

# Table des matières

Avant-propos	xi
Avertissement	xv
<b>I Les fondements</b>	<b>1</b>
<b>1 L'information en astrophysique</b>	<b>3</b>
1.1 Les porteurs de l'information . . . . .	4
1.1.1 Le rayonnement électromagnétique . . . . .	4
1.1.2 La matière : électrons, noyaux et météorites . . . . .	6
1.1.3 Les neutrinos . . . . .	6
1.1.4 Les ondes gravitationnelles . . . . .	8
1.1.5 L'observation <i>in situ</i> . . . . .	11
1.2 L'acquisition de l'information . . . . .	12
1.2.1 Les principales caractéristiques du photon . . . . .	13
1.2.2 Le système d'observation . . . . .	13
1.2.3 Une approche raisonnée de l'observation . . . . .	30
1.3 L'organisation mondiale de l'astronomie . . . . .	31
1.3.1 Les hommes et les femmes . . . . .	31
1.3.2 Les institutions et les politiques de recherche . . . . .	32
1.3.3 Les publications . . . . .	37
<b>2 L'atmosphère terrestre et l'espace</b>	<b>43</b>
2.1 La structure physico-chimique de l'atmosphère . . . . .	44
2.1.1 Structure verticale . . . . .	44
2.1.2 Constituants atmosphériques . . . . .	45
2.2 L'absorption du rayonnement . . . . .	49
2.3 Les émissions atmosphériques . . . . .	54
2.3.1 Émissions de fluorescence . . . . .	55
2.3.2 Émission thermique . . . . .	59
2.3.3 La technique des mesures différentielles . . . . .	61
2.4 La diffusion du rayonnement . . . . .	63

2.5	La réfraction et la dispersion atmosphérique . . . . .	66
2.6	La turbulence de l'atmosphère terrestre . . . . .	68
2.6.1	Turbulence de l'atmosphère inférieure et moyenne . . . . .	68
2.6.2	Turbulence ionosphérique . . . . .	76
2.7	L'atmosphère, convertisseur de rayonnement . . . . .	76
2.7.1	L'astronomie $\gamma$ au sol . . . . .	76
2.7.2	Gerbes atmosphériques et rayons cosmiques . . . . .	77
2.8	Les sites terrestres d'observation . . . . .	77
2.8.1	Visible, infrarouge ( $\lambda \lesssim 30 \mu\text{m}$ ) et millimétrique ( $\lambda \gtrsim 0.5 \text{ mm}$ ) . . . . .	78
2.8.2	La radioastronomie centimétrique et métrique . . . . .	80
2.8.3	L'astronomie $\gamma$ de très haute énergie . . . . .	81
2.8.4	Le rayonnement cosmique de très haute énergie . . . . .	81
2.8.5	Pollutions et parasites anthropogéniques . . . . .	82
2.8.6	L'Antarctique . . . . .	83
2.9	L'observation dans l'espace . . . . .	84
2.9.1	Les bénéfices de l'observation spatiale . . . . .	85
2.9.2	Les sources de perturbation . . . . .	86
2.9.3	Le choix des orbites . . . . .	93
2.10	La Lune, site astronomique? . . . . .	94
<b>3</b>	<b>Rayonnement et photométrie</b> . . . . .	<b>101</b>
3.1	La photométrie . . . . .	102
3.2	Notions liées au rayonnement . . . . .	107
3.2.1	Le rayonnement de corps noir . . . . .	107
3.2.2	La cohérence du rayonnement . . . . .	108
3.3	Les systèmes de magnitudes . . . . .	113
3.4	Photométrie au travers de l'atmosphère . . . . .	116
3.5	Étalonnages et standards d'intensité . . . . .	117
3.5.1	Radiofréquences ( $\lambda \gtrsim 0.5 \text{ mm}$ ) . . . . .	118
3.5.2	Submillimétrique, infrarouge et visible . . . . .	119
3.5.3	Ultraviolet et rayons X ( $0.1 \lesssim \lambda \leq 300 \text{ nm}$ ) . . . . .	125
3.5.4	Rayonnement $\gamma$ . . . . .	127
3.5.5	Quelques illustrations de spectrophotométrie . . . . .	128
3.6	L'étalonnage des dimensions angulaires . . . . .	131
<b>4</b>	<b>Les repères d'espace et de temps</b> . . . . .	<b>135</b>
4.1	Le repérage spatial . . . . .	137
4.1.1	Définitions des repères d'espace . . . . .	137
4.1.2	Les repères astronomiques . . . . .	139
4.1.3	Les changements de repères . . . . .	147
4.2	La matérialisation des repères spatiaux . . . . .	153
4.2.1	Les systèmes de références célestes . . . . .	153
4.2.2	Les catalogues fondamentaux . . . . .	154
4.2.3	Le système extragalactique . . . . .	156

4.2.4	Le repère Hipparcos . . . . .	161
4.2.5	Le futur proche : la mission GAIA . . . . .	165
4.3	Le repérage temporel . . . . .	167
4.3.1	Les échelles de temps . . . . .	167
4.3.2	Le temps atomique . . . . .	171
4.3.3	Le temps universel coordonné (TUC ou UTC) . . . . .	175
4.3.4	Le temps GPS . . . . .	176
4.3.5	Les temps dynamiques . . . . .	178
4.3.6	Les dates et les époques : les comptes longs . . . . .	180
 <b>II Recueillir l'information</b>		<b>183</b>
<b>5</b>	<b>Les télescopes</b>	<b>185</b>
5.1	L'objet et l'image en astronomie . . . . .	186
5.1.1	Le télescope et l'optique géométrique . . . . .	187
5.1.2	L'optique gravitationnelle . . . . .	194
5.2	La grande famille des télescopes . . . . .	195
5.2.1	Les radiotélescopes . . . . .	196
5.2.2	Les télescopes optiques au sol : visible et proche infrarouge . . . . .	199
5.2.3	Les télescopes spatiaux : de l'ultraviolet au submillimétrique . . . . .	206
5.2.4	Les télescopes X (0.1 à 10 keV) . . . . .	210
5.2.5	Les télescopes $\gamma$ ( $\geq 10$ keV) . . . . .	212
<b>6</b>	<b>Formation des images et diffraction</b>	<b>221</b>
6.1	La diffraction d'une ouverture quelconque . . . . .	223
6.1.1	Le théorème de Zernike . . . . .	223
6.1.2	L'étendue de cohérence . . . . .	227
6.1.3	La diffraction à l'infini . . . . .	228
6.1.4	Le filtrage spatial d'une pupille . . . . .	233
6.2	L'atmosphère terrestre et la perte de cohérence . . . . .	239
6.2.1	Les perturbations du front d'onde . . . . .	241
6.2.2	L'image perturbée . . . . .	244
6.2.3	L'impact de l'atmosphère sur l'interférométrie . . . . .	251
6.3	L'optique adaptative . . . . .	252
6.3.1	Mesure du front d'onde . . . . .	253
6.3.2	Dispositif correcteur de phase . . . . .	257
6.3.3	Image finale . . . . .	259
6.3.4	Sensibilité et sources de référence . . . . .	259
6.3.5	De nouveaux concepts . . . . .	264
6.4	L'interférométrie astronomique . . . . .	268
6.4.1	L'obtention du signal interférométrique . . . . .	269
6.4.2	Le transport de la lumière . . . . .	274

6.4.3	La cohérence temporelle . . . . .	277
6.4.4	Les pertes de cohérence spatiale . . . . .	277
6.4.5	L'étalonnage de la FTM instrumentale . . . . .	281
6.4.6	La clôture de phase . . . . .	284
6.5	La famille des interféromètres astronomiques . . . . .	286
6.5.1	Les réseaux de radiotélescopes . . . . .	287
6.5.2	Les réseaux optiques au sol . . . . .	296
6.5.3	L'interférométrie optique dans l'espace . . . . .	305
6.6	L'imagerie à très haute dynamique . . . . .	309
6.6.1	Coronographie et apodisation . . . . .	309
6.6.2	L'interférométrie à frange noire . . . . .	322
<b>7</b>	<b>Les récepteurs du rayonnement</b>	<b>335</b>
7.1	Propriétés générales des récepteurs . . . . .	336
7.1.1	Récepteurs d'amplitude et quadratiques . . . . .	337
7.1.2	La structure spatiale des récepteurs . . . . .	339
7.1.3	La réponse temporelle . . . . .	342
7.1.4	Les bruits . . . . .	343
7.1.5	Comment caractériser un récepteur ? . . . . .	343
7.2	Les fluctuations fondamentales . . . . .	344
7.2.1	Le bruit quantique . . . . .	349
7.2.2	Le bruit thermique . . . . .	353
7.3	Les principes physiques de la détection du rayonnement électromagnétique . . . . .	356
7.3.1	La détection des quanta . . . . .	357
7.3.2	La détection du champ électromagnétique . . . . .	368
7.4	Les récepteurs astronomiques : des X au submillimétrique . . . . .	368
7.4.1	Les performances en bruit . . . . .	369
7.4.2	La plaque photographique . . . . .	371
7.4.3	Photomultiplicateur et caméras classiques (X, UV, visible) . . . . .	372
7.4.4	Les récepteurs du rayonnement X . . . . .	378
7.4.5	Le récepteur à transfert de charge . . . . .	380
7.4.6	Le récepteur à couplage de charge CCD . . . . .	381
7.4.7	Le récepteur hybride CMOS . . . . .	388
7.4.8	Conditions d'observation dans l'infrarouge . . . . .	395
7.4.9	Évolution des matrices DTC pour l'infrarouge . . . . .	397
7.4.10	Le bolomètre . . . . .	398
7.5	Les récepteurs astronomiques : radiofréquences . . . . .	404
7.5.1	Principes généraux . . . . .	404
7.5.2	La détection hétérodyne . . . . .	410
7.5.3	La diversité de la radio-astronomie . . . . .	421
7.6	Les systèmes d'observation en astronomie $\gamma$ . . . . .	422
7.6.1	Résoudre spatialement les sources $\gamma$ . . . . .	424

7.6.2	L'analyse spectrale des sources $\gamma$ . . . . .	430
7.7	Les systèmes d'observation des neutrinos . . . . .	439
7.7.1	La détection radiochimique des neutrinos solaires . . . . .	439
7.7.2	La détection par rayonnement Čerenkov . . . . .	442
7.7.3	L'astronomie des neutrinos de haute énergie . . . . .	444
7.8	La détection des ondes gravitationnelles . . . . .	446
<b>8</b>	<b>L'analyse spectrale</b>	<b>457</b>
8.1	Les spectres en astrophysique . . . . .	458
8.1.1	La formation des spectres . . . . .	458
8.1.2	L'information en spectrométrie . . . . .	464
8.2	Les spectromètres et leurs propriétés . . . . .	471
8.2.1	Les grandeurs caractéristiques d'un spectromètre . . . . .	471
8.2.2	Les modalités d'isolement spectral . . . . .	475
8.2.3	Les modes des spectromètres . . . . .	476
8.3	Les spectromètres interférentiels . . . . .	478
8.3.1	Critères généraux . . . . .	478
8.3.2	Filtre interférentiel . . . . .	479
8.3.3	Réseaux . . . . .	479
8.3.4	Le spectromètre à transformée de Fourier . . . . .	498
8.3.5	Le spectromètre de Pérot-Fabry . . . . .	504
8.3.6	Le spectromètre de Bragg (domaine X) . . . . .	508
8.4	La spectrométrie des radiofréquences . . . . .	511
8.4.1	Les méthodes d'isolement spectral . . . . .	512
8.4.2	La spectrométrie submillimétrique . . . . .	517
8.5	Le spectromètre à résonance . . . . .	520
<b>III</b>	<b>Analyser l'information</b>	<b>525</b>
<b>9</b>	<b>Le signal en astronomie</b>	<b>527</b>
9.1	Le signal et ses fluctuations . . . . .	528
9.1.1	Le signal et le système d'observation . . . . .	528
9.1.2	Les fluctuations du signal. Notion de bruit . . . . .	529
9.1.3	Les traitements élémentaires du signal . . . . .	536
9.1.4	Un exemple spécifique de traitement de données . . . . .	545
9.2	La modélisation complète d'un système d'observation . . . . .	547
9.3	Les performances globales d'un système . . . . .	550
9.3.1	Observer avec l'interféromètre millimétrique de l'IRAM . . . . .	551
9.3.2	Observer avec l'optique adaptative NAOS . . . . .	554
9.3.3	Observer avec le satellite photométrique COROT . . . . .	556
9.3.4	Observer avec un instrument $\gamma$ à masque codé . . . . .	559
9.4	Peut-on corriger les signatures instrumentales? . . . . .	562
9.4.1	L'émission propre de l'instrument . . . . .	563
9.4.2	Le courant d'obscurité . . . . .	563

9.4.3	Les défauts de non-linéarité . . . . .	564
9.4.4	Les tensions parasites ou biais . . . . .	565
9.4.5	La lumière parasite . . . . .	565
9.4.6	La correction de <i>champ plat</i> . . . . .	566
9.4.7	Les pixels défectueux . . . . .	567
9.4.8	Les effets d'impacts de particules énergétiques . . . . .	567
9.5	Le problème de l'estimation . . . . .	567
9.5.1	Les échantillons et les statistiques . . . . .	568
9.5.2	L'estimation ponctuelle . . . . .	569
9.5.3	Quelques éléments de théorie de la décision . . . . .	569
9.5.4	Les propriétés des estimateurs . . . . .	572
9.5.5	L'inégalité de Fréchet ou de Rao-Cramér . . . . .	580
9.5.6	Les estimateurs efficaces . . . . .	582
9.5.7	L'efficacité d'un estimateur . . . . .	584
9.5.8	Le cas des estimateurs biaisés . . . . .	584
9.5.9	Borne efficace et information de Fisher . . . . .	586
9.5.10	Le cas multidimensionnel . . . . .	586
9.5.11	Les estimateurs fiables . . . . .	587
9.5.12	Quelques méthodes classiques . . . . .	589
9.6	Des données à l'objet : le problème inverse . . . . .	591
9.6.1	La position du problème . . . . .	591
9.6.2	Qu'est-ce qu'un problème bien posé? . . . . .	595
9.6.3	Les méthodes d'inversion classiques . . . . .	598
9.6.4	Les méthodes d'inversion avec régularisation . . . . .	604
9.6.5	Une application à l'imagerie par optique adaptative . . . . .	608
9.6.6	Une application à l'interférométrie coronographique . . . . .	611
<b>10</b>	<b>Grands relevés et observatoires virtuels</b>	<b>621</b>
10.1	L'astrophysique statistique . . . . .	621
10.2	Les grands relevés . . . . .	624
10.2.1	Les relevés aux longueurs d'onde du visible . . . . .	625
10.2.2	Les relevés dans l'infrarouge . . . . .	630
10.3	Un observatoire virtuel . . . . .	631
	<b>Appendice I : La transformation de Fourier</b>	<b>635</b>
I.1	Définitions et propriétés . . . . .	635
I.1.1	Définitions . . . . .	635
I.1.2	Quelques propriétés . . . . .	636
I.1.3	Cas particuliers importants : une dimension . . . . .	638
I.1.4	Cas particuliers importants : deux dimensions . . . . .	641
I.1.5	Théorèmes importants . . . . .	645
I.2	Grandeurs physiques et transformation de Fourier . . . . .	648
I.3	La transformation en ondelettes . . . . .	651

<b>Appendice II : Les variables et processus aléatoires</b>	<b>653</b>
II.1 Variables aléatoires . . . . .	653
II.2 Processus aléatoires ou stochastiques . . . . .	660
II.3 Mesures physiques et estimations . . . . .	668
II.3.1 Un exemple d'estimation : la loi des grands nombres . . .	669
II.3.2 Estimation des moments d'un processus . . . . .	670
<b>Table des constantes et valeurs utiles</b>	<b>675</b>
<b>Table des missions spatiales</b>	<b>677</b>
<b>Webographie</b>	<b>679</b>
<b>Sigles et acronymes</b>	<b>697</b>
<b>Petit lexique « anglais »-français</b>	<b>705</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>707</b>
<b>Index</b>	<b>731</b>