à la connaissance des six variables

elliptiques, nous passons des coordonnées polaires de l'astre ou du satellite artificiel à ses coordonnées équatoriales terrestres.

Pour les étudiants, cet ouvrage permettra d'approfondir le cours de mécanique newtonienne d'un système de points matériels ; il constitue également une introduction à un enseignement d'astronomie. Mais, par l'ensemble des formules qu'il contient, par les exercices entièrement résolus en fin de chaque chapitre – plus de trente, dont certains sont de véritables bureaux d'études nécessitant l'utilisation du tableur –, ce livre devrait intéresser, outre les astronomes et navigateurs, tous ceux, techniciens et ingénieurs, qui auraient à traiter du mouvement et de la localisation des astres, satellites artificiels, sondes spatiales, et que nous appellerons navigateurs de l'espace...

Chapitre 1

Mécanique céleste

Au cours de ce chapitre introductif nous précisons l'espace au sein duquel nous évoluerons et les grandeurs fondamentales sur lesquelles nous nous appuierons. L'espace est notre système solaire, infime élément de notre Galaxie, que nous explorons à l'aide de satellites et de sondes. Toujours à l'échelle planétaire, nous caractérisons, outre la masse, les grandeurs liées au temps et à la durée d'une part et celles relatives aux distances d'autre part.

Pour terminer cette présentation, nous proposons un premier exercice définissant le jour julien correspondant à une date donnée, référence que l'on utilisera largement au dernier chapitre.

Le deuxième exercice porte en particulier sur les périodes synodiques : l'envoi d'une sonde vers Mars par exemple implique une configuration donnée par rapport au Soleil de cette planète avec la Terre (voir exercice E7-3), et il est important de savoir quand se reproduira la configuration identique favorable à un nouveau lancement.

Comète 22
Conique 44
Conjonction 29
Constante
 de gravitation universelle 110
 dynamique
 première 60
 géocentrique de la gravitation 111
 héliocentrique de la gravitation
 110
Constante de Gauss 26
Constante dynamique
 deuxième 130
Constellation 220
Coordonnées
 horizontales 190
 terrestres 188
Crépuscule 218

D

Déclinaison 194
Déférent 72
Développée 94
Déviation gravitationnelle 151
Directrice 44
Distance
 focale 47
 polaire 194
 zénithale 192

E

Écliptique 21, 27
Effet catapulte 156
Éléments moyens 258
Enveloppe 94
Épicycle 72
Équant 72
Équateur céleste 27, 223
Équation
 de Kepler 89
 du temps 232
Étoile 20
 double 125
 polaire 28
Excentricité 44

F

Formule
 de Ramanujan 168

Formules
 de Binet 61
Foyer 44
Fuseaux horaires 234

G

Galaxie 23
Géodésique 205
Géosynchrone 139
Grand axe 47
Groupe local 24

H

Hauteur 190
Heure
 légale 234
Horizon du lieu 190

I

Inclinaison 255
Intégrale elliptique 167
Intensité 222

J

Jour
 sidéral 25
 solaire 25
Jour julien 36
 modifié 36

L

Latitude 188
 à la méridienne 202
 écliptique 229
Ligne
 des apsides 256
 des équinoxes 255
 des nœuds 254
Loi des aires 60
Longitude 188
 du péricentre 256
 écliptique 229
 moyenne 257
Luminosité 222
Lunaison 39

M

- Magnitude
 - absolue 222
 - apparente 222
- Méridien 188
 - céleste 223
 - du lieu 191
 - origine 188
- Mille marin 190
- Mois
 - anomalistique 41
 - draconitique 41
 - sidéral 37
 - synodique 38
 - tropique 41
- Monture
 - alt-azimutale 193
 - équatoriale 197
- Moyen mouvement 88

N

- Nadir 190
- Nœud
 - ascendant 254
 - descendant 254
- Nomenclature des comètes 101
- Nuage de Oort 22
- Nuit civile 251

O

- Obliquité 27, 229
- Opposition 29
- Orbite
 - de Clarke 138
 - géostationnaire 138
 - géosynchrone 138
- Orbite d'insertion 157

P

- Parallaxe annuelle 35
- Parallèle 188
- Paramètre 45
 - d'impact 151
- Parsec 34
- Périastre 47
- Péricentre 46
- Périgée 47

- Périhélie 47
- Période
 - sidérale 29
 - synodique 28
- Petit axe 47
- Phase 39
- Pied de l'astre 192
- Planète 20, 110
 - jovienne 21
 - tellurique 21
- Point
 - astronomique 203
- Point gamma 27
- Point vernal 27
- Pôle écliptique 229
- Potentiel gravitationnel 128
- Précession des équinoxes 27
- Problème de Lambert 180

Q

- Quadrature 29

R

- Rayon de courbure 75
- Référentiel
 - barycentrique 115
 - de Copernic 115
 - Galiléen 113
 - héliocentrique 110
 - héliocentrique ou de Kepler 115
 - relatif 115
- Réfraction 216
- Rétrograde 273
- Révolution 27
- Rotation 25

S

- Satellite 22
 - constellation de 23
 - semi-synchrone 266
 - synchrone 139
- Sens rétrograde 25
- Sextant 192
- Sonde 146
- Sphère céleste 27, 223
- Sphère d'influence 152
- Spirale
 - de Descartes 82
 - hyperbolique 84