

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>15</b>
1.1	Le Système solaire . . . . .	15
1.1.1	Composition . . . . .	15
1.1.2	La Terre . . . . .	16
1.2	Mesure du temps . . . . .	18
1.2.1	L'année . . . . .	18
1.2.2	Le jour . . . . .	18
<b>2</b>	<b>Les repères</b>	<b>21</b>
2.1	Définition des repères . . . . .	21
2.1.1	Le repère terrestre inertiel $\mathcal{R}_E(\mathcal{C}_T, \vec{x}_E, \vec{y}_E, \vec{z}_E)$ . . . . .	21
2.1.2	Le repère terrestre lié à la Terre $\mathcal{R}_T(\mathcal{C}_T, \vec{x}_T, \vec{y}_T, \vec{z}_T)$ . . . . .	22
2.1.3	Le repère orbital $\mathcal{R}_O(\mathcal{C}_T, \vec{x}_O, \vec{y}_O, \vec{z}_O)$ . . . . .	24
2.1.4	Le repère orbital local $\mathcal{R}_{O^*}(S, \vec{u}_R, \vec{u}_T, \vec{u}_N)$ . . . . .	25
2.2	Matrices de passage associées . . . . .	26
2.2.1	Définition et notations utilisées . . . . .	26
2.2.2	Passage du repère $\mathcal{R}_E$ au repère $\mathcal{R}_T$ . . . . .	27
2.2.3	Passage du repère $\mathcal{R}_E$ au repère $\mathcal{R}_O$ . . . . .	27
2.2.4	Passage du repère $\mathcal{R}_O$ au repère $\mathcal{R}_{O^*}$ . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Le mouvement képlérien</b>	<b>29</b>
3.1	Mouvement à attraction centrale . . . . .	29
3.1.1	Propriétés . . . . .	29
3.1.2	Équations du mouvement . . . . .	30
3.1.3	Potentiel d'attraction . . . . .	31
3.1.4	Énergie potentielle d'attraction . . . . .	33
3.1.5	Nature du mouvement . . . . .	34
3.2	Gravitation universelle . . . . .	38
3.2.1	Loi de Newton . . . . .	38
3.2.2	Potentiel newtonien . . . . .	39
3.3	Le problème à deux corps . . . . .	40
3.3.1	Équations du mouvement . . . . .	40
3.3.2	Lois de Kepler . . . . .	42

---

<b>4</b>	<b>L'orbite terrestre</b>	<b>47</b>
4.1	Caractéristiques de l'orbite terrestre . . . . .	47
4.1.1	Orbite elliptique ( $\overline{\mathbb{E}}_T < 0$ ) . . . . .	48
4.1.2	Orbite parabolique ( $\overline{\mathbb{E}}_T = 0$ ) . . . . .	49
4.1.3	Orbite hyperbolique ( $\overline{\mathbb{E}}_T > 0$ ) . . . . .	50
4.2	Les paramètres orbitaux . . . . .	51
4.2.1	Anomalie moyenne . . . . .	51
4.2.2	Vecteur excentricité $\vec{e}$ . . . . .	55
4.2.3	Définition des éléments képlériens . . . . .	56
4.2.4	Cas de l'orbite quasi-circulaire . . . . .	57
4.3	Les traces sol . . . . .	58
4.3.1	Définition . . . . .	58
4.3.2	Calcul de la longitude et de la latitude . . . . .	58
4.3.3	Condition de phasage . . . . .	60
4.3.4	Points caractéristiques . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Le problème circulaire restreint à trois corps</b>	<b>67</b>
5.1	Généralités . . . . .	67
5.1.1	Le problème à trois corps dans l'histoire des sciences . . . . .	67
5.1.2	Hypothèses . . . . .	69
5.2	Les points de Lagrange . . . . .	71
5.2.1	Définition . . . . .	71
5.2.2	Positions . . . . .	71
5.2.3	Stabilité . . . . .	74
5.2.4	Applications . . . . .	75
5.3	La sphère d'influence . . . . .	78
5.3.1	Définition . . . . .	78
5.3.2	Approximation analytique . . . . .	80
<b>6</b>	<b>Environnement spatial et perturbations</b>	<b>85</b>
6.1	Perturbations d'origine gravitationnelle . . . . .	85
6.1.1	Potentiel gravitationnel terrestre . . . . .	85
6.1.2	Potentiel luni-solaire . . . . .	89
6.2	Perturbations dues aux radiations solaires . . . . .	92
6.2.1	Présentation . . . . .	92
6.2.2	Expression générale . . . . .	94
6.2.3	Application à la plaque plane . . . . .	98
6.3	Perturbations dues à l'atmosphère terrestre . . . . .	98
6.3.1	Présentation . . . . .	98
6.3.2	Expression générale . . . . .	99
6.3.3	Coefficients de portance et de traînée de la plaque plane . . . . .	101

---

<b>7</b>	<b>Effet des perturbations et héliosynchronisme</b>	<b>105</b>
7.1	Traitement des perturbations d'origine gravitationnelle . . . . .	105
7.1.1	Définition des paramètres osculateurs . . . . .	105
7.1.2	Les équations de Lagrange . . . . .	106
7.1.3	Évolution des paramètres orbitaux . . . . .	107
7.2	L'orbite héliosynchrone . . . . .	113
7.2.1	Définition et utilisation . . . . .	113
7.2.2	Condition d'héliosynchronisme . . . . .	113
<b>8</b>	<b>Propulsion spatiale et manœuvres orbitales</b>	<b>117</b>
8.1	Généralités . . . . .	117
8.1.1	Présentation et hypothèses . . . . .	117
8.1.2	Équation de Tsiolkovski . . . . .	119
8.1.3	Technologies de propulsion spatiale . . . . .	121
8.2	Manœuvres usuelles . . . . .	122
8.2.1	Modification de la forme de l'orbite ( $a, e$ ) . . . . .	122
8.2.2	Modification du plan orbital ( $i$ ) . . . . .	124
8.2.3	Modification de l'orientation de l'orbite ( $\omega$ ) . . . . .	125
<b>9</b>	<b>L'orbite géostationnaire</b>	<b>129</b>
9.1	Généralités . . . . .	129
9.1.1	Définition et utilisations . . . . .	129
9.1.2	Caractéristiques . . . . .	130
9.2	Mise à poste . . . . .	131
9.2.1	Orbite de transfert géostationnaire . . . . .	131
9.2.2	Orbite de transfert super-synchrone . . . . .	133
9.2.3	Rendez-vous en longitude . . . . .	135
9.2.4	Fenêtre de tir géostationnaire . . . . .	137
9.3	Dérive des paramètres orbitaux géostationnaires . . . . .	138
9.3.1	Paramètres orbitaux adaptés . . . . .	139
9.3.2	Évolution du vecteur inclinaison : effet du potentiel luni-solaire	139
9.3.3	Évolution de la longitude moyenne : effet des perturbations du potentiel gravitationnel terrestre . . . . .	140
9.3.4	Évolution du vecteur excentricité : pression de radiation solaire	145
9.3.5	Fenêtre de stationnement et maintien à poste . . . . .	147
<b>10</b>	<b>Les missions interplanétaires</b>	<b>149</b>
10.1	Généralités . . . . .	149
10.1.1	Hypothèses simplificatrices . . . . .	149
10.1.2	Méthode des coniques juxtaposées . . . . .	150
10.2	Analyse d'une mission interplanétaire . . . . .	150
10.2.1	Départ : libération de la Terre . . . . .	150
10.2.2	Arrivée : capture par une planète $\mathcal{P}$ . . . . .	152
10.3	Trajet interplanétaire optimal . . . . .	154
10.3.1	Notion de transfert optimal . . . . .	154

10.3.2	L'orbite de Hohmann . . . . .	154
10.3.3	Rendez-vous : fenêtre de tir . . . . .	156
10.4	Assistance gravitationnelle . . . . .	158
10.4.1	Principe et utilisation . . . . .	158
10.4.2	Variation de vitesse . . . . .	159
10.4.3	Variation d'énergie . . . . .	161
<b>Annexes</b>		<b>163</b>
<b>A Potentiel gravitationnel généralisé</b>		<b>165</b>
A.1	Potentiel élémentaire . . . . .	165
A.2	Potentiel gravitationnel complet . . . . .	167
A.2.1	Expression générale . . . . .	167
A.2.2	Corps à symétrie sphérique . . . . .	168
A.2.3	Potentiel gravitationnel terrestre . . . . .	170
<b>B Équations de Lagrange</b>		<b>171</b>
B.1	Équations du mouvement . . . . .	171
B.2	Crochets de Lagrange . . . . .	171
B.3	Équations de Lagrange . . . . .	174
<b>C Transfert optimal de Hohmann</b>		<b>177</b>
C.1	Présentation - mise en équation . . . . .	177
C.2	Optimisation paramétrique du transfert . . . . .	180
<b>Index</b>		<b>183</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>187</b>